

EVALUACIÓN DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON APOYO DE DISPOSITIVOS DE RASTREO SATELITAL: ANÁLISIS E IMPLICACIONES

Eduardo BETANZO-QUEZADA^{1*}, Miguel Ángel TORRES-GURROLA¹,
José Antonio ROMERO-NAVARRETE² y Saúl Antonio OBREGÓN-BIOSCA¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas s/n, Colonia Las Campanas, Querétaro, México, C.P. 76010

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río, Río Moctezuma 249, San Juan del Río, Querétaro, México, C.P. 76800

*Autor para correspondencia: betanzoe@uaq.mx

(Recibido marzo 2015; aceptado noviembre 2015)

Palabras clave: basura, logística urbana, transporte

RESUMEN

La gestión de residuos sólidos urbanos es una tarea compleja que tiene implicaciones sociales, económicas, tecnológicas y ambientales para la sociedad y para las administraciones locales. La fase de recolección domiciliaria llega a representar entre el 70 y el 85 % de los costos totales de la gestión de los residuos sólidos, por lo que es un aspecto crítico dentro de la prestación del servicio. El objetivo de este estudio es analizar el sistema de recolección domiciliaria en el municipio de Santiago de Querétaro, México, con base en datos de recorridos reales obtenidos con dispositivos de geoposicionamiento global. Mediante un trabajo conjunto con autoridades vinculadas, se instrumentaron los camiones recolectores de basura y se monitorearon 71 rutas en operación. Se emplearon los métodos propuestos por la Secretaría de Desarrollo Social de México para evaluar los principales parámetros operativos y determinar el nivel de eficiencia de las rutas actuales. Los resultados muestran las ventajas de utilizar un equipo tecnológico de bajo costo y la importancia de incorporar la tecnología para sustentar cambios en áreas de costo críticas para fines de planeación, operación y control de un sistema clave en la preservación del ambiente.

Key words: waste, urban logistics, transport

ABSTRACT

The management of solid waste is a complex task for public authorities due to its social, economic, technological and environmental implications. Waste collection represents between 70 and 85 % of the total costs of managing solid waste, so it is a critical aspect of the service. The aim of this study is to assess the waste collection system in the municipality of Santiago de Querétaro, Mexico, based on GPS data. A fleet of garbage trucks was monitored, covering 71 waste collection routes. We used a conceptual route of methods proposed by the Ministry of Social Development (Secretaría de Desarrollo Social) of Mexico to assess the main operating parameters, determining the level of efficiency of the existing collection routes. The results show the advantages of using low-cost technological equipment in the planning and controlling of the solid waste collection systems, that play a key role in the environmental protection.

INTRODUCCIÓN

Parece haber un consenso en la comunidad científica relacionado con las crecientes preocupaciones por los problemas ambientales que genera la producción de residuos sólidos urbanos (OPS 1991, Fernández y Sánchez 2007, OCDE 2007, Calva y Rojas 2014). Estos últimos se han incrementado a nivel global como resultado del aumento de la población, cambios en el estilo de vida, perfiles de consumo, edad de integrantes de las familias, así como por tendencias industriales y comerciales que promueven el consumo de una mayor cantidad de productos manufacturados (OECD 2004).

Datos de la Secretaría de Desarrollo Social de México (SEDESOL) revelan que la generación de basura se habría incrementado a 0.90 kg/hab/día en 2004, con una proyección estimada de 1.06 kg/hab/día al año 2020 (SEDESOL 2001a), lo que muestra la magnitud del riesgo potencial que representa la generación de basura en el país. La generación de residuos sólidos urbanos per cápita es un indicador para el desarrollo sustentable aceptado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la Comisión de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas (UNCSD) y la Unión Europea (SEMARNAT 2011).

La gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) es un tema sensible para la sociedad en la medida que representa un servicio indispensable para la población dadas sus repercusiones en la salud pública, pero a la vez es considerado un objeto de rechazo. En el caso de los rellenos sanitarios o de las unidades de transferencia, estos sitios son percibidos por la población como infraestructura poco aceptada (Corona 2013).

En México, algunos antecedentes donde se plasma la importancia de la gestión de los residuos sólidos municipales datan del año 1985, cuando se elaboró un estudio sobre el estado en curso del manejo y disposición final de los residuos sólidos (INE 1985). Posterior a ese documento se publicó el Manual Técnico sobre Generación, Recolección y Transferencia de Residuos Sólidos (SEDESOL 2001a), en paralelo con el manual Técnico-Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal (SEDESOL 2001b). Sin embargo, a pesar de la existencia de un estricto marco normativo que el Gobierno Federal de México ha establecido (SEMARNAT 2003), de manuales de referencia (OPS 1991, SEMARNAT 2001, SEMARNAT 2004) y diagnósticos (Acurio 1997, CMIA 2003, INE-SEMARNAT 2006), siguen existiendo lastres en la parte institucional, derivados

de la insuficiencia de recursos económicos y técnicos que afectan la planeación, la operación y el control de los servicios de recolección.

La justificación de tipo ambiental de este trabajo tiene que ver con la importancia de un adecuado sistema de recolección, ya que un incremento en su eficiencia supone grandes efectos sobre el éxito en el manejo integral en su conjunto (OCDE 2014). Por ejemplo, se estima que dentro de la operación de las rutas de recolección, el mayor desperdicio de combustible se lleva a cabo mientras los camiones dan vueltas a la colonia a muy baja velocidad, lo cual también está asociado con la producción de mayores emisiones de gases contaminantes, ruido y congestión del tránsito vehicular (McLeod y Cherrett 2008).

Por la parte económica, la gestión integral de los RSU constituye un servicio público que necesita recursos económicos para cubrir la adquisición de vehículos especializados, la operación de la flota (combustibles y mantenimiento), así como los salarios del personal involucrado, buscando el mínimo costo (SEDESOL 2001a). Estimaciones en países de la OCDE ubican el costo de la recolección entre el 40 y el 80 % del costo total del servicio (OECD 2004). Por su parte, en INE-SEMARNAT (2006) se indica que los costos de recolección en las ciudades medias mexicanas varían de 30 a 640 \$/ton, en función de la densidad poblacional, la cantidad recolectada y la eficiencia en el llenado del vehículo, el estado físico de éstos y el diseño de las rutas.

Finalmente, la justificación de tipo científico y tecnológico radica en la evolución de las teorías aplicables al problema de la optimización de las rutas de recolección, junto con el acelerado desarrollo de la electrónica y de los dispositivos electrónicos de bajo costo, como los sistemas de geoposicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés), que en conjunto han dado origen a una serie de aplicaciones cuyo propósito fundamental es hacer más eficiente la fase de recolección y transferencia de la basura.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el sistema de recolección de RSU en el Municipio de Querétaro, México, a partir de datos reales obtenidos mediante el monitoreo de los vehículos con dispositivos GPS. Los cuadros y flechas resaltadas en la **figura 1** indican las etapas del manejo físico de la basura seguidas en esta investigación. La evaluación consistió en determinar la variación de los recorridos planeados contra los reales, bajo las condiciones prevalecientes de operación y sus costos asociados. Se excluyeron del análisis, los residuos sólidos municipales de tipo industrial o comercial.

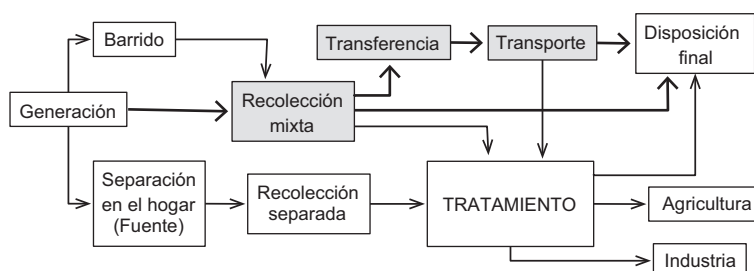


Fig. 1. Flujo de los residuos en un sistema de aseo urbano.
Fuente: tomado de INE-SEMARNAT (2006), con modificaciones propias

MARCO DE REFERENCIA

En México, en la década de los años 80, se realizaron esfuerzos encausados al desarrollo de modelos matemáticos para el diseño de rutas de recolección de basura a través de una computadora (INE 1984). Para una revisión reciente sobre las teorías y métodos de establecimiento de rutas aplicados a la optimización de la recolección de basura se puede consultar a Mes *et al.* (2014) y McLeod y Cherrett (2008). Para el análisis teórico de las rutas dinámicas a Anagnostopoulos y Zaslavsky (2014) y Anghinolfi *et al.* (2013). De igual forma, se reporta en algunos países una tendencia hacia la aplicación de herramientas de captura electrónica de datos, tanto en el transporte urbano de carga de tipo comercial (Chase *et al.* 2013), como para la recolección de basura. Lo anterior muestra que las investigaciones en este tema se están orientando hacia la aplicación de tecnologías para la gestión de las operaciones, con un enfoque pragmático usado para la solución de este tipo de problemas (Heiko y Karrer 2005).

Respecto a lo anterior, se muestra la aplicación de un sistema GPS para subsanar las deficiencias en la operación, producidas por la pérdida de tiempo en una unidad de transferencia en la Ciudad de Hamilton (Ontario, Canadá), debido a la afluencia simultánea de un gran número de camiones recolectores (Wilson y Vincent 2008). Para otras aplicaciones en ciudades donde se busca cambiar de rutas fijas planeadas en función de pronósticos o datos históricos a rutas dinámicas ajustando las capacidades y recursos a las condiciones de demanda real, se han ideado distintos métodos con apoyo de dispositivos electrónicos tipo de identificación de radio frecuencia (RFID, por sus siglas en inglés), paquete general de servicio de radio (GPRS, por sus siglas en inglés), GPS junto con

herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y de procesamiento de imágenes (Hannan *et al.* (2011). Uno de esos métodos, reportado por Mes *et al.* (2014), se basa en sensores en contenedores que alertan sobre su nivel de llenado y establecen la secuencia de recolección en las calles. Se observa entonces que un sistema de recolección que contemple responder a las demandas reales podría contribuir a la reducción del número de vehículos y de las distancias recorridas, lo que supone disminuir costos operativos. Por los ejemplos encontrados, se observa que el uso de tales tecnologías podría coadyuvar a la reducción de las emisiones directas producidas por los camiones recolectores y de las indirectas resultantes de la congestión del tránsito vehicular (McLeod y Cherrett 2008).

En lo que respecta a la revisión de casos en el contexto mexicano, se observa que aunque la aplicación de dispositivos GPS (**Cuadro I**) no es nueva, no hay evidencias técnicas documentadas de los resultados alcanzados, pues la información de acceso público que se tiene disponible sólo permite presentar un panorama del por qué las administraciones municipales optaron por implementar esa tecnología sin dar a conocer los resultados o impactos reales.

Aunque las rutas fijas obligan a los choferes a seguir el mismo camino en los días programados, las administraciones municipales reportan diversos problemas de cumplimiento del servicio (**Cuadro I**). Por otro lado, la recolección de materiales reciclables o valorizables es un tema de gran complejidad dentro de las administraciones municipales (Ramos *et al.* 2013), siendo un aspecto importante a considerar al analizar el factor densidad o peso volumétrico de la basura¹, que determina la velocidad con la que se llenan los camiones durante la ruta.

¹ Densidad de la basura o peso volumétrico. Es la relación entre el peso y el volumen ocupado. La basura tiene una densidad, dependiendo del estado de compresión. Como referencia pueden ser adoptados los siguientes valores: densidad en recipiente de basura $D_r = 150 - 300 \text{ kg/m}^3$, densidad en vehículo recolector $D_v = 250 - 500 \text{ kg/m}^3$, densidad en relleno sanitario manual $D_{rsm} = 400 - 600 \text{ kg/m}^3$ y densidad en relleno sanitario mecanizado $D_{rsm} = 700 - 800 \text{ kg/m}^3$ (SEDESOL 2001b).

CUADRO I. RESUMEN DEL USO DE SISTEMAS DE GEOPOSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) AL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE BASURA EN CIUDADES MEXICANAS

Lugar	Nota	Fecha	Fuente	Liga
Guadalajara, Jal.	“Prometen GPS en camiones de basura”	1 Ene. 2009	El Informador	http://limpiemoselsalto.blogspot.mx/2009/01/prometen-gps-en-camiones-de-basura.html
Tijuana, B.C.	“Municipio compra GPS para camiones de basura”	19 Dic. 2012	El Sol de Tijuana	http://www.oem.com.mx/elsoldetijuana/notas/n2813202.htm
Tijuana, B.C.	“Ayuntamiento coloca GPS en obsoletos camiones de basura”	5 Oct. 2013	www.zetatijuana.com	http://zetatijuana.com/2013/10/05/ayuntamiento-coloca-gps-en-obsoletos-camiones-de-basura/
Cajeme, Son.	“Eficientan recolección de basura con GPS en unidades”	19 Mar. 2010	elregionaldesonora	http://www.elregionaldesonora.com.mx/noticia/6632
Cajeme, Son.	“Contarán con GPS camión recolector de basura”	10 Sep. 2011	correorevista.com	http://correorevista.com/sur/contaran-con-gps-camion-recolector-de-basura/
Ciudad Madero, Tamps.	“Contaran con GPS camión recolector de basura”	15 Sep. 2011	Panucoaldia diariodebate	http://panucoaldia.diariodebate.info/index.php/2011/09/di16019-vigilaran-con-gps-a-camiones-recolectores-de-basura/
Matamoros, Tamps.	“Instalarán GPS a camiones de basura de Matamoros”	4 May. 2012	Grupo mi radio	http://www.grupomiradio.mx/portal/?p=55330
Aguascalientes, Ags.	“Controlará GPS rutas de basura”	8 Ago. 2013	Periódico am	http://www.am.com.mx/aguascalientes/local/controlara-gps-rutas-de-basura-37716.html
Guanajuato, Gto.	“Monitorean con GPS camiones de la basura”	7 Ene. 2014	El Sol de León	http://www.oem.com.mx/elsoldeleon/notas/n3248180.htm
Ciudad Juárez, Chih.	“Podrán incluir GPS para eficientar levantamiento de basura”	21 Feb. 2014	Noticias de Chihuahua	http://www.larednoticias.com/noticias.cfm?n=126150
Culiacán, Sin.	“Rastreo GPS para la Gestión de Residuos”	2014	GPS América	http://www.gpsamerica.com.mx/cms/index.php/en/mercados/gobierno/recoleccion-de-basura

MATERIALES Y MÉTODOS

Breve descripción del estudio de caso

El caso de Querétaro contrasta favorablemente con la realidad del país, pues pocos municipios en México tienen servicios de recolección de residuos sólidos como parte de sus planes de desarrollo, mejora urbana o programas de salud pública (Buenrostro y Bocco 2003) y cuenta con una Ley de prevención y gestión integral de residuos (GEQ 2003). En el contexto nacional, la ciudad de Querétaro es un caso atípico ya que es reconocida por su limpieza, habiendo ganado reconocimientos internacionales (Quino 2014). En ese sentido, el municipio de Querétaro recibió el premio a la Escoba de Platino 2014 por la limpieza de sus calles, dentro del Concurso Escobas de Plata, Oro y Platino 2014, organizado por la Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente (ATEGRUS).

En el último censo general de población, el municipio de Santiago de Querétaro contabilizó una población de 801 940 habitantes (INEGI 2010), con una tasa de crecimiento promedio anual del 2.74 %, lo cual supone una presión sobre sus servicios públicos, particularmente para la recolección de RSU. Datos proporcionados por la Secretaría de Servicios Públicos Municipales (GMQ 2014) indican que en 2010, el sistema de recolección de basura domiciliaria tuvo una cobertura del 93.31 %, la cual puede ser calificada como buena si se compara con parámetros internacionales. Por ejemplo, en El Gran Santiago de Chile, el 99.1 % de la población urbana tiene un servicio regular de recolección de residuos sólidos municipales y el 95.4 % tiene una frecuencia de servicio de recolección de por lo menos una vez por semana (CONAMA 1999). Según datos del municipio de Querétaro (GMQ 2005), el costo de la recolección de basura transportada en el año 2004 fue de 604.24 \$/ton, mientras que los costos de la recolección más los de transporte y transferencia hasta el relleno sanitario contabilizaron las tres cuartas partes del costo de la prestación del servicio.

En 2010, el sistema recolectó 785 ton/día, sumando recorridos de 4917 km diarios (GMQ 2014). Sin embargo, se estima que la producción de basura en el año 2014 ya alcanza las 1000 ton diarias. En un contexto general, el municipio de Querétaro está integrado por siete delegaciones políticas, las cuales se agrupan en tres zonas de servicio de recolección. Cada zona de servicio se caracteriza por tener un patio de resguardo de camiones. En total se operan 71 rutas que son



Fig. 2. Camión recolector de carga trasera
Fuente: El Universal Querétaro (26 feb 2013)

atendidas por 91 vehículos de los cuales 81 son de compactación trasera (tipo “castor”) (**Fig. 2**), seis tractocamiones con semiremolque y cuatro camiones tipo chasis cabina. A este servicio público están asignados 348 trabajadores de campo, de los cuales 97 son choferes y 235 peones.

Selección del equipo

Se realizó una evaluación técnica y económica de los equipos disponibles en el mercado para seleccionar un GPS portátil en función de las siguientes características: portabilidad (sin instalación eléctrica o electrónica en los vehículos), confiabilidad, versatilidad, autonomía, desempeño y costo. Se pudo contar con un lote de 15 dispositivos GPS portátiles para trabajo pesado (**Fig. 3a y 3b**), cuyo precio aproximado antes de la importación fue de 139 dólares norteamericanos. La interface para el procesamiento de datos se realizó mediante el paquete Past-Track versión 9.4.1.0.

Las principales ventajas de los equipos utilizados se refieren a: i) la facilidad de colocación sobre los vehículos y la confiabilidad necesaria para ser manipulados por personal no experto, ii) el diseño para operar en condiciones climáticas adversas, iii) su idoneidad para realizar monitoreos experimentales, pues no requieren cableado o instalación alguna que los sujete de manera temporal o permanente a los vehículos, iv) su portabilidad, pues es posible colocarlos en distintos vehículos de manera alternada, hasta cubrir todas las rutas o servicios del sistema de recolección y v) el bajo costo de adquisición. No obstante, las principales desventajas de los equipos son: i) su autonomía limitada de funcionamiento en campo, que depende de la capacidad de las baterías

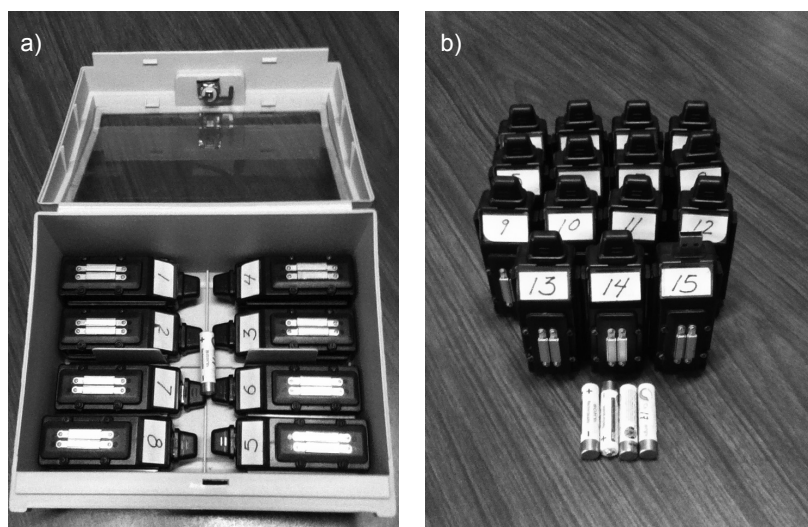


Fig. 3. Equipo del sistema de geoposicionamiento global (GPS) empleado. a) Lote de dispositivos y b) Tamaño de los dispositivos (las baterías como escala).
Fuente: elaboración propia

instaladas, ii) la necesidad de descargar los datos capturados de manera periódica antes de llegar al límite de capacidad de memoria del dispositivo y iii) que no permiten la comunicación en tiempo real, por lo que la información sobre los recorridos se obtiene una vez concluida la ruta. La relación ventajas/desventajas hizo de estos equipos los ideales para llevar a cabo la investigación.

En cuanto a los métodos de diseño de rutas, se empleó el Manual Técnico sobre Generación, Recolección y Transferencia de Residuos Sólidos (SEDESOL 2001a), el cual también fue usado por el Municipio de Querétaro para definir en 2006 el actual sistema de recolección a base de microrutas. El método de diseño de rutas emplea los parámetros contenidos en la ecuación 1:

$$L = \frac{P}{d} = \frac{T(r)}{60} = \frac{a(T)r}{60} \quad (1)$$

Donde:

L = Longitud del recorrido del camión en un turno (km).

P = Población de la zona que atenderá un vehículo en cada turno (hab).

d = Densidad de población (hab/km).

r = Velocidad de avance del vehículo durante la recolección, considerada como una constante en los países latinoamericanos (entre 1.5 y 1.9 km/h).

a = Proporción de distancia productiva en relación a la distancia total, obtenida mediante los traslados externos y los recorridos de recolección.

T = Tiempo disponible para la recolección (min).

La ecuación 1 se fundamenta en el equilibrio entre los recorridos productivos e improductivos (internos y externos a las rutas), de tal suerte que la condición ideal resulta en la igualdad representada por la ecuación 2:

$$\frac{P}{d} = \frac{a(T)r}{60} \quad (2)$$

Por ello, el diseño más apropiado de las rutas consiste principalmente en aumentar los valores del parámetro “a”, es decir, aumentar las distancias productivas tanto como sea posible, mientras se reducen las distancias improductivas, tomando como restricción el tiempo total de la jornada de trabajo:

$$\frac{P}{d} > \frac{a(T)r}{60} \quad (3)$$

Según estos métodos, en la ecuación 4 la jornada no es suficiente para completar el ciclo y deberá hacerse un ajuste de tal manera que los recorridos tiendan a la igualdad, como en la ecuación 1:

$$\frac{P}{d} < \frac{a(T)r}{60} \quad (4)$$

El equipo de investigación también elaboró protocolos operativos y formatos para la custodia y entrega/recepción de los dispositivos. Los GPS portátiles se instalaron sobre el tablero del camión recolector (**Fig. 4**) de acuerdo con la recomendación del fabricante, para asegurar la mejor recepción de la señal satelital con intervalos de lectura de un segundo.

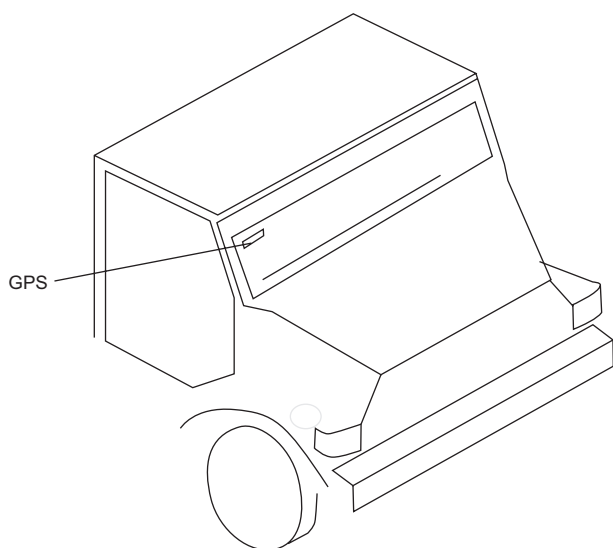


Fig. 4. Diagrama de ubicación de los sistemas de geoposicionamiento global (GPS).
Fuente: elaboración propia

Procedimientos

Para la calibración de equipo GPS, se probó la duración de las baterías con los dispositivos en funcionamiento y se encontró que la confiabilidad es de 48 h de trabajo continuo con ciclos de recarga de 8 h. Para la descarga de datos grabados por el GPS, se estructuró un sistema de almacenaje de archivos con una nomenclatura basada en las tres letras iniciales de cada delegación política, seguida del número de ruta y las fechas de los recorridos. Como apoyo para generar planos comparativos entre las rutas planeadas y las reales, se contó con planos del recorrido calculado en gabinete por el municipio.

Operación en campo y procesamiento

Para la entrega de los dispositivos rotulados por ruta y con el 100 % de carga en las baterías, se usó una bolsa transparente sellada con una etiqueta indicando

los días programados para los recorridos, así como el día y horario en el que habrían de regresarse para la recuperación de datos. Una vez recuperados los dispositivos y dadas las condiciones de operación de los camiones, se consideró necesaria su desinfección como una tarea de rutina. El último paso consistió en generar un reporte para cada una de las 71 rutas monitoreadas.

CUADRO II. RUTAS MONITOREADAS EN EL MUNICIPIO DE QUERÉTARO

Zona	Delegación	Rutas
I	Centro Histórico	12
	Epigmenio González Flores	12
II	Josefa Vergara y Hernández	10
	Villa Cayetano Rubio	3
	Felipe Carrillo Puerto	11
III	Félix Osoreo Sotomayor	16
	Santa Rosa Jáuregui	7
TOTAL		71

Fuente: elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cobertura del monitoreo de rutas

El periodo de monitoreo comprendió los meses de junio y julio de 2014. Se instalaron los dispositivos GPS a bordo de los camiones para monitorear las rutas en operación, hasta completar las 71 de las tres zonas de servicio para las siete delegaciones (**Cuadro II**). Los GPS portátiles se colocaron en 54 vehículos de los 81 existentes, en función de su rotación entre rutas, estado mecánico y disponibilidad por mantenimiento. En todos los casos el chofer de la unidad tuvo conocimiento de que sus recorridos serían monitoreados.

A manera de ejemplo, la **figura 5a** presenta un mapa con el recorrido total de una ruta de recolección,



Fig. 5. Mapas representativos de la Ruta 10 (municipio de Querétaro, México): a) Ruta completa, b) Zona de recolección.
Fuente: elaboración propia

CUADRO III. RESUMEN COMPARATIVO DE DISTANCIAS RECORRIDAS (DELEGACIÓN CENTRO HISTÓRICO)

Ruta	Longitud total ruta planeada (km)	Longitud total ruta con GPS (km)
1	72.20	146.60
2	56.40	148.30
3	59.10	162.30
4	61.32	184.70
5	51.61	129.80
6	53.96	131.50
7	43.36	120.40
8	48.70	165.60
9	52.43	46.10
10	58.64	103.59
11 AE	73.80*	73.80
12	65.85	79.00
Total	697.27	1491.69

AE = clave asignada por el Municipio de Querétaro, (*) = distancia recorrida registrada con el sistema de geoposicionamiento global (GPS)

Fuente: elaboración propia

mientras que la **figura 5b** ilustra la parte central. Se usó el programa Google Earth como interface gráfica.

Se compararon los datos obtenidos del GPS con los generados en campo a partir de los recorridos planeados en gabinete por el municipio. A manera de

ejemplo, en el **cuadro III** se muestra la comparación de las distancias de recorrido de las rutas planeadas contra las 12 rutas monitoreadas en la delegación Centro Histórico, se puede observar la diferencia en los recorridos reales que suman 1491.69 km.

Diseño de un tablero de control

El reporte que generan los GPS contiene entre otros datos las horas de inicio y terminación de los recorridos, las velocidades de recorrido y las distancias parciales y totales. Para visualizar y sistematizar esa información se diseñó un tablero de control (**Fig. 6**) para cada una de las 71 rutas. Dicho tablero proporcionó datos precisos de las distintas fases del ciclo operativo, desde la salida del camión del corralón para su traslado a la zona de recolección, el traslado a la unidad de transferencia o en algunos casos al relleno sanitario para descargas directas, y los regresos de los camiones a las zonas de recolección o al corralón correspondiente.

Ese tablero es una parte central en el monitoreo de las rutas, porque a partir de la información procesada en una hoja de cálculo se generaron los principales parámetros que requiere la aplicación de los métodos de SEDESOL. De esa forma, el monitoreo permitió detectar cada uno de los movimientos que realizan los camiones durante sus ciclos operativos. En función de esas secuencias operativas se detectó que ninguna de las rutas monitoreadas completó el

Análisis de Ruta 1, Centro Histórico

Lugar	Hora inicial	Hora final	Duración H:M:S	Recorrido (km)	
Corralón	9:45:58 p.m.	9:48:40 p.m.	00:02:42	3.60	SC
Traslado	9:48:40 p.m.	10:16:00 p.m.	00:27:20	1079	SC
Ruta	10:16:00 p.m.	12:07:00 a.m.	01:46:29	11.40	CC
Traslado	12:07:00 a.m.	12:36:42 a.m.	00:29:42	28.21	CC
Relleno S.	12:36:42 a.m.	12:38:19 a.m.	00:01:37	2.00	CC
Traslado	12:38:19 a.m.	1:08:05 a.m.	00:29:46	22.70	SC
Ruta	1:08:05 a.m.	3:40:35 a.m.	02:32:30	20.80	CC
Traslado	3:40:35 a.m.	4:12:02 a.m.	00:31:27	25.90	CC
Relleno S.	4:12:02 a.m.	4:13:52 a.m.	00:01:50	2.00	CC
Traslado	4:13:52 a.m.	4:40:32 a.m.	00:26:40	18.90	SC
Corralón	4:40:32 a.m.	4:54:00 a.m.	00:13:28	0.30	SC

Jornada de trabajo 07:03:31 146.60

Datos:

Velocidad	(km/h)	Parámetro "a"	
Ruta	6.42		
Ruta	8.18		
Promedio	7.30		

	T (H:M:S)	D (km)
Traslados internos	4.63%	00:19:37 7.90
Traslados externos	34.22%	02:24:55 106.50
Traslados en ruta	61.15%	04:18:59 32.20

Descargas en relleno sanitario. SC=Sin carga CC=Con carga

Recorridos 9 y 10 de junio 2014

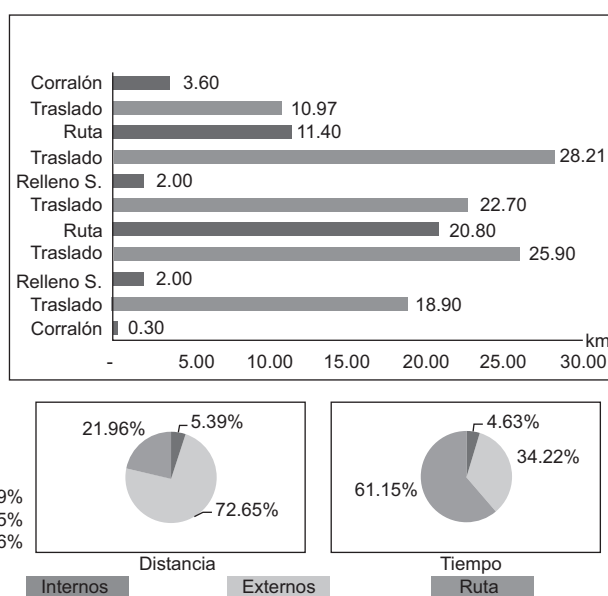


Fig. 6. Tablero de control para el monitoreo de las rutas de recolección (Ruta 1, delegación Centro Histórico).

Fuente: elaboración propia

CUADRO IV. DATOS OPERATIVOS RUTA 1 (DELEGACIÓN CENTRO HISTÓRICO)

Factor	Unidades	Ruta 1 tercer turno	Datos obtenidos con GPS-1
Superficie	km ²	2.15	-
Población	hab	24892	-
Densidad de población	hab/km ²	11599	-
Factor de generación (Fg)	kg/hab/día	0.65	-
Fg. por kilómetro	ton/km	0.8	-
Longitud de recolección (camión)	km	29.2	-
Longitud de alcance manual	km	0	-
Longitud de recolección (apoyos)	km	0	-
Longitud total de recolección	km	29.2	32.20
Longitud de traslados internos	km	7.2	7.90
Longitud de traslados externos	km	35.8	106.50
Número de compactaciones	n	120	-
Tiempo de recolección	h	2.61	4.32
Tiempo de compactación	h	0.78	-
Tiempo de traslados internos	h	0.18	0.33
Tiempo de traslados externos	h	0.9	2.42
Tiempo de descarga en unidad de transferencia	h	0.5	-
Longitud total de ruta	km	72.2	146.60
Tiempo total de ruta	h	4.97	7.06
Tonelaje total de ruta	ton	16.2	-
Tipo de camión	Compactador 14.5 m ³ , carga trasera		-
Kilometraje mensual	km	1841	-
Kilometraje anual	km	22092	-
Horas de trabajo mensual	h	179	-
Horas de trabajo anual	h	2148	-
Horario de mantenimiento	h	6:00 a 14:00	-
Días laborables	días	306	-
Días dobles y festivos	días	59	-
Tripulación	1 operador y 3 intendentes	SI	-

GPS-1 se refiere a la etiqueta que identifica al dispositivo del sistema de geoposicionamiento global (GPS) utilizado.

Fuente: elaboración propia

ciclo de servicio sin incurrir en interrupciones en ruta, ya sea para descargar parte de la basura en la unidad de transferencia, o bien para realizar esta maniobra en el relleno sanitario. Esa discontinuidad dio traslados improductivos con impacto en los costos de operación, consumo de combustible y emisiones contaminantes.

Medición del desempeño de rutas

Para explicar la forma en que se analizó el desempeño de las rutas se emplea el caso de la Ruta 1 de la delegación Centro Histórico, en su tercer turno de servicio, monitoreada el 9 y 10 de junio de 2014. La estructura del **cuadro IV** fue creada a partir de datos suministrados por el municipio y en negritas aparecen los datos de distancias y tiempos obtenidos con lecturas del GPS.

En el **cuadro V** y **figura 7** se encuentran los datos necesarios para determinar la variación de las rutas

respecto a lo planeado, con el uso de las ecuaciones (1) y (2) y del método de SEDESOL.

Uno de los principales aspectos a observar en la operación del sistema se refiere al rango de variación resultante de los recorridos reales respecto a un óptimo teórico (**Cuadro VI**). Cuando el tiempo de ejecución de una ruta es igual al tiempo planeado, la variación es de 0 % y ese caso corresponde a un valor teórico de 1 en la ecuación (2). Eso significa que las longitudes de recorrido y los volúmenes de basura recolectados por km son apropiados en función de la demanda.

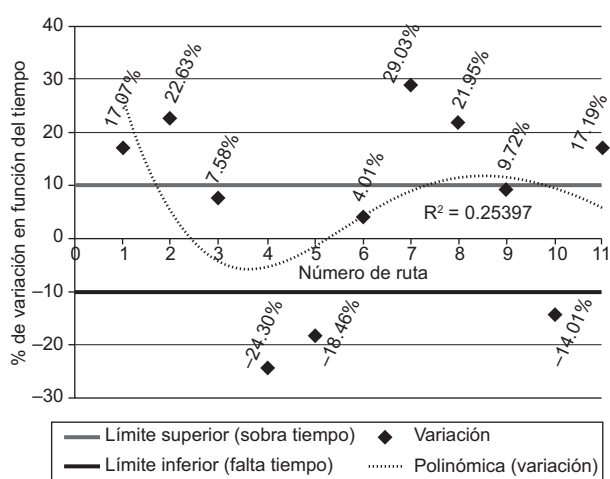
En el **cuadro VI** los valores de 17.07 % y 9.58 % son positivos y eso significa que sobró tiempo al ejecutar la ruta con la restricción de una jornada laboral de 8 h. Los resultados generados con ese procedimiento sirvieron para diseñar una gráfica en la que se estableció de manera convencional el rango deseable de variación del desempeño del servicio de

CUADRO V. DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA VARIACIÓN EN LA RUTA 1 (DELEGACIÓN CENTRO HISTÓRICO)

Variable	Descripción	Unidades	Ruta 1 tercer turno	Datos obtenidos con GPS-1
P =	Población de la zona que atenderá un vehículo en cada turno	habitantes	24 892	2892
G =	Producción de residuos sólidos	kg/hab/día	0.65	0.65
d =	Densidad de población	hab/km	1278.70	1159.57
a =	Proporción de distancia productiva en relación a la distancia total	-	0.65	0.62
T =	Tiempo disponible para la recolección	min	203.40	258.98
r =	Velocidad de avance del vehículo durante la recolección	km/h	7.30	7.30

GPS-1 se refiere a la etiqueta que identifica al dispositivo utilizado.

Fuente: elaboración propia

**Fig. 7.** Rango de variación del desempeño del servicio en la delegación Centro Histórico, con datos oficiales.

Fuente: elaboración propia

recolección. Las **figuras 7 y 8** corresponden a la delegación política Centro Histórico y muestran un rango de $\pm 10\%$ para los resultados del cálculo realizado con datos de gabinete y para las rutas monitoreadas con GPS, respectivamente.

De la comparación de las **figuras 7 y 8** se observa que las rutas planeadas presentan fuertes discrepancias respecto a las rutas reales, porque sus cálculos los alejan del óptimo teórico planteado por el método de SEDESOL. Paradójicamente, los recorridos reales presentan menos dispersión, aún cuando fueron mayores, lo cual supondría el esfuerzo de la administración municipal para cumplir con los niveles de calidad de servicio.

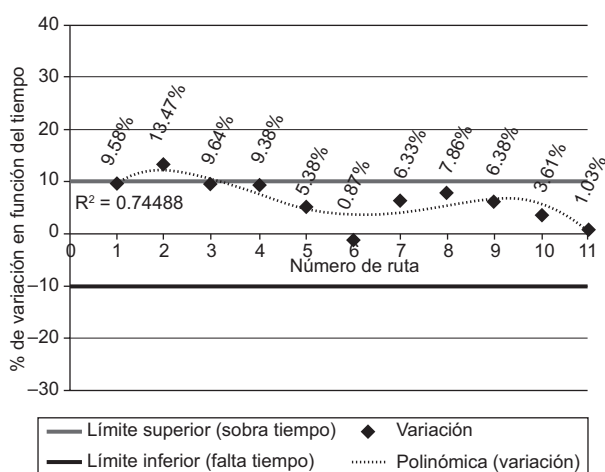
La utilidad de las gráficas anteriores consiste en detectar aquellas rutas que se encuentren fuera de un rango de servicio convencional establecido por la administración como punto de partida en un programa de mejora continua. En este caso, a partir de los datos de la **figura 8** se podrían realizar ajustes desde el punto de vista práctico en los parámetros de diseño

CUADRO VI. DETERMINACIÓN DEL RANGO DE VARIACIÓN EN EL DESEMPEÑO DE LA RUTA 1 (DELEGACIÓN CENTRO HISTÓRICO)

Formulación	Ruta 1 tercer turno	Datos obtenidos con GPS-1
Óptimo teórico	1	1
$P/d =$	19.47	21.47
$(a * T * r) / 60 =$	16.14	19.41
$P/d > (a * T * r) / 60 =$	0.82	0.90
$1 - (P/d > (a * T * r) / 60) =$	0.17	0.09
Rango de variación	17.07 %	9.58 %

P = Población de la zona que atenderá un vehículo en cada turno, G = Producción de residuos sólidos, d = Densidad de población, a = Proporción de distancia productiva en relación a la distancia total, T = Tiempo disponible para la recolección, r = Velocidad de avance del vehículo durante la recolección.

Fuente: elaboración propia

**Fig. 8.** Rango de variación del desempeño del servicio en la delegación Centro Histórico, con datos obtenidos de los sistemas de geoposicionamiento global (GPS).

Fuente: elaboración propia

CUADRO VII. REPORTE GENERAL DEL DESEMPEÑO POR DELEGACIÓN POLÍTICA (NÚMERO DE RUTAS)

Delegación política	Centro Histórico (CH)	Epigmenio González Flores (EGF)	Josefa Vergara y Hernández (JVH)	Villa Cayetano Rubio (VCR)	Felipe Carrillo Puerto (FCP)	Félix Osores Sotomayor (FOS)	Santa Rosa Jáuregui (SRJ)
Falta tiempo	3	1	5	1	7	6	8
Sobra tiempo	8	8	5	2	1	5	0
Sin datos	1	4	4	0	2	5	1

Fuente: Elaboración propia

de la ruta, al programar los recorridos hasta lograr el equilibrio de la ecuación (2). Como herramienta de detección, esas figuras puede resultar de utilidad para priorizar la intervención correctiva sobre aquellas rutas que se alejen del rango admisible (más del 10 % de variación), es decir, para aquellas donde es más necesario y oportuno acercarlas al óptimo teórico.

Por lo que se refiere a la variación de las rutas de recolección en todo el municipio, el **cuadro VII** contiene un resumen con las 71 rutas, agrupadas por delegación política.

Determinación de costos de operación

Un punto importante contemplado en la investigación se refirió al análisis de los costos de operación del sistema de recolección (salarios, combustibles, llantas, lubricantes, mantenimiento y reparación de vehículos). Desafortunadamente, la información no estuvo disponible, por lo que se recurrió a un método indirecto para estimar el costo de operación por km recorrido.

Para ello, se definió un vehículo tipo conformado por un chasis unitario de dos ejes marca International 4300, con motor Navistar DT 466, llantas 1100-20.00, con caja y compactador de basura trasero. Con base en el estudio de Arroyo *et al.* (2014) se empleó el programa VOCMEX Versión 4.0², considerando un tipo de terreno plano y una superficie de rodamiento con un índice internacional de rugosidad (IIR) de 4, obteniéndose un costo de operación de 9.71 \$/km para el año 2014. El sobre costo de operación mostrado en el **cuadro VIII** es la diferencia entre el costo esperado en una ruta planeada contra el de la operación real.

A partir de esa estimación indirecta y de carácter agregado, el sobre costo anual erogado por la administración municipal habría sido de \$8 210 058 pesos, equivalentes a 631 543 dólares (USD) a una tasa de cambio de 13 pesos por USD en el año 2014. Si bien

el cálculo se realizó con datos agregados, para análisis más específicos sería conveniente seleccionar una mezcla de tipos de terreno plano y en lomerío y un IIR más alto que refleje las condiciones de operación en pavimentos asfálticos, de concreto y de adoquín, característicos en muchas rutas y áreas urbanas.

DISCUSIÓN

Durante el periodo de monitoreo, el municipio de Querétaro experimentó un proceso de transición, caracterizado por dos situaciones importantes: i) la modernización de la actual unidad de transferencia (UT), tiempo durante el cual estuvo operando al 50 % de su capacidad y ii) un menor número de camiones para realizar las transferencias de basura de la UT al relleno sanitario, por razones de mantenimiento del equipo de transporte. Esas dos condicionantes hicieron que la administración tomara la decisión de mandar los camiones a descargar directamente al relleno sanitario, sin pasar por la unidad de transferencia. La influencia de ese ajuste (desconocido por el equipo de investigación), quedó revelada por los datos del monitoreo de campo, al interrogar a la administración sobre la posible causa de los excesivos recorridos en traslados externos a las zonas de recolección.

Sobre la confiabilidad de los resultados obtenidos

La constatación de la situación anterior revela la confiabilidad de las mediciones realizadas con dispositivos GPS, lo cual los convierte en un instrumento útil para detectar anomalías en el desempeño del sistema. A pesar de que los dispositivos GPS usados no son los más sofisticados que existen en el mercado, su funcionalidad permitió al grupo de investigación explotar al máximo sus capacidades técnicas y aplicar las formulaciones matemáticas

² Programa conformado con modelos de operación de vehículos, del Banco Mundial.

CUADRO VIII. SOBRE COSTO POR DELEGACIÓN

Delegación política	Distancias planeadas (km/día)	Costo esperado (\$/día)	Recorridos reales (km/día)	Costo calculado (\$/día)	Sobre costo (\$MX/día)
Centro Histórico	697.27	6 770.49	1491.69	14 484.31	7 713.82
Epigmenio González Flores	583.11	5 662.00	1390.20	13 498.84	7 836.84
Josefa Vergara y Hernández	737.72	7 163.26	1022.70	9 930.42	2 767.16
Villa Cayetano Rubio	100.34	974.30	173.7	1 686.63	712.33
Felipe Carrillo Puerto	600.07	5 826.68	637.2	6 187.21	360.53
Félix Osores Sotomayor	857.66	8 327.88	1094.30	10 625.65	2 297.77
Santa Rosa Jáuregui	563.71	5 473.62	646.6	6 278.49	804.86
TOTAL	4139.88	40 198.23	6456.39	62 691.55	22 493.31

\$MX = Pesos Mexicanos

Fuente: Elaboración propia

propuestas por el manual de la SEDESOL. Aún con las limitantes técnicas de los equipos, se puede afirmar que la administración municipal que cuente con equipos GPS de capacidades básicas puede cumplir con el objetivo de monitorear de manera confiable la operación de sus rutas, ya sea de forma aleatoria o periódica.

Sobre los parámetros empleados en el diseño de las rutas

Los resultados mostrados en la **figura 6** tienen interpretaciones adicionales al contexto operativo, en lo que se refiere a los datos sobre el peso volumétrico de la basura. Este es un parámetro esencial en el diseño de rutas de recolección de RSU y aunque dentro del manual de la SEDESOL sólo se considera el dato de la producción diaria per cápita (**Cuadro IV**), el factor densidad volumétrica no es integrado en el cálculo de las longitudes óptimas de recorrido.

Si bien es importante revisar a fondo los procedimientos que se utilizan para la planeación, operación y control de la recolección de RSU, por su impacto en los costos de prestación del servicio y en los costos al ambiente generados por emisiones contaminantes, la estrategia debe extenderse hacia la reducción de la producción de basura, a partir de sus características volumétricas. En este sentido, Pothimamaka (2008) es contundente al afirmar que la mejor práctica de gestión de residuos sólidos en los países desarrollados es la reducción de los residuos generados en la fuente.

Por lo tanto, la producción, almacenamiento, recolección, transporte y confinamiento de los RSU requieren de políticas públicas ligadas entre sí, como lo sugiere la OCDE (2013). No obstante, tal problema lleva a la par un aspecto cultural en cuanto a la concientización de la sociedad sobre la basura (Armijo de Vega *et al.* 2012), a los incentivos apropiados para reducir las cantidades que genera la población, así

como de las prácticas para implementar programas eficientes de separación y recuperación de material reciclable que aseguren que los residuos causen el menor impacto posible al medio.

Sobre los aspectos normativos y de planeación

En el caso de México, el crecimiento del fenómeno urbano induce severas presiones sobre los sistemas de manejo de RSU, de por sí rezagados en muchas de sus ciudades, que se caracterizan por experimentar procesos acelerados de crecimiento poblacional y de expansión urbana, los cuales se intenta detener a través de la política nacional de vivienda 2013-2018 (Presidencia de la República 2013). Es importante que el problema se aborde desde las más amplias perspectivas, como en el caso de algunas administraciones municipales que integran el tema de la recolección de basura dentro sus planes metropolitanos de transporte de mercancías (NYMTC 2001) y recomiendan su tratamiento desde esa perspectiva (Neto y Moreira 2012). En el caso de la Zona Metropolitana de Querétaro, los estudios sobre transporte urbano de carga realizados por Betanzo (2011) y Betanzo *et al.* (2013) recomiendan el tratamiento de la basura desde la perspectiva del transporte urbano de carga y con un alcance metropolitano.

CONCLUSIONES

Se realizó una investigación para monitorear las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de Querétaro (México), con el uso de dispositivos GPS a bordo de los camiones. Se demuestra la utilidad de estos dispositivos en cuanto a la confiabilidad de los resultados, aún cuando las lecturas se realizaron en un periodo de transición por los trabajos de mantenimiento en la unidad de

transferencia y en el equipo de transporte que lleva la basura al relleno sanitario.

La combinación entre los dispositivos GPS usados en la investigación y un adecuado sistema de procesamiento de datos, aportan una herramienta de bajo costo de gran utilidad para monitorear de manera aleatoria o periódica el sistema de recolección. Los métodos empleados permitieron determinar de manera objetiva la variación existente entre las rutas planeadas y la ejecución real, en función de un óptimo teórico y así estimar su impacto económico. De los resultados obtenidos a través de este estudio de caso se concluye que la oportunidad y confiabilidad de la información es crucial para transparentar el desempeño del sistema de recolección y ajustarlo de manera oportuna de acuerdo con las cambiantes necesidades de las ciudades.

Finalmente, se recomienda conducir estudios adicionales para determinar o actualizar las tasas estimadas de generación de basura per cápita, en la medida en que este parámetro es determinante en el diseño de las rutas de recolección, en lugar de utilizar datos agregados como los propuestos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. También se debe insistir en reconocer la importancia de los programas de separación de materiales reciclables, pues ello tiene implicaciones sobre la evolución del sistema de gestión integral de RSU.

AGRADECIMIENTOS

La investigación contó con el apoyo del Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACyT-Gobierno del estado de Querétaro (contrato FOMIX 2012-01-193364) y del Fondo para el Fortalecimiento de la Vinculación FoVinUAQ-2013 de la Universidad Autónoma de Querétaro. Se reconoce la apertura y amplias facilidades otorgadas por la Secretaría de Servicios Públicos Municipales del Municipio de Querétaro y se agradecen las valiosas observaciones de los revisores anónimos.

REFERENCIAS

- Acurio G., Rossin A., Teixeira P.F. y Zepeda F. (1997). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y El Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Panamericana. Washington, D.C., EUA, 130 pp.
- Armijo de Vega C., Puma A. y Ojeda S. (2012). El conocimiento de los habitantes de una ciudad mexicana sobre el problema de la basura. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 1, 27-35.
- Arroyo J., Aguerrebere R. y Torres G. (2014). Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica 407. Sanfandila, México, 89 pp.
- Anagnostopoulos T.V. y Zaslavsky A. (2014). Effective waste collection with shortest path semi-static and dynamic routing. En: *Internet of things, smart spaces, and next generation networks and systems* (S. Balandin, S. Andreev y Y. Koucheryavy, Eds.). Springer, Cham, Suiza, pp 95-105.
- Anghinolfi D., Paolucci M., Robba M. y Taramasso A. C. (2013). A dynamic optimization model for solid waste recycling. *Waste Manage.* 33, 287-296. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.10.006.
- Betanzo E. (2011). Una aproximación metodológica al estudio integrado del transporte urbano de carga: el caso de la Zona Metropolitana de Querétaro en México. *Eure* 112, 63-87.
- Betanzo E., Romero J.A. y Obregón S. (2013). Un referencial para evaluar la gestión pública en transporte urbano de carga. *Gestión y Política Pública.* 22, 313-354.
- Buenrostro O. y Bocco G. (2003). Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. *Resour. Conserv. Recy.* 39, 251-263.
- Calva C. y Rojas R. (2014). Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos urbanos en el municipio de Mexicali, México: Retos para el logro de una planeación sustentable. *Información Tecnológica* 25, 59-72. DOI: 10.4067/S0718-07642014000300009.
- Chase K., Anater P. y Phelan T. (2013). Freight demand modeling and data improvement. *transportation research board.* Washington, D.C., EUA, 90 pp.
- CMIA (2003). La basura en el limbo: Desempeño de gobiernos locales y participación privada en el manejo de residuos urbanos. Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental. Ciudad de México, México, 108 pp.
- CONAMA (1999). Política regional de residuos sólidos, región metropolitana. Comisión Nacional del Medioambiente, Región Metropolitana. Santiago de Chile, Chile, 38 pp.
- Corona J.I. (2013). Política pública en el manejo de los desechos sólidos municipales: el caso de Santiago de Querétaro. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Políticas. Universidad Autónoma de Querétaro, México, 112 pp.
- El Universal (2013). Adquieren 78 nuevas unidades. *El Universal Querétaro.* Febrero 26, 2013 - 3:24 [en línea]

- <http://m.eluniversalqueretaro.mx/metropoli/26-02-2013/adquieren-78-nuevas-unidades> 26/02/2013.
- Fernández A. y Sánchez M. (2007). Guía para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 152 pp.
- GEQ (2003). Ley de prevención y gestión integral de residuos del estado de Querétaro. Periódico Oficial del Estado “La Sombra de Arteaga”, Número 16, publicada el 20 de febrero 2003. Gobierno del Estado de Querétaro, Querétaro, México, 38 pp.
- GMQ (2005). Cuestionario de recopilación de información: Residuos sólidos municipales. Secretaría de Servicios Públicos Municipales, Departamento de Aseo Público. Gobierno del Municipio de Querétaro. Querétaro, México, 16 pp.
- GMQ (2014). Sistema de recolección domiciliar de residuos sólidos urbanos municipales. Dirección de Aseo y Alumbrado Público, Departamento de Logística y Planeación. Gobierno del Municipio de Querétaro. Querétaro, México, 10 pp.
- Hannan M.A., Arebey M., Begum R.A. y Basri H. (2011). Radio frequency identification (RFID) and communication technologies for solid waste bin and truck monitoring system. *Waste Manage.* 31, 2406-2413. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.07.022.
- Heiko A. y Karrer, R. (2005). Waste transport and logistics in urban areas. *Best Practice Handbook Year. Best Urban Freight Solution (BESTUFS)*. Zoetermeer, Holanda, 179 pp.
- INE (1984). Desarrollo de algoritmos para diseño de rutas de recolección con optimización en computadora a nivel nacional. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México, México, 46 pp.
- INE (1985). Estado actual del manejo y disposición final de los residuos sólidos (1a. Fase). Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México, México, 68 pp.
- INEGI (2010). México en cifras. [en línea] <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx> 13/05/2014
- INE-SEMARNAT (2006). Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México, 111 pp.
- McLeod F. y Cherrett T. (2008). Quantifying the transport impacts of domestic waste collection strategies. *Waste Manage.* 28, 2271-2278. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.041.
- Neto P. N. y Moreira T. A. (2012). Gestión de residuos sólidos en regiones metropolitanas: límites y oportunidades de los arreglos intermunicipales en el escenario brasileño. *Territorios* 27, 145-179.
- Mes M., Schutten M. y Pérez A. (2014). Inventory routing for dynamic waste collection. *Waste Manage.* 34, 1564-1576. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.05.011.
- NYMTC (2001). NYMTC Regional freight plan, task 2: Description of freight transportation system in the region. New York Metropolitan Transportation Council. Nueva York, EUA, 333 pp.
- OECD (2004). Addressing the economics of waste. Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia, 203 pp.
- OCDE (2007). Guidance manual for the implementation of the OECD recommendation C(2004)100 on Environmentally Sound Management (ESM) of waste. Organization for Economic Co-operation and Development. París, Francia, 69 pp.
- OCDE (2013). OECD's work on sustainable materials and waste management. Organisation for Co-operation and Development. París, Francia, 7 pp.
- OCDE (2014). Waste management services 2013, DAF/COMP(2013)26, Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Publications, París, Francia, 314 pp.
- OPS (1991). Guías para el desarrollo del sector de aseo urbano en Latinoamérica y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Washington, D.C., EUA, 51 pp.
- Pothimamaka J. (2008). Community learning process: a model of solid waste reduction and separation. *EnvironmentAsia* 2, 43-48. DOI: 10.14456/ea.2008.13.
- Presidencia de la República (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Gobierno de México. Ciudad de México, México, 184 pp.
- Quino A. (2014). Recibe Querétaro la escoba de platino en España. ADN informativo. Jueves, 12 junio 2014, 15:36 [en línea] <http://adninformativo.mx/recibe-queretaro-la-escoba-de-platino-en-espana/12/06/2014>.
- Ramos N., Castilhos Jr. A., Forcellini F. y Graciolli O. (2013). Profile survey of waste pickers in Brazil: requirements for the development of a collection vehicle and optimized routing. *JUEE* 7, 231-246. DOI: 10.4090/juee.2013.v7n2.231246
- SEDESOL (2001a). Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. Secretaría de Desarrollo Social, Gobierno de México. Distrito Federal, México, 139 pp.
- SEDESOL (2001b). Manual técnico-administrativo para el servicio de limpia municipal. Secretaría de Desarrollo Social, Gobierno de México. Distrito Federal, México, 114 pp.
- SEMARNAT (2011). Indicadores básicos del desempeño ambiental de México. Indicadores ambientales 2011. Residuos sólidos urbanos. [en línea]

- http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores_2011/conjuntob/04_res_solidos/04_res_solidos_presion.html 06/03/2012.
- SEMARNAT (2004). Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México. México. 57 pp.
- SEMARNAT (2003). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003, última reforma publicada 22 de mayo de 2015. Gobierno de México. Ciudad de México, México, 52 pp.
- SEMARNAT (2001). Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México. Ciudad de México, México, 210 pp.
- Vásquez Ó. (2011). Gestión de los residuos sólidos municipales en la ciudad del Gran Santiago de Chile: Desafíos y oportunidades. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27, 347-355.
- Wilson B. G. y Vincent J.K. (2008). Estimating waste transfer station delays using GPS. *Waste Manage.* 28, 1742-1750. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.020.