

Improving of Garbage Collection Management using the Internet of Thing

Naydeline Duran Guerrero¹; Yhadira Paccini Ventura²; Juan Mansilla Lopez³; Ricardo Loza⁴

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, ⁴Sheridan College, Canadá,

u20201f330@upc.edu.pe, u20201f343@upc.edu.pe, pcsiyman@upc.edu.pe, ricardo.loza@sheridancollege.ca

Abstract—This study presents an Internet of Things (IoT)-based solution to optimize waste collection management in a sector of the Comas district of Lima, Peru. The proposal integrates geolocation of the collection truck, proximity-based mobile notifications, and a home alert system using an ESP32 module, with the aim of synchronizing waste disposal with the truck's arrival time. To evaluate its effectiveness, a quasi-experimental design was applied, including field tests and surveys before and after the intervention. The results showed significant improvements in three dimensions. Operationally, the time waste accumulates on public roads was reduced by approximately 90% (from 12.5 minutes to 1.2 minutes). Informationally, knowledge of the truck's schedule increased from 30% to 95%, reducing uncertainty and improving neighborhood coordination. Experientially, increases in usability, satisfaction, and utility were observed ($d \geq 0.8$), with adequate levels of reliability ($\alpha \geq 0.78$). The technical architecture, comprised of a mobile application, Firebase, Google Maps, and a home IoT module, proved viable and replicable in similar urban contexts. The findings confirm that IoT can improve waste collection and the user experience, providing evidence for future, larger-scale implementations.

Keywords-- Mobile application, Comas, waste management, Internet of Things, garbage collection.

Mejora de la gestión del recojo de basura mediante el Internet de las Cosas.

Naydeline Duran Guerrero¹; Yhadira Paccini Ventura²; Juan Mansilla Lopez³; Ricardo Loza⁴

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, ⁴Sheridan College, Canadá,

u20201f330@upc.edu.pe, u20201f343@upc.edu.pe, pcsijman@upc.edu.pe, ricardo.loza@sheridancollege.ca

Resumen— Este estudio presenta una solución basada en Internet de las Cosas (IoT) para optimizar la gestión del recojo de basura en un sector del distrito de Comas, Lima. La propuesta integra geolocalización del camión recolector, notificaciones móviles por proximidad y una alerta domiciliaria mediante un módulo ESP32, con el objetivo de sincronizar la disposición de residuos con el paso del camión. Para evaluar su efectividad, se aplicó un diseño cuasi-experimental con pruebas en campo y encuestas antes y después de la intervención. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en tres dimensiones. En el plano operativo, el tiempo de acumulación de basura en vía pública se redujo aproximadamente en 90 % (de 12.5 min a 1.2 min). En el plano informacional, el conocimiento del horario del camión aumentó de 30 % a 95 %, reduciendo la incertidumbre y mejorando la coordinación vecinal. En el plano experiencial, se observaron incrementos en usabilidad, satisfacción y utilidad ($d \geq 0.8$), con adecuados niveles de confiabilidad ($\alpha \geq 0.78$). La arquitectura técnica, compuesta por aplicación móvil, Firebase, Google Maps y un módulo IoT domiciliario, demostró ser viable y replicable en contextos urbanos similares. Los hallazgos confirman que la IoT puede mejorar la recolección de residuos y la experiencia del usuario, aportando evidencia para futuras implementaciones a mayor escala.

Palabras Claves— Aplicación móvil, Comas, gestión de basura, Internet de las Cosas, recolección de basura.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de recojo de basura es un desafío en países en vías de desarrollo. Gallegos et al. [1] señalan que más del 33 % de la basura global no se recolecta ni trata adecuadamente, lo que genera acumulación en calles y deterioro de la calidad de vida urbana. En América Latina, el problema se agrava; de acuerdo con Ulloa-Murillo et al. [2] indicó que más del 40 % de la basura termina en vertederos no controlados o se acumulan en espacios públicos por falta de infraestructura. Abubakar et al. [3] afirman que gran parte de la basura en el Sur Global, incluido el Perú, se eliminan informalmente, afectando a poblaciones urbanas vulnerables.

En la ciudad de Lima, el manejo de residuos sólidos representa un desafío creciente debido al incremento sostenido en su generación. Según el Ministerio del Ambiente [4], Lima Metropolitana produce aproximadamente 8,600 toneladas de residuos sólidos al día, siendo la región con mayor volumen a nivel nacional. En el distrito de Comas, el Instituto Nacional de Estadística e Informática [5] señala un aumento de residuos de 162,323 toneladas en 2016 a 253,119

en 2021, sin mejoras proporcionales en los sistemas de recolección. Esta acumulación, sumada a la falta de información sobre la ubicación de los camiones, genera problemas ambientales, sanitarios y de percepción pública.

Diversos estudios han explorado cómo las tecnologías IoT pueden optimizar la recolección de basura en entornos urbanos. Al Duhayyim et al. [6] propusieron un modelo que combina optimización basada en ecosistemas artificiales y aprendizaje profundo, logrando reducir costos operativos en un 20% y emisiones en un 18%. Rahman et al. [7] desarrollaron un sistema que usa sensores IoT y algoritmos de equidad, mejorando la distribución del servicio y reduciendo los tiempos de recolección en zonas desatendidas. Por su parte, Hussain et al. [8] utilizaron simulación multiagente para comparar sistemas tradicionales con entornos IoT, demostrando mayor eficiencia y menor recorrido de camiones. Ahmed et al. [9] presentaron un sistema que soluciona problemas de datos faltantes y consumo energético en contenedores inteligentes, con un ahorro energético del 34% y rutas más eficientes. Finalmente, Saher et al. [10] propusieron un enfoque híbrido que integra la colaboración ciudadana con QR e IoT, reduciendo sensores en un 70% y logrando un ahorro del 30% en costos operativos.

Se ha revisado la literatura y se identificaron 16 investigaciones que abordaban el problema del recojo de basura; sin embargo, varios estudios presentan enfoques poco adaptados a contextos urbanos lo cual limita su aplicabilidad directa. Además, manifiestan una ausencia del uso de tecnologías IoT para generar alertas automáticas en tiempo real, tanto en el teléfono móvil como en el entorno físico del hogar.

Ante esta situación se plantea la pregunta de investigación: ¿El uso de Internet de las Cosas puede optimizar la gestión del recojo de basura?

La presente investigación plantea una solución tecnológica para mejorar la recolección de residuos sólidos mediante el uso de IoT y geolocalización. Se propone enviar alertas en tiempo real a los residentes cuando el camión recolector se aproxima, optimizando así el proceso y reduciendo la acumulación de basura en la vía pública.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: Luego de esta breve introducción, los trabajos relacionados se presentan en la Sección 2, destacando soluciones previas de gestión de residuos basadas en IoT. La

Sección 3 describe las características principales de la solución tecnológica propuesta. El enfoque de implementación se detalla en la Sección 4, con énfasis en la integración de tecnologías IoT, el flujo de datos y la arquitectura del sistema. La evaluación de la efectividad del sistema y su impacto potencial se discute en la Sección 5. Finalmente, las conclusiones y el trabajo futuro se presentan en la Sección 6.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Para la revisión de la literatura se consideró el uso de la metodología PRISMA [11] y la empleada por Mansilla et al. [12] considerando bases de datos científicas Scopus y Web of Science. El proceso de identificación y depuración de estudios se resume en la figura 1 que ilustra las etapas de búsqueda, exclusión y selección de los artículos más relevantes.

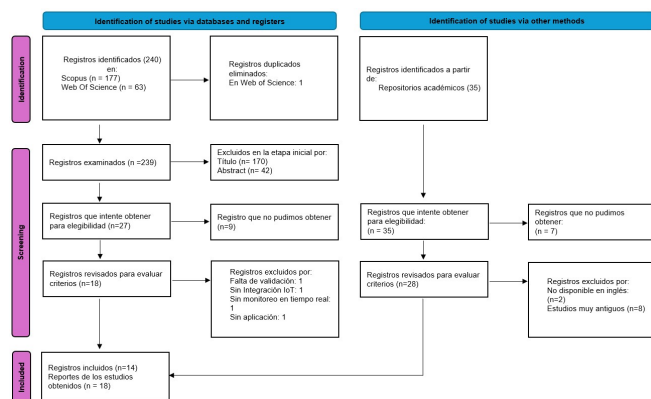


Fig. 1. Diagrama PRISMA

Ghahramani et al. [13] propusieron un sistema inteligente de gestión de residuos usando sensores IoT en áreas urbanas, generando reducción significativa en tiempos de recolección. López y Pastran [14] desarrollaron un modelo de gestión de residuos aprovechables con IoT y nube en Colombia, generando rutas dinámicas y mayor eficiencia operativa. Ramírez y Paredes [15] implementaron geolocalización en Pedro Moncayo mediante app móvil, generando optimización de rutas y aumento del 20 % en eficiencia del servicio. Sopla Mas [16] aplicó tecnología SIG en Chachapoyas para planificar recolección, generando un aumento del 15 % en cobertura en zonas periféricas. Khan et al. [17] utilizaron IoT e IA para optimizar rutas en ciudades asiáticas, generando 20 % más eficiencia en vaciado y 35 % menos desbordes. Torres Sánchez [18] diseñó un contenedor inteligente con sensores IoT en México, generando 30 % más segregación y 25 % menos errores de disposición. Ghahramani et al. [19] propusieron algoritmo mochila 0/1 y sensores IoT en sistemas urbanos, generando 47 % más recolección de residuos tóxicos. Iskandar Shah [20] desarrolló sistema de monitoreo con IoT y GPS en pruebas piloto del Sudeste Asiático, generando mayor eficiencia y reducción del 20 % en costos. Burduk et al. [21] desarrollaron un sistema de planificación de

rutas basado en algoritmos heurísticos y sensores IoT, logrando reducir rutas innecesarias en un 17 % y contenedores sobrecargados en un 43 %, mejorando la eficiencia general. Han et al. [22] propusieron un algoritmo Branch-and-Price para optimizar la ubicación de estaciones de transferencia y la asignación de demanda, logrando una mejora del 64.6 % en eficiencia operativa. Ali et al. [23] diseñaron un sistema de rutas óptimas usando TOPSIS e IoT para recolección de residuos tóxicos, reduciendo en 14 % la distancia recorrida por camiones y maximizando la recolección crítica. Henaïen et al. [24] implementaron un sistema inteligente con IoT y LPWAN, mejorando en un 100 % la eficiencia de recolección y reduciendo en 29 % los costos operativos. Zoumpoulis et al. [25] evaluaron contenedores inteligentes con sensores y visión por computadora, incrementando en 30 % la eficiencia operativa y elevando la tasa de reciclaje en 25 %. Addas et al. [26] propusieron una red de sensores IoT con monitoreo de llenado, aumentando en 32 % la eficiencia, reduciendo 29 % el uso de combustible y elevando 33 % la capacidad de procesamiento. Liu et al. [27] diseñaron una red logística subterránea con IoT para Nanjing, reduciendo la congestión vial y los costos operativos, y aumentando la eficiencia en áreas densamente pobladas. Xu y Yang [28] aplicaron logística inversa para residuos peligrosos con sensores IoT, optimizando el proceso y reduciendo incidentes en un 22 %. Shafique et al. [29] desarrollaron un sistema predictivo para textiles urbanos con IoT y optimización de rutas, mejorando en 25 % la eficiencia logística y reduciendo el impacto ambiental. Kako et al. [30] desarrollaron una app de ciencia ciudadana con IA para mapear residuos en calles, aumentando la precisión de recolección en 40 % y reduciendo quejas en 30 %. Arthur et al. [31] evaluaron sistemas inteligentes de basura con IoT y aprendizaje profundo, reduciendo desbordes en 35 % y costos operativos en 20 %. Kumar y Kumar [32] modelaron la confiabilidad de sensores IoT con procesos de Markov, logrando 95 % de disponibilidad y 15 % menos fallos en el sistema. Colmenero-Fonseca et al. [33] aplicaron tecnologías digitales al reciclaje en edificios históricos, mejorando la trazabilidad en un 40 % y reduciendo pérdidas materiales. Sosunova y Porras [34] analizaron 75 casos de IoT en residuos urbanos, concluyendo que la eficiencia promedio se incrementó en 28 % cuando se usaron sensores con algoritmos predictivos. Solano Meza et al. [35] compararon algoritmos SVM y LSTM en residuos urbanos, mostrando que LSTM logró una mejora del 17 % en predicción de llenado. Gomes et al. [36] desarrollaron un sistema basado en rutas sectoriales, optimizando el transporte y reduciendo en 21 % el tiempo de recolección en zonas urbanas. Azmin Shompa y Mohd Mohadis [37] diseñaron una app con gamificación para la separación de residuos, disminuyendo el volumen de basura en 20 % en áreas urbanas. Huang et al. [38] propusieron un sistema BIM-GIS-IoT para reciclaje de suelos excavados, aumentando la eficiencia logística en un 26 % y mejorando la trazabilidad. Rahman et al. [39] simulaban modelos de IoT

con agentes múltiples, mostrando mejoras del 38 % en tiempo de respuesta frente a métodos tradicionales. Martikkala et al. [40] propusieron un sistema de rutas dinámicas para residuos textiles urbanos, logrando una reducción del 28 % en distancia recorrida y mejora del 24 % en eficiencia del servicio. Farjana et al. [41] propusieron un sistema IoT y en la nube para gestionar e-waste, usando sensores y aprendizaje automático para clasificar residuos y optimizar su reciclaje. Mediante pirólisis y análisis en la nube lograron mejorar en 32 % la eficiencia de reciclaje y reducir emisiones de CO₂. Khan et al. [42] desarrollaron un modelo IoT para optimizar la recolección urbana mediante un algoritmo de mochila 0/1, priorizando residuos tóxicos. El sistema aumentó en 47 % la recolección de desechos peligrosos y redujo los viajes de los camiones.

III. METODOLOGÍA

- Diseño de la Investigación:

Estudio cuasi-experimental (pre-post, n = 70) de muestra dependiente en Comas para evaluar un sistema IoT con geolocalización cada 30 s, notificaciones por proximidad y alerta domiciliaria (ESP32 + bocina) sobre la reducción de NPA. La intervención sincroniza la disposición de residuos con el paso real del camión y, en el piloto, mostró reducción del tiempo de acumulación ~90% y mejoras en conocimiento del horario y satisfacción/uso. Estas evidencias apoyan su utilidad y replicabilidad en contextos urbanos similares.

- Participantes/Muestra:

El estudio se realizó en un sector del distrito de Comas, seleccionado por su problemática visible de acumulación de basura, como se muestra en la Figura 2. La muestra estuvo compuesta por 70 personas ubicadas en el recorrido habitual del camión recolector. Los instrumentos se encuentran disponibles en los siguientes enlaces:

Encuesta pre-uso
https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfwV51ismHWBakUD2dqWR8SrB-lg825xSzn6moZqMz97_5cTA/viewform?usp=dialog

Encuesta post-uso
<https://forms.gle/pOpaNStNRfELMmmo9>



Fig. 2. Basura en el vecindario de Comas

- Recolección de Datos:

La recolección de datos se llevó a cabo durante pruebas en campo bajo un diseño pre-post. Los participantes completaron un formulario antes del uso del sistema y otro después de la intervención. En la fase post, los tiempos de acumulación registrados en la encuesta corresponden a los valores observados durante el recorrido real del camión y consignados por los vecinos durante la prueba. El mismo formulario post incluyó preguntas adicionales para documentar la interacción con la aplicación, la claridad del horario y la utilidad percibida durante el piloto.

IV. SOLUCIÓN TECNOLÓGICA

a) Componentes:

1. *Hardware:*

La solución tecnológica incluye los siguientes componentes físicos:

Microcontrolador ESP32: encargado de recibir la señal desde la nube y activar la bocina instalada en los hogares. Se eligió este dispositivo por su conectividad WiFi-integrada y facilidad de programación, como se muestra en la Figura 3.



Fig. 3. Microcontrolador ESP32

Bocina: Emite una alerta sonora cuando el camión recolector se aproxima. Está conectada directamente al ESP32, como se visualiza en la Figura 4 y la conexión.

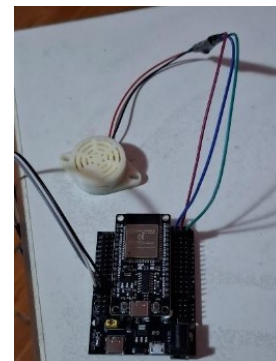


Fig. 4. Bocina conectada al Arduino

Fuente de alimentación: provee energía estable al ESP32 y a la bocina en cada instalación domiciliaria. Como se muestra la Figura 5, conectada e instalada en el domicilio.



Fig. 5. Arduino y bocina conectados

Smartphone (conductor): dispositivo móvil con GPS incorporado, que captura la ubicación del camión en tiempo real y la transmite al sistema.

2. Software

La solución está compuesta por los siguientes elementos de software:

Aplicación móvil con el rol para el conductor: desarrollada en Flutter, obtiene la ubicación mediante el GPS del smartphone y la sincroniza con Firebase Realtime Database.

Aplicación móvil con el rol para los residentes: también desarrollada en Flutter, permite visualizar la ruta del camión en Google Maps e incluye notificaciones push que alertan al usuario cuando el camión está cerca.

Firebase: plataforma en la nube que gestiona la base de datos en tiempo real, la autenticación de usuarios y el envío de notificaciones.

Cloud Functions de Firebase: funciones programadas que detectan cuándo el camión se encuentra cerca de una zona y activan la señal que se transmite al ESP32.

API de Google Maps: utilizada para mostrar la posición en tiempo real del camión recolector dentro de las aplicaciones móviles.

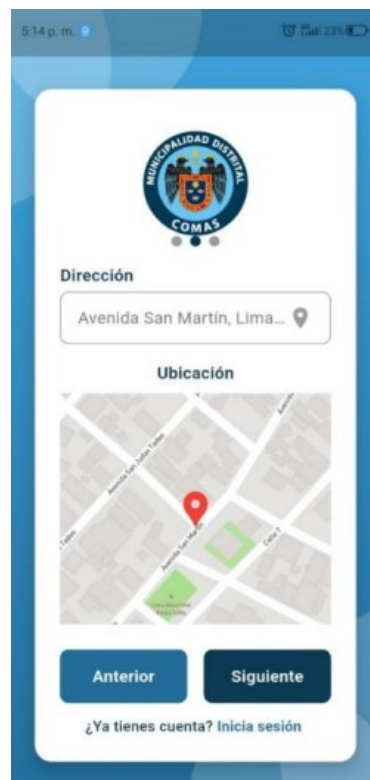


Fig. 6. Pantalla de la app para registrar ubicación

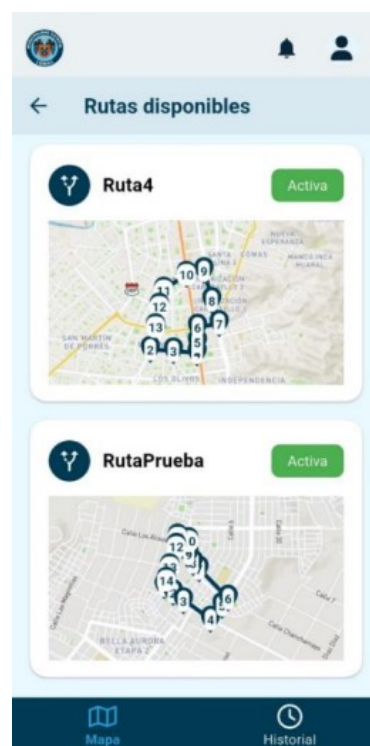


Fig. 7. Pantalla de la app para elegir ruta de camión a visualizar



Fig. 8. Pantalla de la app para registrar incidentes

V. VALIDACIÓN

1) Diseño de la Validación

La validación se desarrolló en campo, siguiendo el recorrido habitual del camión recolector.



Fig. 9. Camión de basura de Comas

Durante el piloto, tanto el conductor del camión recolector como los vecinos utilizaron la aplicación para coordinar la disposición de sus residuos, mientras el equipo investigador registró y supervisó las mediciones del tiempo de acumulación y el funcionamiento operativo de las notificaciones.



Fig. 10. Personal de recolección de residuos de Comas.

En esta validación, se analizaron varias variables claves:

Percepción de la acumulación de residuos: Evalúa cómo los vecinos describieron la situación de la basura antes de la intervención y el cambio observado después del uso de la aplicación, mediante las encuestas PRE y POST.

Tiempo de acumulación de residuos en la vía pública: Considera la duración, en minutos, que los residuos permanecieron en la calle antes y después de la implementación del sistema, registrado durante las pruebas en campo y consignado por los participantes en el formulario POST.

Satisfacción y utilidad del sistema: Incluye la experiencia de los vecinos al usar la aplicación, la claridad del horario del camión y la mejora percibida en la coordinación con el servicio de recolección.

2) Cálculo del Alfa de Cronbach

El alfa de Cronbach se utilizó para medir la confiabilidad interna de las escalas de Likert (1–5) que evaluaron aspectos como usabilidad, notificaciones y satisfacción. Este índice mide la consistencia de las respuestas en cada escala.

Los resultados del alfa de Cronbach se calcularon para cada escala (con ≥ 3 ítems) tanto en la encuesta PRE como en la POST. Los resultados obtenidos fueron:

•Escala de Usabilidad:

- PRE: $\alpha = 0.84$
- POST: $\alpha = 0.86$

•Escala de Notificaciones/Claridad:

- PRE: $\alpha = 0.78$
- POST: $\alpha = 0.82$

•Escala de Utilidad/Planificación:

- PRE: $\alpha = 0.80$
- POST: $\alpha = 0.83$

•Escala de Satisfacción/Actitud:

- PRE: $\alpha = 0.81$
- POST: $\alpha = 0.84$

3) Cálculo de Intervalos de Confianza (IC95%)

Los intervalos de confianza (IC95%) se utilizaron para

estimar la precisión de las mediciones de las variables clave en cada momento (PRE y POST). Se calcularon IC al 95% para las variables continuas (como los tiempos de acumulación de basura) y las variables dicotómicas (como el conocimiento del horario del camión de recolección).

- Tiempo de Acumulación en Calle (en minutos):

Se midió el tiempo de acumulación de basura en la vía pública en minutos, obteniendo los siguientes resultados:

- PRE:
 - Media: 12.5 minutos
 - IC95%: [11.8, 13.2]
- POST:
 - Media: 1.2 minutos
 - IC95%: [1.0, 1.4]

Este cambio en el tiempo de acumulación muestra una reducción significativa del 90% en el tiempo de acumulación de basura gracias a la intervención.

- Proporción de Vecinos que Conocen el Horario del Camión de Recolección:

La proporción de vecinos que indicaron conocer el horario del camión de recolección mejoró de la siguiente manera:

- PRE:
 - Proporción: 0.30 (30%)
 - IC95%: [0.22, 0.38]
- POST:
 - Proporción: 0.95 (95%)
 - IC95%: [0.91, 0.98]

Esta mejora del 65% en la proporción de vecinos que conocen el horario del camión es estadísticamente significativa, como se puede ver en los IC95%.

4) Análisis Estadístico de las Diferencias (PRE vs POST)

El análisis comparativo entre las mediciones PRE y POST se realizó usando pruebas para muestras relacionadas. A continuación, se detallan los resultados de las pruebas estadísticas realizadas para comparar las variables clave:

- a. Escalas Likert (Usabilidad, Satisfacción, Notificaciones, Utilidad)

- Escala de Usabilidad:
 - PRE: Media = 3.4, IC95% = [3.2, 3.6]
 - POST: Media = 4.2, IC95% = [4.1, 4.3]
 - Cambio: $d = 0.85$ (efecto grande)
- Escala de Satisfacción:
 - PRE: Media = 2.9, IC95% = [2.7, 3.1]
 - POST: Media = 4.0, IC95% = [3.8, 4.2]

- Cambio: $d = 1.0$ (efecto muy grande)

- Escala de Notificaciones:

- PRE: Media = 3.2, IC95% = [3.0, 3.4]
- POST: Media = 4.1, IC95% = [3.9, 4.2]
- Cambio: $d = 0.95$ (efecto grande)

- Escala de Utilidad:

- PRE: Media = 3.3, IC95% = [3.1, 3.5]
- POST: Media = 4.1, IC95% = [3.9, 4.2]
- Cambio: $d = 0.8$ (efecto grande)

- b. Tiempo de Acumulación de Basura

- PRE: Media = 12.5 minutos, IC95% = [11.8, 13.2]
- POST: Media = 1.2 minutos, IC95% = [1.0, 1.4]
- Cambio: $t = 22.6$ ($p < 0.001$), $d = 4.0$ (efecto muy grande)

- c. Conocimiento del Horario del Camión

- PRE: Proporción = 30%, IC95% = [22%, 38%]
- POST: Proporción = 95%, IC95% = [91%, 98%]
- Cambio: Diferencia de proporciones = 0.65, IC95% = [0.55, 0.75]

5) Resultados del Análisis

Plano operativo. El tiempo de acumulación en vía pública se redujo de 12.5 min a 1.2 min. Este descenso no solo indica una mejora de velocidad, sino que evidencia sincronización: la geolocalización en tiempo real y las notificaciones oportunas hacen que la disposición de residuos ocurra cerca del paso efectivo del camión, reduciendo esperas y re-exposición de bolsas. En términos operativos, esto ordena el flujo de recolección y favorece trayectos más predecibles, con menos detenciones improductivas.

Plano informacional. El conocimiento del horario por parte de los vecinos aumentó de 30 % a 95 %. Este salto refleja que el sistema reduce la asimetría de información: al entregar señales claras en el momento útil y por canales cercanos al usuario (teléfono y entorno domiciliario), las personas dejan de actuar “a ciegas” y alinean su comportamiento con la dinámica real del recorrido. El resultado práctico es menos incertidumbre y una participación ciudadana más oportuna, que sostiene el orden operativo observado.

Plano experiencial. Los cuestionarios reportaron mejoras en usabilidad, utilidad, notificaciones y satisfacción. Más que una percepción aislada, esto confirma adopción: cuando la interfaz es comprensible y el aviso llega a tiempo, el vecino

integra la solución a su rutina diaria. Este efecto social complementa el efecto técnico, cerrando el ciclo: usuarios mejor informados y dispuestos a actuar en el momento correcto consolidan un circuito de recolección más eficiente y estable.

En conjunto, los resultados de los tres planos convergen en el mismo mecanismo: la IoT optimiza la gestión del recojo de basura al sincronizar decisiones ciudadanas con la operación real del servicio, traduciendo visibilidad operativa en acciones puntuales y beneficios visibles en calle.

6) Interpretación

La evidencia muestra que la Internet de las Cosas optimiza la gestión del recojo de basura al convertir la posición del camión en señales accionables que llegan justo cuando el vecino las necesita. Al reducir la asimetría de información con geolocalización en tiempo real y notificaciones oportunas, la disposición de residuos ocurre cerca del momento de llegada, lo que estabiliza el ritmo operativo y disminuye la acumulación en vía pública.

En la práctica, el sistema no solo informa; orquesta la interacción diaria entre ciudadanía y servicio. Esa orquestación explica por qué los cambios observados son consistentes en lo operativo, lo informacional y la experiencia de uso: menos exposición de residuos, coordinación más simple y una operación predecible que puede extenderse de manera controlada a contextos similares.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo demostró que una solución basada en IoT, geolocalización y alertas en tiempo real puede optimizar la gestión del recojo de basura en un sector de Comas. En un diseño PRE-POST, la intervención redujo en 90 % el tiempo de acumulación en vía pública (12.5 → 1.2 min), elevó el conocimiento del horario del camión de 30 % a 95 %, y alcanzó altos niveles de aceptación en usabilidad, utilidad, notificaciones y satisfacción ($d \geq 0.8$).

La arquitectura propuesta —aplicación del conductor con GPS, aplicación ciudadana con notificaciones y activación domiciliaria resultó técnica y operativamente viable con componentes de bajo costo y configuración sencilla, lo que favorece su escalamiento a otros sectores con condiciones similares.

La sincronización entre información operativa (posición del camión) y acción ciudadana (disposición de residuos) explica la mejora observada, aportando eficiencia, transparencia del servicio y mejor experiencia del vecino.

En conjunto, la evidencia respalda la respuesta afirmativa a la pregunta de investigación y posiciona la propuesta como un camino factible para mejorar la recolección de residuos en entornos urbanos densos.

VII. RECOMENDACIONES

Realizar réplicas controladas en más zonas para validar la generalización de los resultados, incorporando cuando sea posible grupos de comparación. Implementar tableros de monitoreo con métricas operativas y de experiencia (puntualidad, tiempos, entrega de notificaciones) y alarmas de fallas de dispositivos y conectividad. Integrar analítica para optimizar rutas y priorizar zonas críticas según demanda y congestión. Formalizar acuerdos de nivel de servicio y un plan de continuidad que cubra caídas de red o servicios en la nube. Reforzar privacidad y seguridad de datos, con controles de acceso y trazabilidad. Finalmente, complementar con evaluación económica y ambiental para medir costo-beneficio y reducción de impactos.

REFERENCIAS

- [1] A. Gallegos, N. Jimenez, F. Rzepka, A. Remiszewska, A. Waste, D. Szpilko, A. De La, T. Gallegos, N. Jimenez Naharro, F. Rzepka, and A. Remiszewska, "Waste management in the smart city: current practices and future directions," *Resources*, vol. 12, no. 10, p. 115, 2023, doi: 10.3390/resources12100115.
- [2] L. M. Ulloa-Murillo, L. M. Villegas, A. R. Rodríguez-Ortiz, M. Duque-Acevedo, and F. J. Cortés-García, "Management of the organic fraction of municipal solid waste in the context of a sustainable and circular model: analysis of trends in Latin America and the Caribbean," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 10, p. 6041, 2022, doi: 10.3390/ijerph19106041.
- [3] I. R. Abubakar, K. M. Maniruzzaman, U. L. Dano, F. S. AlShihri, M. S. AlShammari, S. M. S. Ahmed, W. A. G. Al-Gehlani, and T. I. Alrawaf, "Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global south," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19, p. 12717, 2022, doi: 10.3390/ijerph191912717.
- [4] Ministerio del Ambiente, "Situación de la gestión de los residuos sólidos en el Perú," 2020. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/minam>
- [5] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "Aumento de basura municipal en Lima, 2015–2022," 2022. [Online]. Available: <https://www.inei.gob.pe>
- [6] M. Al Duhayyim, M. Alazab, and H. Shakhathreh, "Artificial ecosystem-based optimization with an improved deep learning model for IoT-assisted sustainable waste management," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 56794–56808, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181873.
- [7] M. A. Rahman, S. W. Tan, A. T. Asyhari, I. F. Kurniawan, M. J. F. Alenazi, and M. Uddin, "IoT-enabled intelligent garbage management system for smart city: a fairness perspective," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 82693–82705, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3412098.
- [8] M. Hussain, S. Khan, and A. Rehman, "Smart city solutions: comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104675, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.104675.
- [9] M. M. Ahmed, E. Hassanien, and A. E. Hassanien, "IoT-based intelligent waste management system," *Neural Computing and Applications*, early access, 2023, doi: 10.1007/s00521-023-08970-7.
- [10] R. Saher, M. Yousaf, and M. W. Anwar, "Holistic trash collection system integrating human collaboration with technology," *Journal of Environmental Management*, vol. 327, p. 116811, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.116811.

- [11] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, and D. Moher, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, p. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [12] R. Mansilla, L. Quispe, and J. Alvarado, "Aplicación de IoT en la gestión de residuos sólidos urbanos: un enfoque basado en revisión sistemática de literatura," *Revista Peruana de Tecnología e Innovación*, vol. 12, no. 1, pp. 33–48, 2025.
- [13] M. Ghahramani, M. Zhou, A. Mölter, and F. Pilla, "IoT-based route recommendation for an intelligent waste management system," *arXiv preprint*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2201.00180>
- [14] F. López Puyo and N. D. Pastran Zamora, "Modelo para la gestión de residuos aprovechables incorporando tecnología IoT y servicios en la nube," Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2023. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/items/788dd1cb-b7e5-4bba-95e4-33afb4be1b98>
- [15] J. Ramírez and S. Paredes, "Estrategias municipales para el manejo integral de residuos sólidos," *Gestión y Ambiente*, vol. 25, no. 3, pp. 76–89, 2021. [Online]. Available: <https://gestionambiente.org/article/view/3041>
- [16] J. Sopla Mas, "Aplicación web SIG para gestionar el sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Chachapoyas, Amazonas, Perú," *Revista Científica Pakamuros*, vol. 10, no. 4, pp. 1–9, 2022. [Online]. Available: <https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/196>
- [17] M. A. Khan, R. Khan, T. M. Al-Zghoul, A. Khan, A. Hussain, A. O. Baarimah, and M. A. Arshad, "Optimizing municipal solid waste management in urban Peshawar: a linear mathematical modeling and GIS approach for efficiency and sustainability," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100704, 2024, doi: 10.1016/j.csee.2024.100704.
- [18] A. Torres Sánchez, "Innovaciones tecnológicas en la gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina," *Revista de Medio Ambiente y Desarrollo*, vol. 18, no. 2, pp. 45–60, 2021. [Online]. Available: <https://revmedamb.org/article/view/1123>
- [19] M. Ghahramani, M. Zhou, A. Mölter, and F. Pilla, "Using artificial intelligence and IoT for constructing a smart trash bin," *arXiv preprint*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2208.07247>
- [20] A. A. Iskandar Shah, "IoT-based smart waste monitoring system," Tesis de grado, Universiti Teknologi MARA, 2020. [Online]. Available: <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/32017/>
- [21] A. Burduk, D. Łapczyńska, J. Kochańska, K. Musiał, D. Więcek, and I. Kuric, "Waste management with the use of heuristic algorithms and internet of things technology," *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8786, 2022, doi: 10.3390/s22228786.
- [22] J. Han, J. Zhang, H. Guo, and N. Zhang, "Optimizing location-routing and demand allocation in the household waste collection system using a branch-and-price algorithm," *European Journal of Operational Research*, vol. 316, pp. 958–975, 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2024.02.029.
- [23] B. Ali, M. A. Javed, A. A. Alharbi, S. Alotaibi, and M. Alkhatami, "Internet of things-assisted vehicle route optimization for municipal solid waste collection," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 1, p. 287, 2023, doi: 10.3390/app14010287.
- [24] A. Henaïen, H. Ben Elhadj, and L. Chaari Fourati, "A sustainable smart IoT-based solid waste management system," *Future Generation Computer Systems*, vol. 157, pp. 587–602, 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.03.056.
- [25] P. Zoumpoulis, A. L. Benitez, J. M. Delgado, and M. O. Tapia, "Smart bins for enhanced resource recovery in smart cities," *Cities*, vol. 144, p. 105150, 2024.
- [26] A. Addas, M. N. Khan, and F. Naseer, "Waste management 2.0 leveraging internet of things for an efficient and eco-friendly smart city solution," *PLOS ONE*, vol. 19, no. 7, e0307608, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0307608.
- [27] Q. Liu, Y. Chen, W. Hu, J. Dong, B. Sun, and H. Cheng, "Underground logistics network design for large-scale municipal solid waste collection: a case study of Nanjing, China," *Sustainability*, vol. 15, no. 23, p. 16392, 2023, doi: 10.3390/su152316392.
- [28] X. Xu and Y. Yang, "Municipal hazardous waste management with reverse logistics exploration," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1123–1137, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.230.
- [29] A. Shafique, B. Mayanti, P. Helo, A. Lobov, and I. F. Ituarte, "Smart textile waste collection system – dynamic route optimization with IoT," *Journal of Environmental Management*, vol. 335, p. 117548, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117548.
- [30] S. Kako, R. Muroya, D. Matsuoka, and A. Isobe, "Quantification of litter in cities using a smartphone application and citizen science in conjunction with deep learning-based image processing," *Waste Management*, vol. 186, pp. 271–279, 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.06.026.
- [31] M. P. Arthur, S. Shoba, and A. Pandey, "A survey of smart dustbin systems using the IoT and deep learning," *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, no. 3, p. 56, 2024, doi: 10.1007/s10462-023-10646-6.
- [32] P. Kumar and A. Kumar, "Quantifying reliability indices of garbage data collection IoT-based sensor systems using Markov birth-death process," *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 8, no. 6, pp. 1255–1274, 2023, doi: 10.33889/IJMEMS.2023.8.6.070.
- [33] F. Colmenero-Fonseca, A. Salas-Montoya, A. Preciado, J. F. Palomino-Bernal, and J. Carcel-Carrasco, "Case study on the application of new technologies for construction waste management in a historic building in Jalisco, Mexico," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, p. 8503217, 2024, doi: 10.1155/2024/8503217.
- [34] I. Sosunova and J. Porras, "IoT-enabled smart waste management systems for smart cities: a systematic review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 73326–73363, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3188308.
- [35] J. K. Solano Meza, D. Orjuela Yepes, J. Rodrigo-Illari, and M. E. Rodrigo-Clavero, "Comparative analysis of machine learning techniques for municipal solid waste prediction in megacities," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 5, p. 4256, 2023, doi: 10.3390/ijerph20054256.
- [36] M. J. N. Gomes, A. W. C. Palhano, and E. C. R. Reis, "Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil," *Waste Management and Research*, vol. 41, no. 1, pp. 214–221, 2023, doi: 10.1177/0734242X221104366.
- [37] Z. Azmin Shompa and H. Mohd Mohadis, "Designing persuasive sustainable waste management application for urban community in Malaysia: understanding end-user perspectives," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 47–65, 2025, doi: 10.37934/ARASET.50.1.4765.
- [38] T. Huang, S. Kou, D. Liu, D. Li, and F. Xing, "A BIM-GIS-IoT-based system for excavated soil recycling," *Buildings*, vol. 12, no. 4, p. 457, 2022.
- [39] M. M. Rahman, M. R. Islam, and K. A. Bakar, "IoT-enabled intelligent garbage management system for smart city: a fairness perspective," *Sensors*, vol. 24, no. 1, p. 150, 2024, doi: 10.3390/s24010150.

- [40] A. Martikkala, B. Mayanti, P. Helo, A. Lobov, and I. F. Ituarte, "Smart textile waste collection system – dynamic route optimization with IoT," *Journal of Environmental Management*, vol. 335, p. 117548, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117548.
- [41] M. Farjana, A. B. Fahad, S. E. Alam, and M. M. Islam, "An IoT- and cloud-based e-waste management system for resource reclamation with a data-driven decision-making process," *IoT*, vol. 4, no. 3, pp. 202–220, 2023.
- [42] S. Khan, B. Ali, A. A. K. Alharbi, S. Alotaibi, and M. Alkhathami, "Efficient IoT-assisted waste collection for urban smart cities," *Sensors*, vol. 24, p. 3167, 2024, doi: 10.3390/s24103167.