

LOGÍSTICA URBANA FERROVIARIA Y E-COMMERCE: ANÁLISIS DE COSTES EXTERNOS DEL MODELO M4G (METRO FOR GOODS)

Rafael Villa Martínez

Profesor Asociado. Universidad Camilo José Cela

Andrés Monzón de Cáceres

Catedrático Universidad. Universidad Politécnica de Madrid

ABSTRACT

Las ciudades están en el centro de la vida humana y están viviendo un intenso proceso de transformación en distintos ámbitos (económicos, sociales, medioambientales) donde la distribución urbana de mercancías aparece como uno de los grandes retos para el sector del transporte y la logística, afectando directamente a este proceso de transformación de la ciudad.

La aparición de la covid-19 ha tenido especial relevancia e impacto en la movilidad de la ciudad y en el comercio electrónico. El B2C, o negocio de empresa a consumidor, ha crecido notablemente en los últimos años y se ha acelerado a raíz de la pandemia, aumentando el acceso de la población a Internet y produciendo cambios en los hábitos de comportamiento de los consumidores. En las áreas metropolitanas, el “efecto Amazon” (amplia selección de minoristas online, envío rápido, devoluciones gratuitas y precios bajos) ha llevado a un mayor uso de vehículos ligeros en el reparto del comercio electrónico en las ciudades. Este hecho está afectando el funcionamiento racional del sistema de transporte urbano de mercancías, incluyendo un alto grado de fragmentación, baja optimización de carga y, entre otras externalidades, mayor congestión del tráfico.

Este artículo expone las principales soluciones sostenibles dentro del ámbito de la logística de la ciudad y pone el foco en los sistemas de transporte ferroviarios urbano como una posible solución a considerar. De forma práctica, investiga el potencial uso de la red de metro, en una gran ciudad como Madrid, para proporcionar servicios de entrega de paquetes de e-commerce aprovechando su actual capacidad de transporte disponible y utilizando las estaciones para la entrega de los paquetes. Se definen las características de un nuevo modelo de distribución mixto (M4G: Metro for Goods).

Los resultados muestran las externalidades sociales y los costes medioambientales derivados del nuevo modelo M4G son significativamente menores que los costes actuales de reparto a través de furgonetas.

1. INTRODUCCIÓN

La población urbana está en continuo crecimiento, el 55 % de las personas del mundo ya vive en ciudades y el porcentaje de urbanización crecerá hasta el 68 % en el año 2050 (Naciones Unidas, 2018), lo que trae consigo un aumento de la demanda de bienes y servicios concentrados principalmente en áreas urbanas, que a su vez presentan cada vez más restricciones de acceso. Este hecho, inevitablemente, está llevando a las ciudades de todo el mundo a enfrentarse a mayores desafíos en términos de transporte eficiente de personas y mercancías, al tiempo que tratan de minimizar sus impactos negativos en la calidad de vida de sus ciudadanos.

Este aumento de bienes y servicios tiene su máximo exponente en el comercio electrónico, donde el incremento de las compras online se espera que, en 2024, sea 5 veces superior al que se realizaba en 2014. El efecto pandemia ha obligado a muchos consumidores a buscar opciones de compra en los canales online, modificando sus hábitos de compra no solo durante el periodo de la covid-19, sino en el periodo pospandemia. En España, los sectores como los supermercados o la compra de electrodomésticos, en 2020, casi doblaron su facturación online respecto al tercer trimestre de 2019 (CNMC, 2020).

Más personas viviendo en las ciudades y más personas realizando transacciones online se traduce en mayor número de demanda de entregas en la ciudad, sobre todo tras la aparición del q-commerce (Delivery Hero, 2020) o comercio rápido, que aparece como un nuevo modelo dentro del comercio electrónico donde prima la velocidad, la conveniencia y la atención al cliente. La entrega de última milla representa el 53 % del coste total de envío y el 41 % de los costes totales de la cadena de suministro (World Economic Forum, 2020).

Este mayor número de entregas ha hecho que todos los agentes implicados en el reparto urbano teman un colapso en la última milla y se planteen medidas que permitan aumentar su capacidad de entrega y, a su vez, reducir el impacto medioambiental que tiene su actividad en las grandes ciudades. Si no se producen intervenciones de los grupos de interés, se espera un aumento del 32 % en las emisiones de car-bono del tráfico de reparto urbano para 2030 (World Economic Forum, 2020).

Las medidas propuestas tienen dos vertientes diferenciadas. Por parte de las autoridades públicas, tratan de minimizar los impactos derivados de la logística urbana para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos y restringir el uso de los vehículos en las ciudades (Civitas, 2015). Por parte de los actores que intervienen en la distribución urbana (Macharis y Kin, 2017), se plantean iniciativas que aumenten su productividad de entrega y minimicen sus costes, teniendo cada vez más presentes los impactos medioambientales.

1.1 Medidas regulatorias y soluciones para la mejora de la logística urbana

Diferentes autores han organizado las numerosas medidas para la mejora de la logística de la ciudad en distintas categorías. Sobre la base de los resultados de los proyectos europeos, Russo y Comi (2011) proponen cuatro categorías de medidas, que están relacionadas con: (i) la infraestructura material, (ii) los sistemas de transporte inteligentes o telemáticos, (iii) los equipos de carga y unidades de transporte, y (iv) la gestión de la red de tráfico. Los autores proponen esta categorización de medidas como una herramienta para ser utilizada por las autoridades de la ciudad, al diseñar elementos de regulación para las actividades de logística y transporte de mercancías en las ciudades.

Browne et al. (2012) parten de la relación existente entre cinco características del transporte urbano de mercancías y sus externalidades. Estas características son: (i) niveles de ruido causados por cada transporte de mercancías, (ii) emisiones de contaminantes atmosféricos, (iii) consumo de combustible fósil, (iv) kilómetros totales recorridos por el vehículo, y (v) riesgo de accidente por kilómetro recorrido por el vehículo. Para cada una de estas características, los autores combinan iniciativas específicas que pueden reducir los impactos. Estas pueden agruparse en tres categorías: (a) compartir espacio y tiempo, (b) fomentar la cooperación (también entre el sector público y el privado), y (c) cambiar el comportamiento de los usuarios.

Por otro lado, Stathopoulos et al. (2012) definen seis clases de medidas para reducir los problemas de transporte: (i) medidas basadas en el mercado, (ii) medidas regulatorias, (iii) planificación del uso del suelo, (iv) medidas de infraestructura, (v) nuevas tecnologías y (vi) medidas de gestión. En esta misma línea, el proyecto Civitas (2015) enumera una serie de iniciativas para ciudades de entre 50 000 y 250 000 habitantes, tanto desde un punto de vista estratégico como desde la propuesta de medidas de pequeño impacto que podrían implementarse con mayor facilidad. Las citadas medidas pueden resumirse en las siguientes: (i) compromiso de los grupos de interés, (ii) medidas regulatorias, (iii) medidas basadas en el mercado, (iv) planificación del uso del suelo y medidas de infraestructura, (v) nuevas tecnologías y (vi) concienciación ecológica.

Esta breve descripción general de las distintas categorizaciones demuestra la gran variedad de medidas con relación a la logística urbana que se han introducido, probado y (o) implementado en las ciudades. Sin embargo, la literatura se ha centrado principalmente en la perspectiva de las autoridades locales y los responsables políticos, a pesar del papel clave del sector privado en muchas de estas medidas. En respuesta a esto, Macharis y Kin (2017) se centran en las medidas de logística urbana que incluyen explícitamente a los grupos de interés que son responsables y actúan en la logística en las ciudades. Las clasifican según las llamadas «cuatro aes» (inglés): (i) concienciar (awareness), (ii) evitar (avoidance), (iii) actuar y cambiar (act), y (iv) anticipación de nuevas tecnologías (anticipation). Dentro de las soluciones en logística urbana que “desplazan” al coche de la ciudad, los grupos de interés públicos tratan de restringir el acceso de vehículos con medidas reguladoras

(restricciones de acceso a zonas sensibles, regulación de estacionamiento, etc.), medidas basadas en el mercado (peajes, impuestos, tarifas de estacionamiento, etc.) o medidas relacionadas con las infraestructuras (zonas de carga/descarga, área de entregas cercanas).

Por parte de los grupos de interés que son responsables y actúan en la logística de la ciudad, las medidas innovadoras tratan de buscar la eficiencia en las operaciones de reparto la entrega de la última milla. Con relación a los medios de reparto, se estudian iniciativas para sustituir los vehículos comerciales por vehículos no tripulados (drones o vehículos terrestres) que permitan, a su vez, hacer entregas minimizando el uso de las calles de la ciudad. Estas soluciones presentan, en la actualidad, numerosas barreras que es necesario solventar para que el reparto urbano con drones o con vehículos terrestres no tripulados pueda ser una realidad en muchas urbes. En la figura 1 se recopilan las diferentes iniciativas o medidas relacionadas con la logística urbana y afectan a la distribución urbana de mercancías.

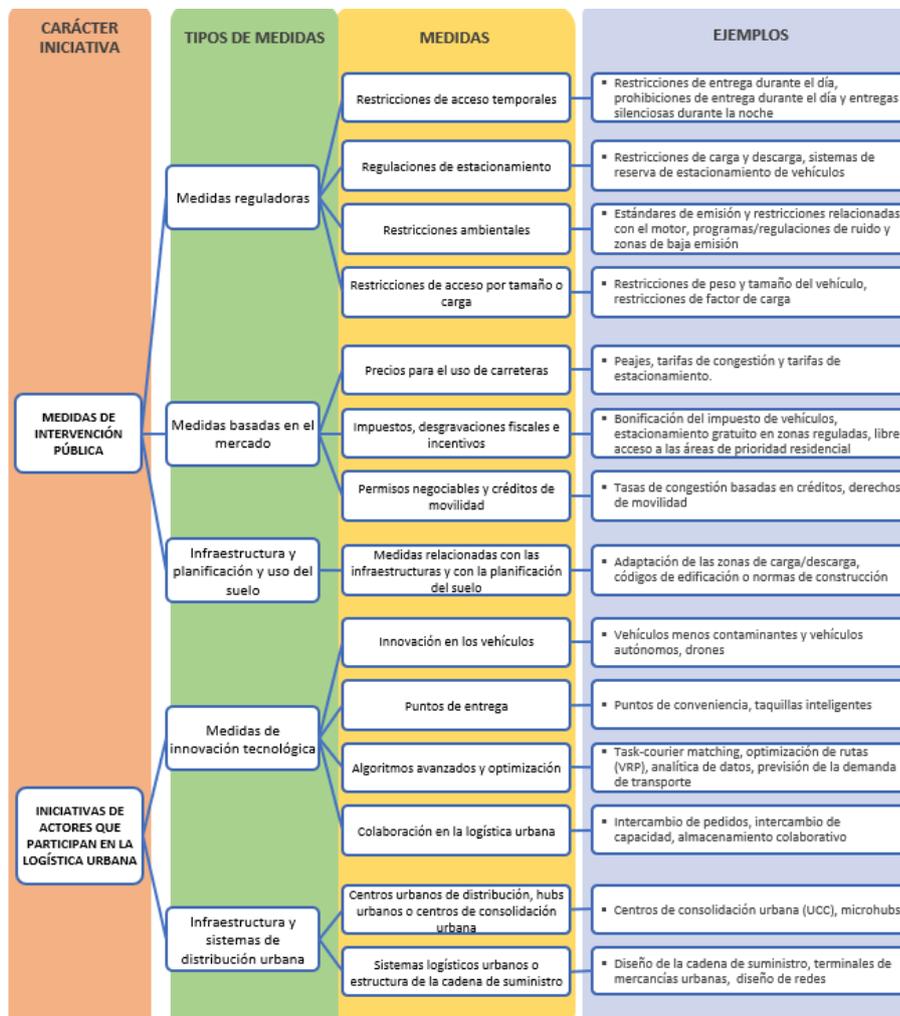


Figura 1: Medidas e iniciativas relacionadas con la logística urbana. Fuente: elaboración propia a partir de Stathopoulos et al. (2012); Civitas (2015); Macharis y Kin (2017).

1.2 Sistemas logísticos urbanos a través de metro o tranvía (M-ULS)

El transporte de mercancías por carretera es el modo que generalmente domina en las operaciones de entrega urbana. En un intento por mejorar la eficiencia de la distribución de mercancías en las ciudades y lograr y mejorar la sostenibilidad ambiental, las autoridades locales buscan políticas específicamente dirigidas a la logística urbana. Por lo general, estas políticas consisten en modelos de restricción de acceso que evitan que ciertas categorías de vehículos ingresen a áreas sensibles. Estos son, típicamente, los centros de las ciudades, donde se enfrentan varios desafíos simultáneos: la falta de espacio, la protección de la salud de los ciudadanos y la protección del patrimonio (Alessandrini et al., 2012). Existen, de forma adicional, diferentes ineficiencias y costes asociados a la distribución urbana de mercancías: edad media de los vehículos, dificultades de acceso y estacionamiento, restricciones de velocidad, congestión, etc. que favorecen el uso de modelos alternativos (Sładkowski et al., 2014)

Con relación al transporte ferroviario, se han producido una serie de estudios y pruebas en los últimos años con el propósito de utilizar este medio de transporte de mercancías en diversas ciudades. Las razones para utilizar el ferrocarril para llevar a cabo la distribución urbana se definen como consecuencia de intentar minimizar el transporte por carretera en la logística de la ciudad. El transporte por carretera es uno de los medios más utilizados, pero también resulta más contaminante y menos sostenible, reforzando así la necesidad de entregar bienes de forma innovadora.

Muchas ciudades europeas disponen de una extensa infraestructura ferroviaria para cumplir con las funciones principales de transporte público, ya sea a través de un sistema de metro, trenes o una red de tranvías, existiendo cada vez más posibilidades de utilizar estos sistemas para el transporte de mercancías en el centro de las ciudades. A diferencia de la industria del transporte de mercancías por ferrocarril pesado, que necesitaría una considerable inversión, el transporte de mercancías a través del metro o tranvía utilizaría la infraestructura existente. No es necesario cambiar las infraestructuras del material rodante ni de las estaciones, aunque deben realizarse modificaciones y adaptaciones (Dampier y Marinov, 2015).

Los estudios sobre sistemas logísticos subterráneos (ULS o UFT) llevan desarrollándose durante casi 50 años, pero no es abundante la literatura científica que aborda la distribución urbana a través de sistemas ferroviarios. Robinson y Mortimer (2004) señalaron el potencial de estos sistemas y su posible contribución a reducir la congestión del tráfico urbano al proporcionar una alternativa a la distribución por carretera. Para su posible implantación, es necesario que los costes operativos sean equiparables a los del transporte por carretera, se minimicen los conflictos entre el viajero y los trenes de carga, y se produzcan mejoras en las infraestructuras y la organización. Dampier y Marinov (2015) propusieron una nueva concepción de ULS, integrando el transporte subterráneo de mercancías en el sistema de metro de pasajeros (denominado M-ULS o sistema logístico

subterráneo por metro), que ofrece una solución viable con un presupuesto limitado. Su ventaja no solo radica en los beneficios tradicionales de ULS para aliviar la congestión del tráfico, mejorar el entorno urbano y la eficiencia del transporte de mercancías, sino que también contribuye a un gran ahorro del espacio subterráneo, reduciendo los costes y el periodo de construcción.

En los últimos años, los sistemas de intercambio de pasajeros y carga, que son diferentes de los tradicionales vehículos de carga dedicados, han recibido una atención cada vez mayor. De este modo, se introducen conceptos como pooling logístico (reutilización de recursos), flete en tránsito, entrega multimodal, uso del transporte público urbano para entregas, cargo hitching (transporte mixto de pasajeros y mercancías), integración de sistemas de transporte de pasajeros y de carga, etc. La combinación de los flujos de pasajeros y mercancías brinda la oportunidad de promover aún más las ganancias de eficiencia. Las estrategias de intercambio actuales para los servicios de carga se basan en modos de transporte público como el metro o autobuses (Cochrane et al., 2017).

Otros estudios recientes han analizado la viabilidad y la eficiencia de utilizar el transporte público, como el metro y los tranvías, para la entrega urgente. Kikuta et al. (2012) estudiaron la integración del sistema de metro en Sapporo, Japón, con el sistema tradicional de transporte por camión para facilitar la distribución de mercancías entre los barrios del centro de la ciudad. Diziain et al. (2014) compararon los sistemas urbanos de transporte intermodal de mercancías entre Francia y Japón. Estos sistemas son prometedores pero difíciles de implantar en la última milla ya que los servicios ferroviarios requieren de gran volumen, suponen altos costes y conllevan dificultades organizativas. Dampier y Marinov (2015) estudiaron la viabilidad del sistema de metro, en Tyne y Wear (Reino Unido), para entregar mercancías directamente en el centro de la ciudad. Arvidsson et al. (2016) revisaron el éxito y el fracaso de los sistemas de tranvía para el transporte urbano de mercancías y propusieron una solución de transporte multimodal de bajas emisiones utilizando este medio de transporte. El proyecto Cargo hitching (van Duin et al., 2019) comenzó con el objetivo de utilizar la capacidad excedente del transporte público para el transporte de paquetes, y su viabilidad depende de poder incluir y valorar conceptos sociales como aportación a los clientes y a la sociedad. Por su parte, Jiang et al. (2020) concluyen que el metro es adecuado para la distribución en ciudades con una gran rotación de mercancías, mientras que los autobuses y los tranvías resultan más adecuados para la distribución en áreas con baja rotación de mercancías. En la sociedad actual, donde la eficiencia energética es cada vez más importante, el transporte urbano de mercancías basado en el metro es más competitivo que los autobuses y tranvías. La distribución de mercancías a través del metro puede aprovechar su alta capacidad de transporte, la alta velocidad de operación, su puntualidad y fiabilidad en los horarios y la baja contaminación ambiental producida.

Partiendo de una falta de estudios que cuantifiquen el efecto socioeconómico-medioambiental de estos sistemas dentro del sector logístico, el planteamiento del problema en este estudio es el siguiente: dentro del ámbito de las grandes ciudades, ¿puede considerarse un sistema de transporte público como el metro una alternativa eficiente y sostenible para la logística urbana en la era del comercio electrónico? A continuación, se muestran una serie de objetivos que pretenden ayudar a dar respuesta a la pregunta de la investigación:

- ¿Qué nivel de demanda de paquetería justificaría el uso de la red de metro como operador logístico urbano?
- ¿Cómo se pueden utilizar las infraestructuras y los trenes para implementar este modelo?
- ¿Cuáles son los beneficios sociales y medioambientales derivados del uso de metro para distribuir paquetes en el centro de la ciudad?

El resto de este documento está estructurado de la siguiente manera: La Sección 2 describe la metodología empleada para evaluar los costos externos del modelo propuesto. Las secciones 3 y 4 presentan el caso de estudio y la aplicación de la metodología para la ciudad de Madrid. La sección 5 analiza los resultados y, por último, la sección 6 presenta las conclusiones y posibles áreas de investigación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Propuesta metodológica

La Figura 1 muestra el marco metodológico utilizado, donde se describen los pasos, procedimientos y fuentes de datos empleadas para resolver las preguntas planteadas. Es importante señalar que las fuentes de información empleadas se corresponden con datos de organismos oficiales.

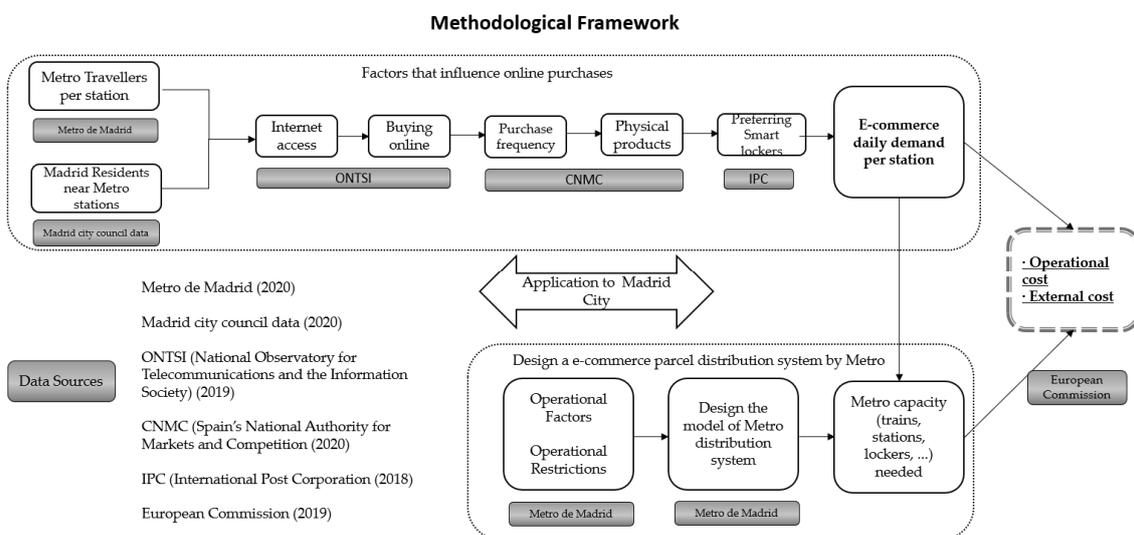


Figura 1: Marco metodológico. Fuente: elaboración propia

2.2. Definición del modelo de reparto en la última milla: modelo M4G

Antes de describir el modelo M4G, se representa en la Figura 2 un diagrama de procesos del modelo actual de reparto e-commerce B2C con entrega a domicilio, donde se explican las principales actividades realizadas:

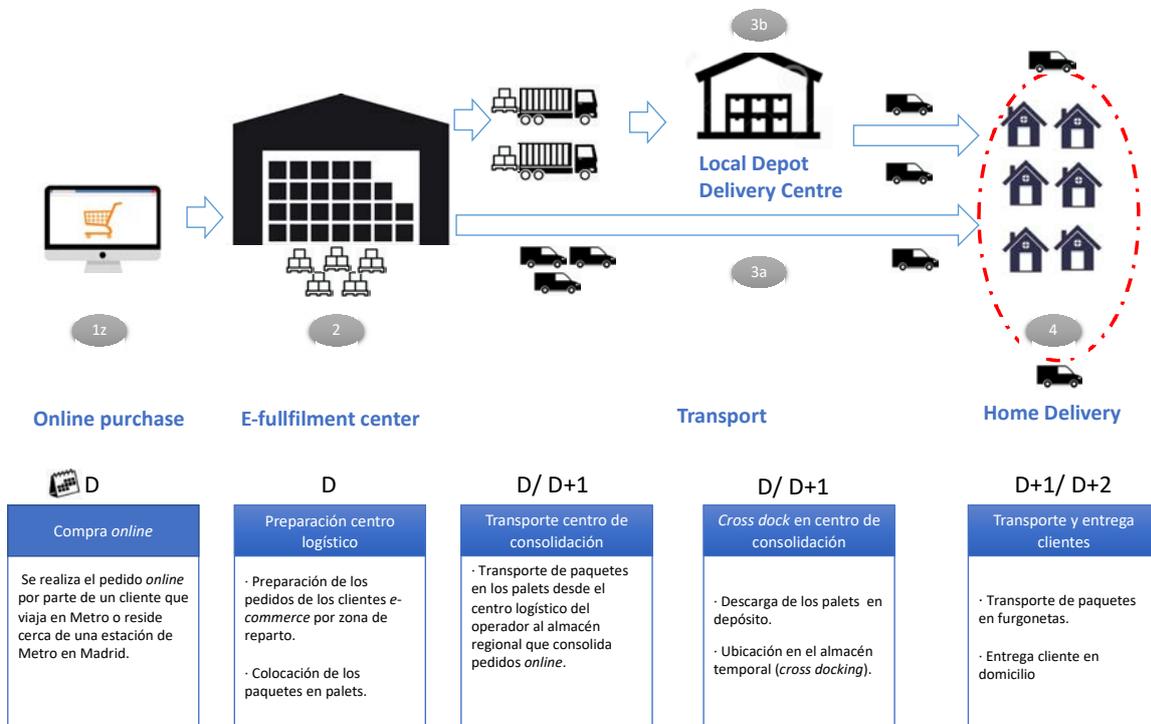


Figura 2. Modelo actual de reparto de e-commerce. Fuente: elaboración propia

1. Se realiza el pedido *online* por un residente y selecciona entrega en su domicilio.
2. Se procesa el pedido en el *e-fulfillment center* (centro logístico o centro de consolidación del minorista o del operador logístico, situado en las afueras de la ciudad). En el *e-fulfillment center* se prepara el paquete y está listo para el transporte.
3. Transporte desde el centro logístico hasta el domicilio del cliente. Dos opciones:
 - i. Un camión pesado desde el centro logístico hasta un almacén local o centro de consolidación más cercano al centro de la ciudad (*local depot*). Posteriormente se clasifica el pedido y se envía al domicilio del cliente mediante furgonetas (LCV, *light commercial vehicle*).
 - ii. El LCV tiene su origen en el centro logístico (*e-fulfillment*) y envía directamente al domicilio del cliente. Esta es la opción que se considera en la comparativa de este estudio.
4. Se entrega el pedido de *e-commerce* en el domicilio del cliente.

El modelo M4G, el diagrama de los procesos del modelo M4G de reparto de *e-commerce* se muestra a continuación en la Figura 3 y se describen a continuación.

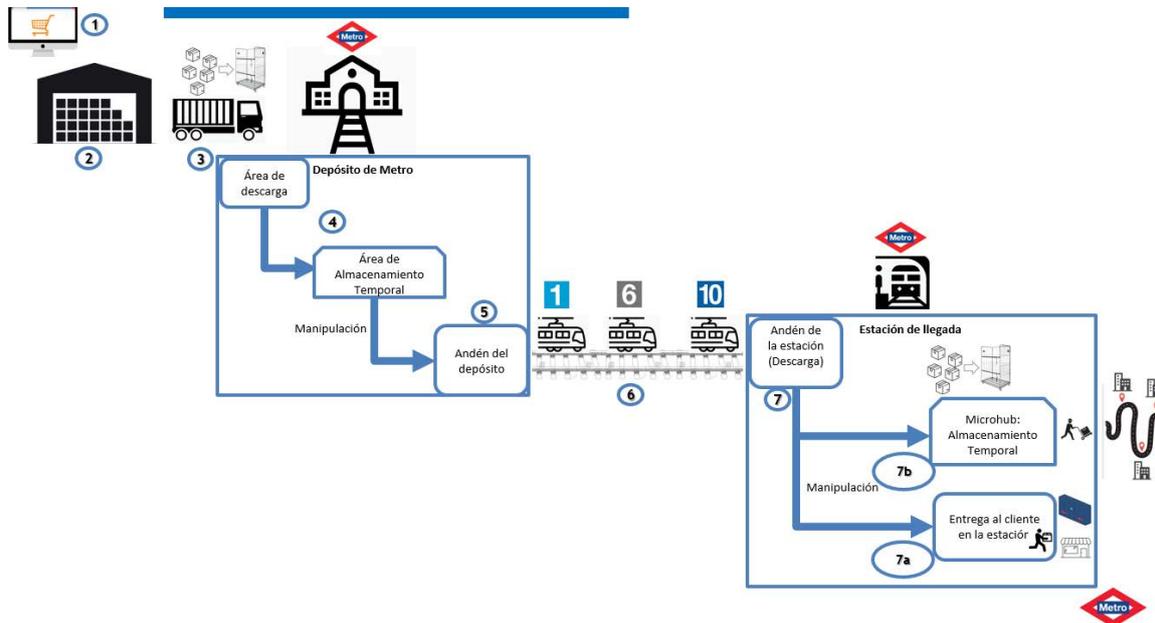


Figura 3. Modelo M4G. Fuente: elaboración propia

Para llevar a cabo la distribución urbana propuesta, a través de la red metropolitana, se detallan las 7 grandes actividades a realizar, y que serían las siguientes:

1. Se realiza el pedido *online* por un viajero de metro o por un residente de algún barrio cercano a una estación de metro. El cliente selecciona un método de entrega concreto (taquilla, centro de recogida, entrega a domicilio, etc.).
2. Se procesa y se prepara el pedido en el centro logístico/centro de consolidación del minorista o del operador logístico. Los paquetes correspondientes a pedidos *online* se preparan y colocan en los contenedores rodantes (*rollers containers*, ver Figura 4) por estación. Los contenedores rodantes son sistemas para el transporte de forma ágil de paquetes y otros productos. Son ligeros y permiten cargas de 500-800 kg. Pueden tener diferentes tamaños para adaptarse a las características interiores de cada tren. La utilización de contenedores rodantes, en la preparación de pedidos, minimiza la ruptura de la carga en todo el proceso (descomposición total o parcial del contenedor al proceder al almacenaje o transporte al receptor de la carga).



Figura 4. Ejemplo de roll container. Fuente: Todo Contenedor (<https://cutt.ly/6bVKy0n>)

Llegados a este punto el pedido estaría listo para el transporte.

3. Transporte hasta el depósito de metro: con un camión pesado (HGV) se transportan, mediante contenedores rodantes, los paquetes agrupados por destinos, desde el centro logístico hasta el depósito o cochera de metro seleccionado.
4. Descarga y almacenamiento temporal en las instalaciones de metro: los contenedores que contienen paquetes con pedidos de *e-commerce* se ubican, de forma temporal (*cross dock*), en el depósito a la espera de ser cargados en los trenes para su distribución posterior.
5. Carga de los paquetes en los trenes: antes del inicio del trayecto del tren, que va a circular por toda la línea, se cargan los coches/vagones necesarios con los contenedores que llevan la mercancía.
6. Transporte desde el depósito de metro hasta cada estación: el tren se carga con los contenedores rodantes en el depósito de metro y se utiliza el tren para transportar los pedidos hasta las estaciones.

Dentro de este punto, hay un aspecto fundamental a tener en cuenta en el reparto de mercancías a través de trenes en redes metropolitanas. Se trata del empleo de trenes compartidos o trenes exclusivos para transportar los contenedores rodantes. A saber:

- Trenes compartidos: en este caso, el mismo tren es compartido por viajeros y paquetes, pero no están mezclados ya que cada coche que compone el tren transporta o viajeros o paquetes. Se puede utilizar un coche de la composición de ese tren para el transporte de paquetes, y el resto transporta viajeros (ver Figura 5). Con esta alternativa se utilizan los mismos horarios de paso de los trenes en esa línea. Para que no afecte a las ratios viajeros/m², es recomendable utilizar esta opción durante los periodos valle.

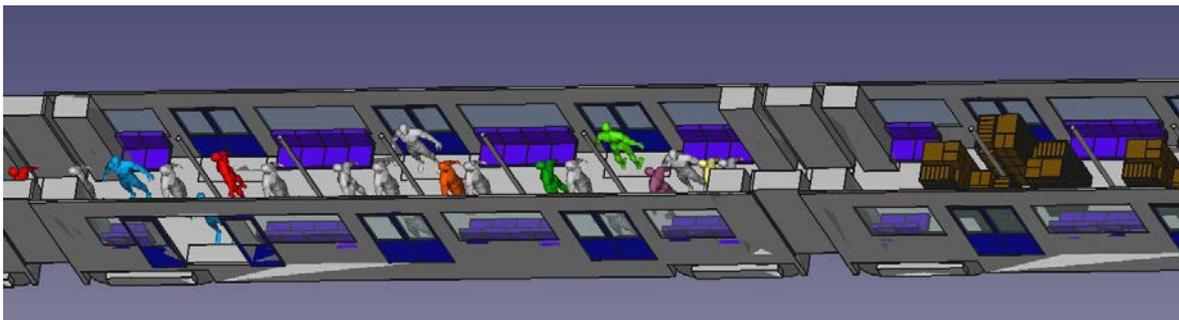


Figura 5. Ejemplo de trenes compartiendo viajeros y paquetes. Fuente: elaboración propia

- Trenes exclusivos: para esta opción, el tren que recorre las diferentes estaciones de la red de metro solo transporta paquetes. En este caso, no se modifica la estructura ni el diseño interior del tren, cada coche se carga con los contenedores rodantes que, a su vez, están llenos de paquetes. La composición del tren (número de coches que lo componen) puede variar y los horarios no coinciden con la tabla de trenes definida para los viajeros, con el fin de no interferir con ellos.

En cada estación se descargan los paquetes correspondientes. Dentro del modelo M4G y teniendo en cuenta las características descritas en el cuadro anterior, se pueden considerar dos grandes categorías en la entrega final de la mercancía al cliente que realiza el pedido de e-commerce: 7a) Entregas dentro de la estación (centros de recogida o taquillas inteligentes) y 7b) Entregas fuera de la estación (domicilio/oficinas).

2.3. Cuantificación de la demanda de paquetes de e-commerce

Los compradores online disponen de numerosas alternativas para elegir qué productos comprar, dónde pueden comprarlos y cuándo pueden comprarlos.

De igual forma, cuando hablamos de la entrega de paquetes en el comercio electrónico, los clientes esperan poder elegir diferentes alternativas. Una empresa que ofrezca (o el cliente perciba) un alto valor del servicio para una entrega de comercio electrónico, generalmente producirá la satisfacción del cliente dentro del proceso de compra y, además, tendrá un efecto directo en su lealtad y permanencia, lo que finalmente generará mayor consumo y, por extensión, aumentará los beneficios de las empresas (Copenhagen Economics, 2013).

Por lo tanto, la forma en que se materializa la entrega física también condiciona la demanda del comercio electrónico.

La demanda diaria de pedidos de comercio electrónico del modelo M4G tiene dos componentes, la demanda de viajeros y la demanda de residentes:

2.3.1 Demanda diaria de viajeros (DDV)

Una de las principales sinergias entre el transporte urbano ferroviario de personas y el transporte urbano de mercancías en las grandes ciudades se produce cuando un viajero de metro puede, a su vez, ser un cliente de comercio electrónico y recoger los pedidos cuando entra o sale de una estación.

El cálculo de esta demanda diaria potencial de pedidos de e-commerce de los viajeros de metro se construye aplicando el método de proporciones en cadena propuesto por Kotler y Keller (2012), que consiste en multiplicar un número base por una serie de porcentajes hasta llegar a la demanda objetivo.

La formulación sería la siguiente:

$$DDV=A \times P1 \times P2 \times P3 \times P4 \times P5 \times P6 \times P7 \quad (1)$$

donde:

A = viajes diarios en metro por estación

P1 = % promedio de viajeros distintos en metro por estación

P2 = % promedio de personas que viajan en metro > x años por estación

P3 = % promedio de personas > x años que usan Internet

P4 = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran online

P5 = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran online de forma diaria

P6 = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran online de forma diaria bienes y productos físicos que pueden entrar en un paquete de tamaño estándar

P7 = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran online de forma diaria bienes y productos físicos que pueden entrar en un paquete de tamaño estándar y muestran preferencia por un método de entrega concreto (taquillas o recogida en centro o domicilio)

2.3.2 Demanda de residentes (DDR)

La privilegiada ubicación de todas las estaciones de metro en las grandes urbes (en distancia y en accesibilidad) les otorga una ventaja competitiva a la hora de determinar los posibles puntos de entrega de pedidos de comercio electrónico para los residentes de estas ciudades.

De forma análoga al método anterior, se calcula la demanda potencial diaria de pedidos de e-commerce para las personas que residen dentro del área de influencia de una estación de metro (se considera área de influencia de una estación el área que ocupa el barrio donde vive el residente).

Para este caso, la formulación sería:

$$DDR = Y \times P3 \times P4 \times P5 \times P6 \times P7 \quad (2)$$

donde:

Y = personas residentes que viven en un área de influencia de una estación de metro > x años y no viajan en metro de forma regular.

La demanda diaria total de pedidos de e-commerce por estación $DDT(i)$ será la suma de ambos conceptos:

$$Demanda\ diaria\ de\ pedidos\ e - commerce\ de\ la\ estación\ DDT(i) = DDV(i) + DDV(i) \quad (3)$$

(i) = estaciones de metro

2.4. Análisis de costes externos

Según la Comisión Europea (European Commission, 2019), «Los costes externos, también conocidos como externalidades, surgen cuando las actividades sociales o económicas de una persona (o un grupo) tienen un impacto en otra persona (o grupo) y cuando ese impacto no se contabiliza por completo o no se compensa por la primera persona (o grupo)».

Estos costes, generalmente, no son asumidos por el usuario de transporte y no se tienen en cuenta a la hora de decidir qué medio de transporte utilizar. La Tabla 1 muestra las dos grandes categorías de costes externos y el tipo externalidad que la componen, donde:

Costes externos	Tipo de coste externo	Variables que influyen en el tipo de coste	Definición
I: Social (CS)	Costes de congestión C(c)	$Cc = f(D, T, M, P)$	Pérdida de tiempo que sufre un individuo y que aparece cuando un vehículo adicional reduce la velocidad de otros vehículos dentro de un flujo de tráfico, aumentando el tiempo de viaje.
	Costes de accidentes C(a)	$Ca = f(D, M, P)$	Tiene en cuenta, no solo los costes materiales (costes administrativos, daños materiales en otros vehículos e infraestructuras, etc.), sino también los costes inmateriales
	Costes de ruido C(r)	$Cr = f(D, M, T, P, H)$	El ruido se puede definir como sonidos no deseados de diferente duración, intensidad u otra calidad que causan daño físico o psicológico a los seres humanos. Los sistemas de transporte son fuentes de ruido.
II: Medioambiental (CM)	Costes por polución de aire C(pa)	$Cpa = f(D, M, P, F, S, E)$	Los motores de transporte emiten ciertos contaminantes (por ejemplo, SO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , CO) a la atmósfera. Tienen en cuenta tanto los efectos sobre la salud como otro tipo de daños
	Coste de cambio climático C(cc)	$Ccc = f(D, M, P, F, S, E)$	Los costes del cambio climático se definen como los costes asociados a todos los efectos del calentamiento global, como el aumento del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad, los problemas de gestión del agua, etc.

donde: D (km): distancia recorrida para entregar los paquetes de comercio electrónico por un determinado modo de transporte. M: modo de transporte (LCV, HGV, Metro). T situación del tráfico (sobrecapacidad, congestionado, cerca de la capacidad, por debajo de la capacidad, denso, fluido, etc.) P: área de actuación en el transporte de paquetes (área urbana, área interurbana, etc.) H: momento del día. F: tipo de combustible. S: tamaño del vehículo. E: tipo de emisión.

Tabla 1- Costes externos y variables que influyen en el tipo de coste

La cuantificación monetaria de las externalidades del modelo de distribución de paquetes de comercio electrónico a través del sistema M4G considera los siguientes costes agregados totales (CT):

$$CT = CS + CM \quad (4)$$

donde:

$$CS = C(c) + C(a)$$

$$CM = C(r) + C(pa) + C(cc)$$

2.5. Capacidad de la red de metro y factores operativos

El cálculo de la oferta de servicios logísticos de comercio electrónico por estaciones de metro (para residentes y viajeros) estará condicionado tanto por aspectos vinculados a la demanda de entregas en cada una de esas estaciones, como por factores logísticos operativos. Como se muestra en la Tabla 2, los siguientes factores operativos condicionarán el coste de envío por paquete a través del modelo M4G.

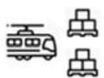
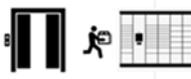
Factor operativo	Definición	Característica
Tipo de tren 	En función de las líneas con mayor demanda de paquetes, el tipo de tren (serie) que circula por ellas es diferente. Cada uno de estos trenes puede presentar un diseño interior en cada coche que lo compone y por lo tanto tiene una capacidad de transporte de paquetes distinta.	Capacidad interior +++ (por coche) Capacidad interior + (por coche)
Tamaño del contenedor 	Debido a su facilidad de manejo y su capacidad, se utiliza el <i>roll container</i> como medio para transportar paquetes en los trenes. En función de la capacidad interior del tren, se selecciona el tamaño de <i>roll</i> más adecuado.	<i>Roll container</i> grande <i>Roll container</i> mediano
Operativa de trenes	Trenes compartidos: los trenes no modifican su frecuencia actual para el transporte de viajeros y se utiliza parte de un tren para dar servicios logísticos. Trenes específicos: se utiliza un tren para transportar paquetes. Este tren no está disponible para los viajeros y tiene un horario diferente.	Tren compartido Tren específico
Tiempo de descarga de contenedores en estación 	Tiempo para la descarga de <i>rollers containers</i> en cada estación.	Trenes compartidos = al de tiempo de parada de transporte de viajeros Trenes específicos = en función del número de <i>rollers containers</i>
Tamaño paquetes 	Se consideran diferentes tamaños de paquetes. Esto permite 1 pedido = 1 paquete, así es posible incluir varios productos en un mismo paquete o considerar varias combinaciones en función de los m ³ necesarios.	Paquete pequeño Paquete mediano Paquete grande Paquete especial
Tamaño de las taquillas, de los centros de recogida y del <i>microhub</i> 	En función de la demanda de paquetes diaria de cada estación, el tamaño de las taquillas inteligentes puede ser diferente. Para el caso de los centros de recogida y del almacén urbano situado en la estación (<i>microhub</i>), se determinará la superficie necesaria en función de la demanda diaria de paquetes en esa estación.	Estaciones con alta demanda de taquillas ++++ Estaciones con menor demanda Taquillas ++ La superficie de los centros de recogida y los <i>microhubs</i> de estaciones están condicionados por la demanda de paquetes de esa estación A mayor demanda mayor superficie de almacenaje

Tabla 2- Factores operativos del modelo M4G

3. CASO DE ESTUDIO

El siguiente apartado describe la aplicación del sistema de reparto mixto de última milla propuesto para mercancías de comercio electrónico en la ciudad de Madrid. A continuación, se define el modelo M4G para la distribución de los paquetes originados por el e-commerce, considerando el caso de la ciudad de Madrid. Esta nueva distribución urbana se realiza a través del sistema de transporte público ferroviario Metro de Madrid (Metro). El objetivo es poder comparar las externalidades de este nuevo modelo con el modelo actual de reparto urbano de paquetes en la ciudad de Madrid.

3.1 Background

La distribución urbana es fundamental para la actividad y el desarrollo de cualquier ciudad, y Madrid no es una excepción. Por su relieve y la evolución histórica de su estructura urbana, la distribución dentro de la ciudad de Madrid es una de las más complicadas entre las grandes ciudades europeas. La ciudad, motor esencial de la economía española que representa el 12% del PIB nacional, está dividida en 21 distritos con una población total de 3,3 millones (INE, 2020) y tiene una superficie total de 60.436,7 hectáreas, con una densidad de población media de 54 habitantes por hectárea.

En la actualidad, existen dos tipos principales de problemas asociados a la distribución urbana en la ciudad de Madrid (Área de Gobierno de medioambiente y Movilidad, 2019):

- Infraestructura urbana:

- No hay planificación urbana de puntos de distribución.
- Problemas con el uso de áreas de estacionamiento y carga / descarga.
- Crecimiento significativo de viviendas particulares como puntos de entrega de comercio electrónico.

- Gestión:

· No existe un modelo de gestión de la logística de distribución que identifique y organice adecuadamente los numerosos agentes y operaciones para cada canal de distribución urbana.

- Crecimiento del comercio electrónico y nuevos modelos de entrega.
- Mal uso de las actividades de carga / descarga.

En Madrid el problema se agrava ya que, siguiendo las directrices europeas, se están tomando medidas para expulsar (o desplazar) al coche que más contamina del centro de la ciudad (por ejemplo, Madrid Central o Madrid 360) y lograr una mejor calidad del aire. Esta prohibición de acceso de los vehículos a determinadas zonas plantea los siguientes inconvenientes:

- Si no se sustituyen los vehículos actuales de reparto por otros menos contaminantes, un porcentaje considerable de la flota de estos vehículos (84 321 LCV distintos accedieron a Madrid Central de enero a junio de 2019) no podrán hacer la distribución en el centro de la ciudad en el futuro a corto plazo.

- Si se produce una sustitución de los vehículos actuales de reparto por otros menos contaminantes (por ejemplo, eléctricos), no se habrá logrado el objetivo de «expulsar» al vehículo de la ciudad y seguirán existiendo problemas de congestión.

En Madrid, el transporte por carretera supuso el 34,1% del total de emisiones de gases de efecto invernadero, según el Inventario de Emisiones de Gases Contaminantes a la Atmósfera 2016. La flota de coches de Madrid destaca por su elevado porcentaje de vehículos diésel y la edad media ronda los 9,3 años. (Área de Gobierno de medioambiente y Movilidad, 2019). El porcentaje de vehículos comerciales e industriales con más de 10 años rondaba el 73,2% a finales de 2018 (Anfac, 2018). Según datos del Ayuntamiento, durante los meses de enero y junio de 2019, entre 13.000-16.000 vehículos LCV accedieron (en días laborables) a la zona de bajas emisiones establecida en 2018 como Centro de Madrid (una superficie de 472 hectáreas).

Por otro lado, Metro de Madrid es el mayor operador de metro de España y un referente internacional por su red, calidad de servicio e innovación y capacidad tecnológica. Con más de 100 años de experiencia, es el medio de transporte público más utilizado en la Comunidad de Madrid. La red, compuesta por doce líneas y un ramal especial, presenta una extensión total de 294 kilómetros y conecta 12 municipios. Durante la temporada de invierno, más de 2,3 millones de viajeros (periodo pre-covid) utilizan el metro cada día laborable. El desplazamiento diario por motivos de trabajo o estudio representa el 70% del volumen total (<https://www.metromadrid.es/es>).

3.2. Descripción del modelo M4G en la ciudad de Madrid

La Figura 6 describe el modelo para el reparto de paquetes de e-commerce B2C para los residentes y viajeros de Metro de Madrid, a través del suburbano. Este modelo, M4G, presenta las operaciones involucradas desde que se realiza el pedido online por un cliente hasta que llega a las estaciones de Metro.

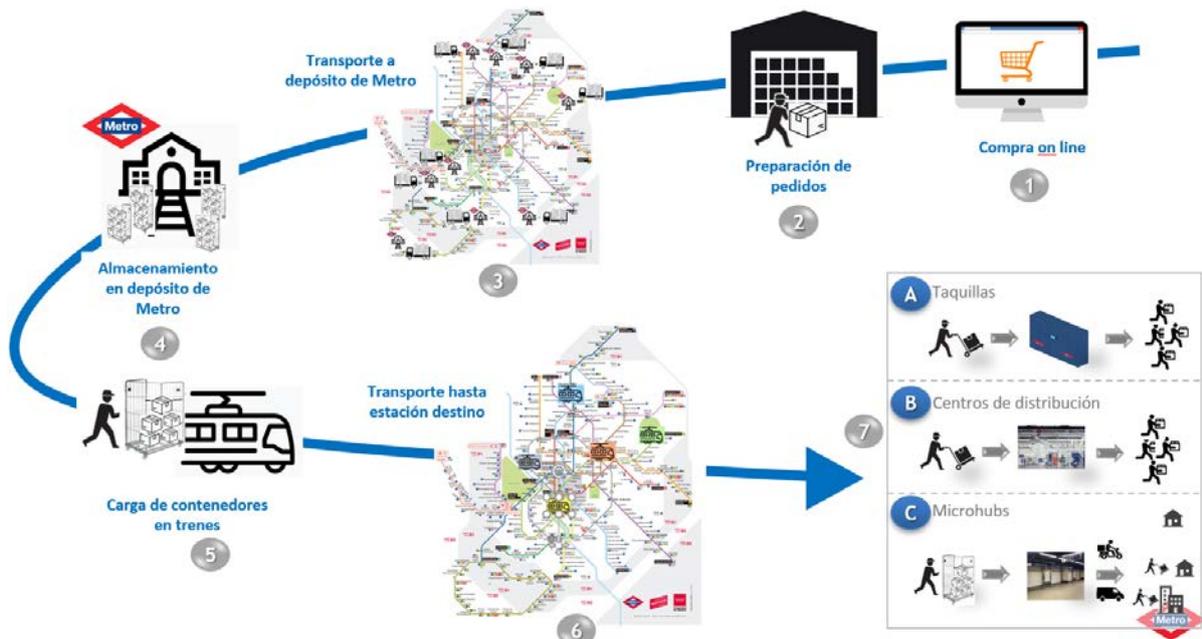


Figura 6. Flujograma de actividad del modelo M4G para la ciudad de Madrid.

Fuente: elaboración propia

Las actividades descritas en la Figura 6 son:

1. Se realiza el pedido *online* por un viajero de Metro de Madrid o por un residente de la ciudad de Madrid. En ese momento el cliente selecciona un método de entrega.
2. Se procesa y se preparan los pedidos *online* en el centro logístico (del minorista o del operador, según el caso). En una ciudad como Madrid, estos centros de almacenaje y preparación de pedidos se ubican en las afueras de la ciudad (corredor del Henares, Alcobendas, Getafe, Pinto, etc.). En ellos, se preparan los paquetes y se señalan los contenedores rodantes que los transportan (ver Figura 6), quedando listos para el transporte y diferenciándose por estación.



Figura 7. Contenedor rodante cargado con paquetes. Fuente: elaboración propia

3. Transporte de paquetes B2C hasta un depósito de Metro: los paquetes se trasladan desde el centro logístico situado a las afueras de Madrid hasta el depósito de Metro seleccionado. El transporte se realiza con un camión pesado cargado de contenedores rodantes llenos de paquetes B2C y la mercancía se descarga en un espacio habilitado en el depósito.
4. Almacenamiento temporal en el depósito de Metro de Madrid: los contenedores rodantes se almacenan en una carpa o almacén de Metro durante un breve periodo de tiempo (horas o días, según el caso).
5. Traslado y carga de contenedores rodantes en trenes: antes de iniciar el reparto de los pedidos de *e-commerce*, se trasladan los contenedores desde el almacén temporal hasta las vías donde se sitúan los trenes que inician su recorrido desde el depósito.

Se colocan los contenedores rodantes en los coches que componen un tren. Dependiendo de la alternativa seleccionada, los trenes tienen una composición de coches con viajeros más coche con paquetes o el tren se compone solo de coches con paquetes.

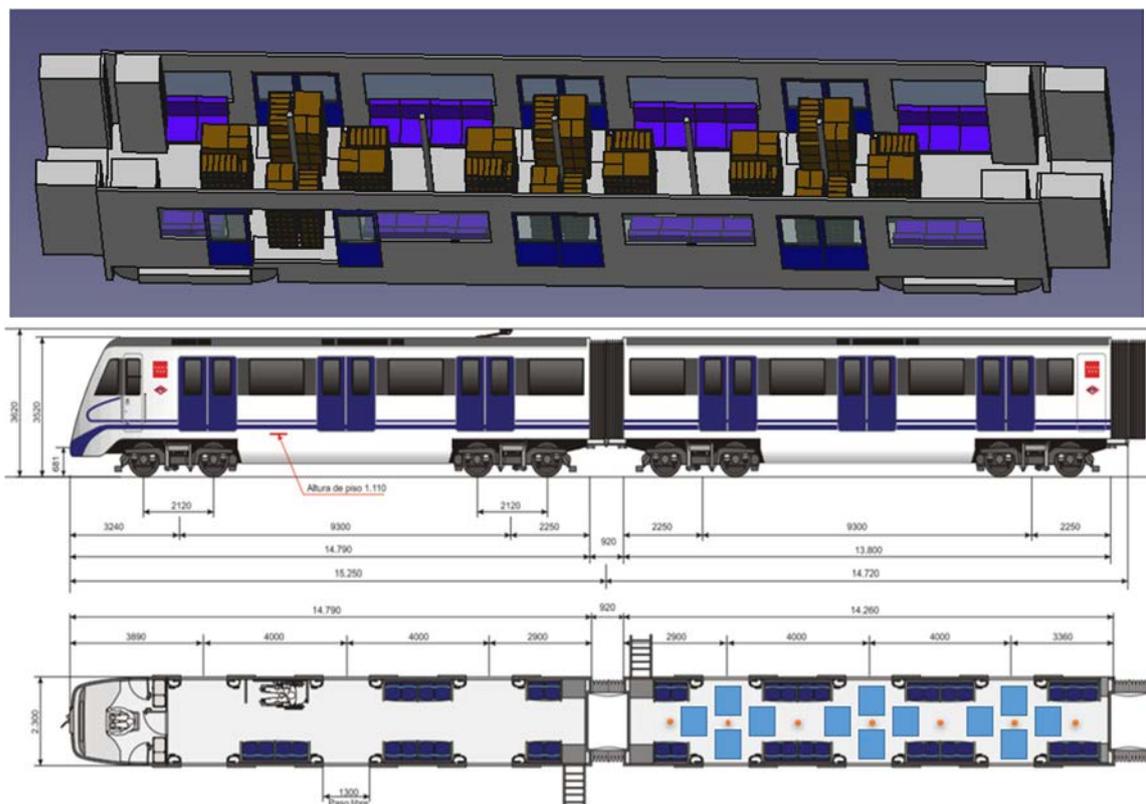


Figura 8. Coche serie 3000 de Metro de Madrid cargado con contenedores rodantes.

Fuente: elaboración propia a partir de Metro de Madrid

(<https://www.metromadrid.es/es>)

6. Transporte desde el depósito de Metro hasta la estación de destino: se transportan los pedidos de *e-commerce* en trenes desde el depósito de Metro (inicio de la ruta) hasta cada una de las estaciones destino donde se descargan los contenedores rodantes con paquetes.
7. Entrega al cliente final en un centro de recogida: la entrega se realiza dentro de la estación en un centro de recogida de paquetes que funciona similar a una tienda de conveniencia o punto de recogida. El operador logístico lleva directamente los paquetes desde el tren hasta el centro de recogida que está dentro de la estación de Metro. Hay una persona que entrega el paquete al cliente.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO

4.1. Diferentes alternativas de aplicación del modelo M4G

Se distinguen dos alternativas del modelo M4G teniendo en cuenta la forma de transportar paquetes dentro de los trenes: trenes compartidos (paquetes + viajeros) o trenes específicos para el transporte de paquetes e-commerce. Se muestran en la Tabla 3:

Alternativa	Características de la entrega	Modo de transporte desde el centro logístico al cliente	Demanda de paquetes
Alternativa 1 (A1)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> en centros de recogida en la estación	HDV + trenes compartidos	DT1
Alternativa 2 (A2)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> en centros de recogida en la estación	HDV + trenes específicos	DT1

Tabla 3- Alternativas y características del modelo M4G

Cada una de las alternativas del modelo M4G se compara con el modelo actual de reparto de paquetes de *e-commerce* a través de LCV, que es el denominado escenario de referencia.

Alternativa	Características de la entrega	Modo de transporte desde el centro logístico al cliente	Demanda de paquetes
Escenario de referencia para la alternativa 1 (A0)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> con LCV en el domicilio del cliente	HDV + LCV	DT1

Tabla 4- Escenario de referencia para las alternativas del modelo

4.2. Cálculo de la demanda de paquetes por Línea

Siguiendo lo explicado en el apartado 2.3. se cuantifica la demanda de paquetes diaria para las alternativas del modelo M4G.

La demanda es igual para ambos casos, ya que las alternativas se diferencian en función del uso de trenes en el transporte (específicos o compartidos). Además, en la Tabla 5 se detallan el número de contenedores rodantes necesarios para el transporte de esos paquetes. Para el cálculo de la demanda, se tienen en cuenta aquellas estaciones que están dentro de la ciudad de Madrid, excluyendo las estaciones de Metro de Madrid que están en ciudades colindantes. De igual forma, se excluyen las líneas 8 y 11 por tener muy poco alcance.

Alternativa A1&A2			
Línea	Paquetes	Contenedores utilizados	Estaciones con centro de recogida
Línea 1	2147	57	Plaza de Castilla, Cuatro Caminos, Sol, Pacífico, Villa de Vallecas
Línea 2	1645	72	-
Línea 3	2086	89	Villaverde Bajo-Cruce, Legazpi, Embajadores, P. España, Moncloa
Línea 4	1319	58	-
Línea 5	1271	34	-
Línea 6	2421	64	Carpetana, Plaza Elíptica, Conde de Casal, Nuevos Ministerios, P. Pío
Línea 7	1416	38	-
Línea 9	1438	39	-
Línea 10	1485	40	-
<i>Total best 3</i>	6654	210	-

Tabla 5- Number of parcels, roll containers and parcel lockers (daily per Line)

La columna Paquetes de la Tabla 5 se corresponde con la suma de las 5 estaciones (donde se situarían los centros de recogida) con mayor demanda de pedidos por cada línea. De estas, se seleccionan las tres líneas de mayor demanda (Total best 3). La estimación de paquetes diarios entregados es de 6654 en 15 estaciones diferentes. Los trenes inician el recorrido en los depósitos de las líneas 1, 3 y 6 y entregan paquetes en los centros de recogida, donde se almacenan hasta que el cliente final retira su paquete. Estos centros de recogida pueden ser también centros que presten servicios alternativos al viajero, como atención al cliente u oficina de objetos perdidos.

Se considera que no hay límite de envío de paquetes por estación (el máximo de entrega diario lo presenta la estación de Sol con 673 paquetes) y la demanda potencial está

formada por la suma de pedidos de *e-commerce* que realizan viajeros de Metro y de los residentes de barrios en los que está la estación donde se encuentra el centro de recogida

4.3. Datos de la modelización

Para realizar el cálculo de los principales indicadores del modelo y sus alternativas, se utilizan datos de partida basados en la literatura estudiada y teniendo en cuenta la opinión de los expertos de las principales empresas del sector de paquetería *e-commerce* en Madrid. Diversos estudios realizados para ciudades distintas (Edwards et al., 2009; Lemke et al., 2016; de Maere, 2018) nos muestran que la productividad de la entrega varía considerablemente según el área donde se realiza. Existen algunas características comunes en toda gran ciudad: a mayor densidad de población, mayor productividad de entrega en la distribución urbana, y existen zonas de alta congestión o críticas, que concentran importantes niveles de actividad económica. Este tipo de zonas, que incluyen sectores como los centros históricos, los distritos comerciales, los de entretenimiento, entre otros, albergan un elevado número de establecimientos comerciales y, por tanto, atraen continuamente una alta intensidad de flujos logísticos (Merchán et al., 2015).

En el presente caso de estudio, se considera el funcionamiento actual de la logística de última milla en Madrid que responde al esquema tradicional, con grandes centros de clasificación y reparto situados en el extrarradio. Se trata de centros logísticos con grandes capacidades y volúmenes. Desde estos centros, y siempre mediante furgonetas ligeras, se accede a los diferentes núcleos urbanos en largos periodos de reparto.

Validación de datos del escenario actual: con objeto de corroborar la fiabilidad de estos datos y particularizarlos a la ciudad de Madrid, durante los meses de enero y febrero de 2020 se llevó a cabo una consulta individual con cuatro expertos de los de los principales operadores logísticos de comercio electrónico que operan en Madrid. A partir de esta información, se estableció en 60-100 paquetes transportados por un mensajero estándar. En cuanto al peso transportado, el grupo de expertos consultados consideró un peso medio de entre 1,5 y 3 kg por bulto. El modelo considera un valor de 2 kg, siguiendo los datos de una encuesta de International Post Corporation (2020).

Con base en la literatura y las opiniones de los expertos, se consideran los siguientes valores con relación al reparto de paquetes de *e-commerce* en la ciudad de Madrid:

- T (jornada laboral) = 8 horas
- Km (kilómetros recorridos) = 90 km
- Pr (paquetes en ruta) = 80
- FTTH (tasa de acierto a la primera) = 25 %
- Pd (paquetes entregados) = 60
- Peso del paquete = 2 kg
- Distancia del centro de cumplimiento electrónico al depósito = 25 km
- Peso del contenedor rodante = 15 kg

- Logística inversa depósito Metro-Centro de consolidación = 5 % paquetes
- Optimización de la carga de camiones desde el centro de cumplimiento electrónico hasta la estación de Metro: >80 % (≥ 22 contenedores grandes o ≥ 35 contenedores rodantes medianos).

4.4. Calculo de costes externos y principales indicadores

Tomando como base el Manual de costes externos de la Comisión Europea (European Commission, 2019), la Tabla 6 muestra la valoración de los costes diarios medioambientales y sociales (€) que supone cada una de las diferentes alternativas de entrega de paquetes de e-commerce. En su segunda columna, se indica el modo de transporte de paquetes que genera la externalidad (furgoneta LDV, camión HDV o Metro).

Coste externo	Modo	DTI		
		Courier (A0)	Shared trains (A1)	Dedicated trains (A2)
Medioambiental	LDV	169,67		
	Ruido Cr		65,89	65,89
		Metro		
	Costes por	LDV Euro 4 Diesel	418,19	
	polución	HDV Rigid 20-26 t EIV	88,69	88,69
	de aire	Metro		23,87
	Cpa			
	Coste de	LDV Euro 4 Diesel	257,50	
	cambio	HDV Rigid 20-26 t EIV	55,75	55,75
	climático	Metro		21,06
Ccc				
Total medioambiental (€/día)		845,36	210,33	255,27
Social	Costes de	LDV Euro 4 Diesel	75,85	
	accidentes	HDV Rigid 20-26 t EIV	5,07	5,07
	Ca	Metro		6,28
	Costes de	LDV Near capacity	2604,93	
	congestión	HDV Near capacity	174,5	174,50
Cc				
Total social (€/día)		2680,79	179,57	185,85

Tabla 6- Costes externos para las diferentes alternativas (A0, A1 y A2)

A continuación, la Tabla 7 compara los principales indicadores para cada una de las alternativas analizadas del modelo M4G (A1 y A2) y del escenario de referencia de reparto a través de furgonetas (A0).

	DT1 (Centros de recogida)		
	<i>Courier</i> (A0)	<i>Shared</i> <i>trains</i> (A1)	<i>Dedicated</i> <i>trains</i> (A2)
Paquetes de <i>e-commerce</i> entregados por día		6654	
Estaciones de Metro utilizadas	-	15	15
Emisiones de CO ₂ LDV/HDV (toneladas/año)	418,25	87,52	87,52
Kilómetros en carretera LDV/HDV (km/día)	9981	500	500
Consumo diésel (litros/año)	144 140	28 635	28 635
Costes medioambientales por paquete	0,127	0,032	0,038
Costes sociales por paquete	0,403	0,027	0,028
Total coste externo por paquete	0,530	0,059	0,066

Tabla 7- Principales indicadores de las alternativas analizadas

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Los costes totales estimados para las alternativas propuestas indican que el uso del sistema ferroviario metropolitano para entregar paquetes de comercio electrónico puede ser una alternativa prometedora desde un punto de vista social y ambiental.

Esta sección analiza los resultados desde varias perspectivas:

1) Coste externo por paquete:

Para poder comparar la eficiencia social y ambiental de cada alternativa, es necesario asociar el coste externo total por cada paquete entregado y para cada una de las alternativas, como se muestra en la Figura 9.

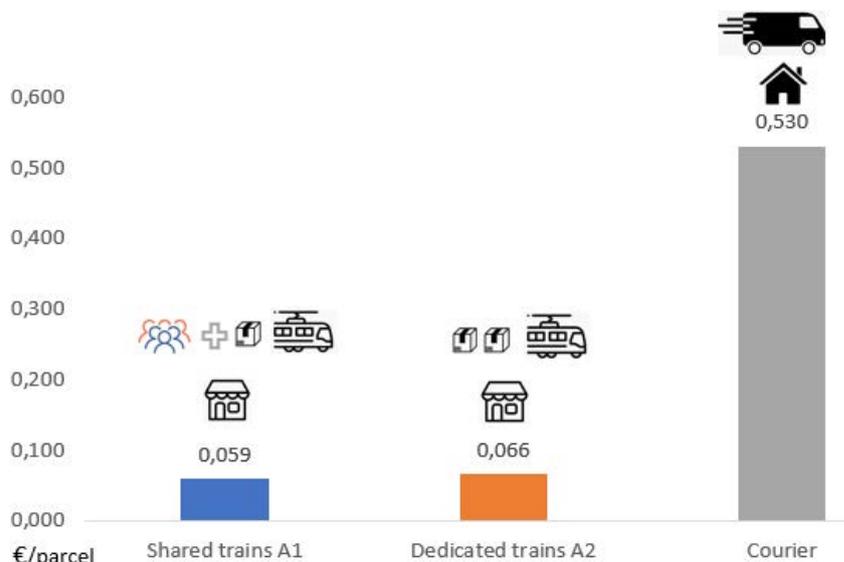


Figura 9. Coste externo (€) por paquete para las alternativas analizadas (A1, A2, A0).

Como se puede observar en la Figura 9, las dos alternativas del modelo M4G presentan unos costes externos notablemente inferiores a la situación de reparto actual mediante furgonetas. En concreto, los costes medioambientales y sociales suponen entre un 88,87 % y un 87,63 % menos que los mismos costes externos del modelo actual de reparto.

Dentro de las alternativas del M4G, los valores son similares y las externalidades provocadas por los trenes específicos son poco relevantes. Como puede verse en el desglose de cálculos de los costes externos de las alternativas con la misma demanda de paquetes, los costes externos de los camiones pesados que viajan a los depósitos de Metro suponen un impacto significativamente mayor que las externalidades de los trenes dedicados que transportan paquetes. Para las alternativas que involucran trenes, la diferencia en los costes externos radica en optimizar el número de camiones pesados que transportan contenedores empleados en el transporte a depósitos de Metro

2) Coste por tipo de externalidad:

Dentro de todos los costes externos, los costes de congestión son los que producen mayor impacto en cualquiera de los escenarios analizados. Dentro del modelo M4G, la congestión media de las dos alternativas (42,0 %) es producida por los camiones que transportan paquetes desde el centro logístico a los depósitos de Metro, y en el caso del escenario actual, la congestión (73,9 %) es producida por el número de furgonetas que reparten desde el centro logístico al domicilio de cada cliente.

Con relación al medioambiente, la polución del aire es el principal causante de los costes debido a la participación dominante que ostenta el transporte como medio por carretera (24,2 % en el caso de M4G y 11,9 % en courier). La externalidad con menor relevancia es el coste que se produce por accidentes con, aproximadamente, un 2 % de los costes externos.

La Figura 10 muestra la media de los costes externos de las alternativas del modelo M4G (A1-A2) y el coste externo del modelo actual de reparto (courier).

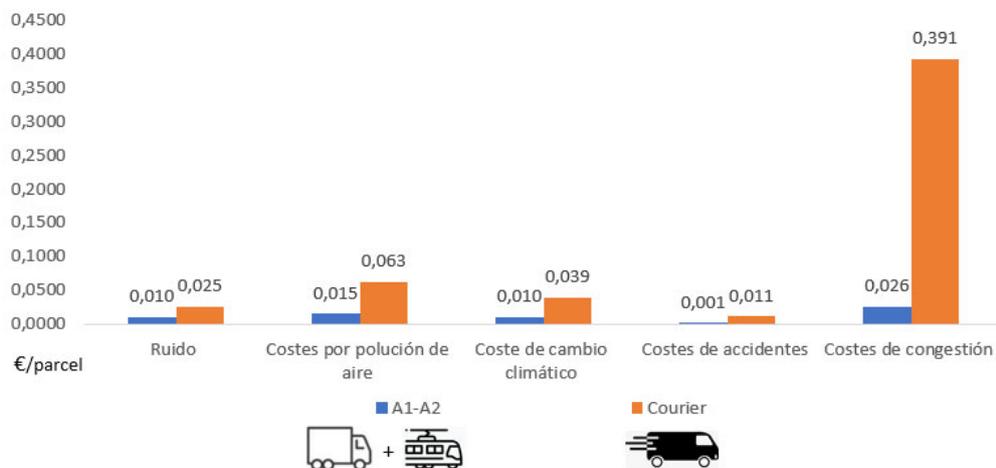


Figura 10: Coste externo promedio por paquete para las diferentes externalidades.

3) Analisis de sensibilidad:

Se considera en este estudio la variación de la demanda de paquetes como consecuencia del incremento o disminución del potencial número de compradores online, es decir, para el caso de estudio: (i) el número de viajeros de Metro, y (o) (ii) el número de residentes en los barrios donde hay una estación de Metro para recoger el pedido online.

Potencial número de compradores online: el porcentaje total de paquetes solicitados por viajeros es del 39,6 % y por residentes del 60,4 %. A priori, estos porcentajes se pueden considerar valores estables con pequeños crecimientos o decrecimientos a lo largo de los años, pero la aparición de la covid-19, si bien no ha tenido incidencia significativa en el número de residentes de los barrios de Madrid, sí que ha supuesto una modificación sustancial en el número de viajeros que utilizan el transporte público metropolitano. En la Figura 11 se muestra la evolución de los residentes en la ciudad de Madrid y la evolución de los viajes en Metro en el periodo 2000-2020.

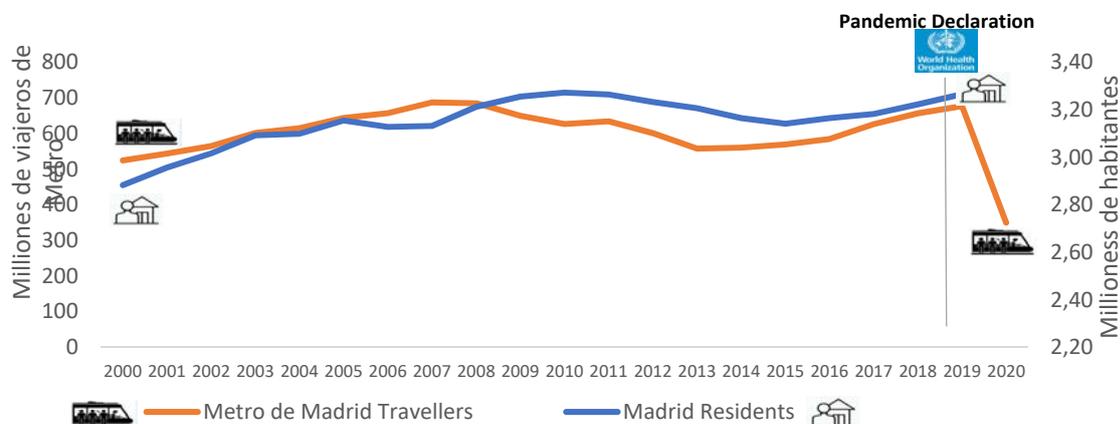


Figura 11: Evolución del número de residentes y del número de viajeros de Metro de Madrid (2000-2020).

Las dos curvas presentan evoluciones similares hasta el año 2020. En ese año, mientras los residentes de la ciudad de Madrid siguen creciendo, la demanda de Metro de Madrid cae drásticamente. En 2019, Metro de Madrid realizaba una media de 2,3 millones de viajes al día, de lunes a viernes. Durante la pandemia, excluyendo los periodos de máxima restricción (marzo-junio de 2020), la demanda de viajeros se mantuvo estable en el 50 % del periodo precovid-19. Desde la Comunidad de Madrid (<https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/12/201221-NP-TRANSPORTES-Balance-y-campa%C3%B1a-transporte-p%C3%ABablico.pdf>), se prevé que se pueda recuperar las cifras previas a la crisis en 2023. Parece factible una recuperación progresiva de la demanda de viajeros, lo que parece más complicado es alcanzar los niveles de demanda de viajeros precovid-19, debido a los cambios sociales y de movilidad que ha experimentado la sociedad.

En el caso de una variación de la demanda de viajeros de Metro (manteniendo la misma estructura de la matriz origen-destino y el resto de variables constantes), la variación de la demanda diaria de paquetes de e-commerce influye solo en los pedidos que realizan los viajeros de Metro.

Ante estos cambios en la demanda de paquetes, las alternativas analizadas presentan costes externos muy estables (Figura 12 y Figura 13). El volumen máximo de paquetes (9981) no requiere trenes adicionales para el caso de la alternativa de trenes específicos y, como se explicó anteriormente, las externalidades provienen principalmente de los camiones que realizan el transporte desde el centro logístico al depósito de Metro. Si no cambian estos parámetros, la variación es casi nula en ambos casos. En términos sociales y medioambientales (costes externos), la opción de reparto a través de M4G es mucho más eficiente que el reparto actual ante cualquier variación de la demanda de paquetes.

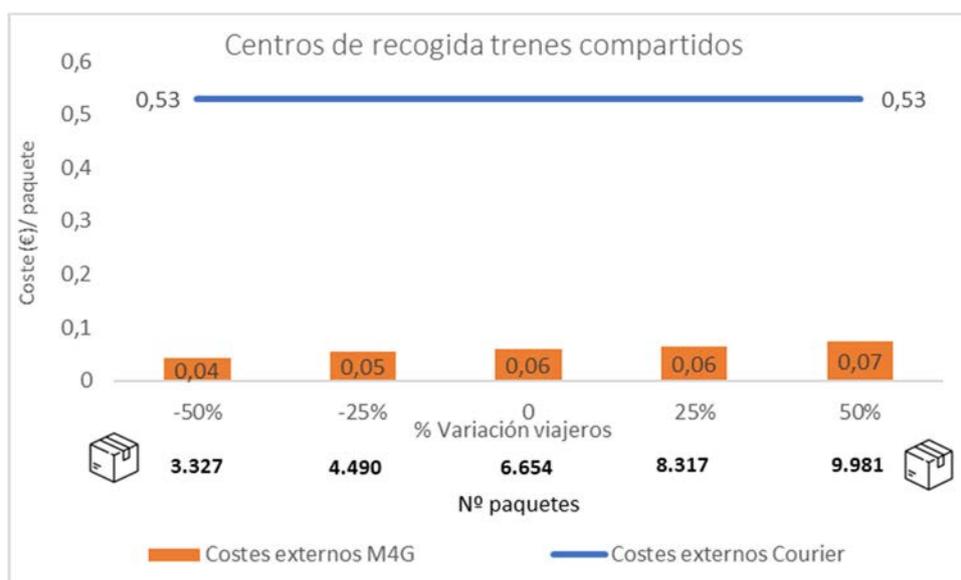


Figura 12. Costes externos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para centros de recogida y trenes compartidos

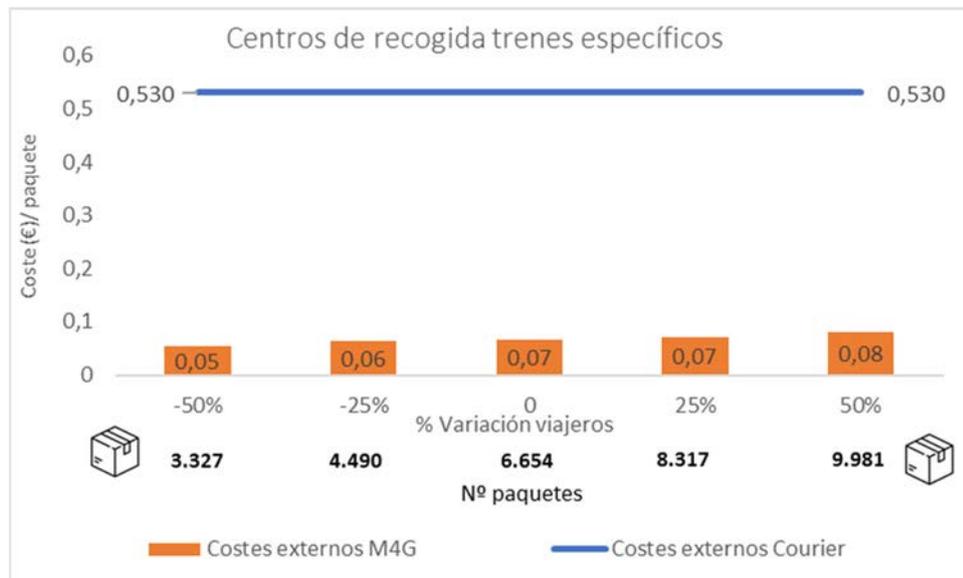


Figura 13. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para centros de recogida y trenes compartidos

Una limitación operativa de esta alternativa se produce cuando el número de paquetes que se concentran en un centro es muy elevado. Por ejemplo, en el caso de un incremento de viajeros en un 50 %, el número de paquetes diarios que se entregarían en la estación de Sol es de 1010, lo que supondría disponer de unas infraestructuras suficientes para almacenar y entregar este volumen de paquetes diarios.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este estudio plantea la cuantificación de los costes externos de un nuevo modelo de entrega de paquetería de comercio electrónico a través de la red de transporte público ferroviario urbano de una gran ciudad.

Los resultados, aplicados a una ciudad como Madrid, buscan dar respuesta a las preguntas planteadas en la introducción. En primer lugar, la demanda de compras por comercio electrónico por parte de viajeros y residentes que viven cerca de las estaciones alcanza un volumen suficiente para justificar el uso de trenes para su entrega. Cabe destacar que las perspectivas de crecimiento del comercio electrónico contemplan mayores volúmenes en el futuro. En segundo lugar, en relación al uso de las infraestructuras y medios necesarios para implementar el modelo, debemos considerar: (i) la capacidad de transporte de paquetería en cada tren, (ii) la posibilidad de emplear trenes dedicados o compartidos, (iii) el horario y carga / descarga de mercancías de los trenes, (iv) la interacción con los viajeros, y (v) el uso de centros de recogida para completar las entregas.

Por último, los costes sociales y ambientales asociados con el modelo de entrega propuesto son considerablemente más bajos que los del sistema actual basado en LCV.

En la actualidad, el coste externo promedio por paquete entregado se sitúa entre 8,0 y 8,98 veces mayor que las alternativas del modelo propuesto. En el caso de los trenes compartidos, las externalidades son generadas por camiones pesados que viajan desde el centro de cumplimiento electrónico hasta la estación de Metro, mientras que en el caso de los trenes dedicados, los costes externos son muy similares a los de los trenes compartidos. Por lo tanto, se deben considerar otras variables para seleccionar entre ambas opciones.

Inevitablemente, surgen varias limitaciones en el estudio, que representan direcciones valiosas para futuras investigaciones. Por un lado, sería valioso cuantificar con precisión todos los costes (económicos, sociales y ambientales), para poder realizar un análisis de costo-beneficio social (SCBA) y así contemplar las necesidades de cada grupo de interés.

Por otro lado, este estudio podría ampliarse considerando otras formas de entrega (taquillas inteligentes, entregas a domicilio, etc.) y evaluando los impactos sociales y ambientales de las principales alternativas existentes actualmente en el comercio electrónico.

Por último, sería interesante conocer la posición de los usuarios de Metro en cuanto a compartir infraestructuras (trenes, ascensores, etc.) en sus desplazamientos fuera de las horas punta.

REFERENCIAS

- ANFAC (2018). Informe anual 2018. <https://anfac.com/publicaciones/informe-anual-2018/>
- ALESSANDRINI, A., DELLE SITE, P., FILIPPI, F. Y SALUCCI, M. V. (2012). Using rail to make urban freight distribution more sustainable. *European Transport \ Trasporti Europei*, 50, pages 1-5.
- ÁREA DE GOBIERNO DE MEDIO AMBIENTE Y MOVILIDAD. (2019). Avance de la Estrategia de Sostenibilidad Ambiental. Madrid 360. <https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMedios/noticias/2019/09%20septiembre/30Lunes/Notasprensa/Presentaci%C3%B3n%20Madrid%20360/ficheros/Avance-Estrategia-Sostenibilidad-Ambiental-Madrid-360.pdf>
- ARVIDSSON, N., GIVONI, M. Y WOXENIUS, J. (2016). Exploring last mile synergies in passenger and freight transport. *Built Environment*, 42(4), 523-538.
- BROWNE, M., ALLEN, J., NEMOTO, T., PATIER, D. Y VISSER, J. (2012). Reducing social and environmental impacts of urban freight transport: A review of some major cities. *Procedia*, 39, 19-33.
- CIVITAS. (2015). Recuperado el 5 de mayo de 2021, de: <https://civitas.eu/es/about>
- COCHRANE, K., SAXE, S., ROORDA, M. J. Y SHALABY, A. (2017). Moving freight on public transit: Best practices, challenges, and opportunities. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(2), 120-132.

- COMISIÓN NACIONAL DE LOS MERCADOS Y LA COMPETENCIA (CNMC). (2020). Data. <http://data.cnmc.es/datagraph>
- COPENHAGEN ECONOMICS (2013). E-commerce and delivery. A study of the state of play of EU parcel markets with particular emphasis on e-commerce.
- DAMPIER, A. and MARINOV, M. (2015); A Study of the Feasibility and Potential Implementation of Metro-Based Freight Transportation in Newcastle upon Tyne. *Urban Rail Transit* (2015) 1(3):164–182
- DELIVERY HERO. (2020, 29 de abril). Quick commerce: Pioneering the next generation of delivery. <https://www.deliveryhero.com/blog/quick-commerce>
- DE MAERE, B. (2018). Ecological and economic impact of automated parcel lockers vs home delivery (Thesis).
- DIZIAIN, D., TANIGUCHI, E. Y DABLANC, L. (2014). Urban logistics by rail and waterways in France and Japan. *Procedia*, 125, 159-170.
- EDWARDS, J., MCKINNON, A., CHERRET, T., MCLEOD, F., & SONG, L. (2009). The Impact Of Failed Home Deliveries On Carbon Emissions: Are Collection / Delivery Points Environmentally-Friendly Alternatives?. Paper presented at Logistics Research Network Conference, Cardiff, United Kingdom. http://www.greenlogistics.org.uk/SiteResources/6b9d9c59-edbd-4b86-b1a5-65c9f8b11d1d_Edwards%20-%20Home%20Deliveries.pdf
- EUROPEAN COMMISSION (2019). Handbook on the external costs of transport. Version 2019. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/studies/internalisation-handbook-isbn-978-92-79-96917-1.pdf>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE). (2020). Madrid: Población por municipios y sexo. <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2881&L=0>
- INTERNATIONAL POST CORPORATION. (2020). Cross-Border E-Commerce Shopper Survey 2019. <https://www.ipc.be/services/markets-and-regulations/cross-border-shopper-survey>
- JIANG, X., TANG, T., SUN, L., LIN, T., DUAN, X. Y GUO, X. (2020). Research on consumers' preferences for the self-service mode of express cabinets in stations based on the subway distribution to promote sustainability. *Sustainability*, 12(17), artículo 7212.
- KIKUTA, J.; TATSUHIDE, I.; IZURU, T.; YAMAMOTO, S.; YAMADA, T. (2012). New Subway-Integrated City Logistics System. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Volume 39, 2012, Pages 476-489
- KOTLER, P. y KELLER, K.L. (2012). Dirección de Marketing. Decimocuarta edición. Pearson Education, Mexico.

LEMKE, J., IWAN, S., & KORCZAK, J. (2016). Usability of the Parcel Lockers from the Customer Perspective – The Research in Polish Cities. *Transportation Research Procedia*, 16, 272-287.

MACHARIS, C. Y KIN, B. (2017). The 4 A's of sustainable city distribution: Innovative solutions and challenges ahead. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(2), 59-71.

MERCHÁN, D. Y BLANCO, E. (2015). The near future of megacity logistics overview of best-practices, innovative strategies and technology trends for last-mile delivery [Technical Report]. MIT Center for Transportation & Logistics.

NACIONES UNIDAD. (2018, 16 de mayo). Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo.

<https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>

ROBINSON, A. M., MORTIMER, P. N. (2004). Urban Freight and Rail – The State of the Art, *Logistics & Transport Focus*, January/February 2004. http://www.bestufs.net/download/NewsEvents/articles/The_State_of_the_Art.pdf

RUSSO, F. Y COMI, A. (2011). A model system for the ex-ante assessment of city logistics measures. *Research in Transportation Economics*, 31(1), 81-87.

SŁADKOWSKI, A., DANTAS, R., MICU, C., ARENA, A. Y SINGHANIA, V. (2014). Urban freight distribution: Council warehouses & freight by rail. *Transport Problems*, 9, 29-43.

STATHOPOULOS, AMANDA, VALERI, E. Y MARCUCCI, E. (2012). Stakeholder reactions to urban freight policy innovation. *Journal of Transport Geography*, 22, 34-45.

VAN DUIN, R., VAN AREM, B. AND WIEGMANS, B. (2019). From home delivery to parcel lockers: a case study in Amsterdam. *The 11th International Conference on City LOGISTICS, 2019, DUBROVNIK (CROATIA)*

WORLD ECONOMIC FORUM. (2020). The future of the last-mile ecosystem <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-the-last-mile-ecosystem>