

Transporte de mercancías al interior de las ciudades utilizando infraestructura ferroviaria: Una revisión ¹

Alexander Rentería Machado ²,

Resumen:

Este documento propone una revisión bibliográfica de la literatura sobre sistema de transporte ferroviario urbano como método alternativo para el transporte de mercancías al interior de las ciudades. En especial, se presenta una descripción básica del proceso de distribución urbana de mercancías (DUM), los problemas asociados a la distribución urbana mercancías, la forma como se clasifican. Asimismo, se presenta estudios recientes relacionados con distribución urbana de mercancías, estudios recientes sobre el uso de sistemas ferroviario para distribución urbana de mercancías, su clasificación, finalmente se presentan los objetivos considerados en los estudios y sus métodos de solución.

Palabras Clave: Transporte urbano de mercancías; logística de ciudad; transporte ferroviario

¹ Monografía Especialización en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

Asesor Temático: Gloria Osorno. Profesora, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia.

Asesor Metodológico: Gloria Osorno. Profesora, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia

² Especialista en Logística Integral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Afiliación profesional

1. Introducción

La distribución de mercancías en áreas urbanas es la última frontera en la cadena de transporte, por esta razón se denomina la “última milla”. En el concepto de distribución de mercancías en áreas urbanas, se incluyen todos los flujos que intervienen en la actividad comercial, el suministro y distribución de bienes en las urbes, asimismo, el movimiento de mercancías (entregas, recogidas, transferencias, carga y descarga, ubicación, almacenamiento, retorno), [1] .

Actualmente, el parque automotor involucrado en la distribución de mercancías en áreas urbanas significa una gran carga para la red vial de las ciudades en términos de congestión, contaminación del aire, y accidentes. No es conveniente tratar de darle solución al problema a través de la construcción de nuevas vías, que inevitablemente volverán a congestionarse con el incremento del tráfico, ocasionando la reaparición de las externalidades [2]. Además, el e-commerce y particularmente el B2C, originan una gran cantidad de entregas puerta a puerta que incrementan los costos ambientales y sociales, [3].

La distribución de mercancías en áreas urbanas es fundamental para el crecimiento económico de los centros urbanos, sin embargo, es uno de los mayores generadores de congestión del tráfico, factor principal en la disminución de la eficiencia logística en las ciudades. Asimismo, el modelo clásico de entrega de mercancías tiene asociados unos costos y tiempos elevados, los cuales afectan directamente la capacidad de cubrir las demandas inmediatas y de rápida respuesta y, en consecuencia, se disminuye la competitividad de las empresas y de la economía en general. Además, los costos operativos varían de acuerdo con el horario en el que se hace la distribución de mercancía, razón por la cual, la reducción en la velocidad del flujo vehicular, ocasionado por el proceso de distribución de mercancías, deriva en baja productividad y afectaciones al medio

ambiente, debido a que la utilización de camiones es causante del 40% de los contaminantes dentro de las ciudades, [4], razón por la cual, abordar el problema de distribución de mercancías en áreas urbanas, es un factor importante para la administración de la movilidad en las ciudades, debido a su gran influencia en las actividades diarias y la calidad de vida de la población urbana, [1], [5].

Las ciudades, son el escenario ideal para revertir los efectos del cambio climático. Debido a que albergan más del 50% de los habitantes, lo que se refleja en un aumento de la actividad comercial y alta demanda de energía por el movimiento de bienes, esto las convierte en el espacio ideal para experimentar nuevas tecnologías y modelos de transporte, [6]. Además, los organismos de transporte público cuentan con activos e infraestructura, como estaciones y redes de tren ubicados en el área urbana y que en la mayoría de los casos son subutilizados, específicamente en las horas valle. En estas condiciones, existe la oportunidad de utilizar estos bienes para la distribución de mercancías como un medio para disminuir el flujo vehicular innecesario en los centros urbanos, aumentar la eficiencia de los activos existentes, y principalmente, para hacer productiva la logística de ciudad, menos vehículos en las vías equivale a un sistema independiente, que puede cubrir toda la ciudad y estar al alcance de los clientes, [7]. Esta es la premisa principal de un sistema ideal, [5]. En este orden de ideas, el transporte ferroviario urbano como alternativa de transporte de mercancías en las ciudades es una tendencia creciente en el mundo, los sistemas de trenes urbanos y metros son un modelo alternativo para la distribución de mercancías dentro de los centros urbanos. En este modelo el mismo tren es dividido entre vagones de pasajeros y vagones de carga, [4]. En este documento se presenta una revisión de la literatura sobre un nuevo concepto para el transporte de mercancías dentro de la ciudad utilizando el sistema ferroviario.

El objetivo de este documento es presentar una revisión bibliográfica de la literatura sobre sistema de transporte ferroviario urbano como método alternativo para el transporte de

mercancías al interior de las ciudades. Además, en cada uno de los estudios revisados se analizaron los principales problemas asociados a la DUM que buscan solucionar, el objetivo de la investigación, así como los métodos de solución que han implementado. Este análisis se realiza a estudios hallados en artículos de revista, actas de conferencia, sitios web y libros que representan los últimos 7 años de trabajo en este campo. La consulta de la literatura se adelantó en las bases de datos Google Académico, Scopus y ScienceDirect utilizando términos de búsqueda que coincidieran como palabras claves “City logistic”, “rail transit”, “urban freight”, “moving freight”, “Sustainable urban freight transport” “urban freight by rail”. Asimismo, se identificaron estudios adicionales usando algunas referencias de los documentos revisados.

Este documento se divide en 4 secciones, en la segunda se describe el proceso de DUM y se plantea una clasificación de los problemas asociados a la DUM en cuatro categorías, asimismo, se presenta un análisis de los estudios de DUM revisados. En la tercera sección se analizan los estudios sobre DUM utilizando la alternativa del ferrocarril, sumado, se identifican los objetivos de estudio y los métodos de solución. Al final, en la sección cuarta se presentan las conclusiones.

2. El proceso de distribución urbana de mercancías

En el proceso de distribución urbana de mercancías interactúan un sin número de agentes que se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo a los servicios de logística y transporte que ofrezcan o demanden (operadores logísticos). En tal sentido, debido a la necesidad de organizar y expedir normativa que regulen el proceso, las ciudades se han transformado en un agente importante. De igual forma, los ciudadanos, como protagonistas de la infraestructura vial, están directamente relacionados con el proceso, debido a que les afecta de forma directa las externalidades ocasionadas por la DUM, [1].

La cadena de aprovisionamiento comprende varias etapas desde el abastecimiento hasta el cliente final, tal como se ilustra en la figura 1. La distribución de mercancías en áreas urbanas se ubica en la última etapa, sin embargo, no debe restársele importancia. Los productos deben ser entregados en las mejores condiciones a los clientes y, asimismo, la eficiencia y la reducción de costos están entre los factores más importantes. Por esta razón, la distribución urbana de mercancía toma una mayor relevancia; la relación con otros actores en el contorno urbano, algunos como el tráfico rodado (de transporte público de pasajeros), igual que los diferentes puntos de abastecimiento en un área definida con unas características urbanas inciertas, que le dan suprema importancia; por eso, en la mayoría de los casos, deben estudiarse con mucho rigor las causas que ocasionan el problema en las labores diarias de distribución, [8].

Existen tres características fundamentales que influyen en la distribución urbana de mercancías:

La infraestructura vial y su influencia, que hace referencia a calles con sentido unidireccional o bidireccional, semáforos, glorietas, trabajos en la vía, problemas generales del flujo vehicular, zonas especiales entre otros.

La estrategia de distribución, por ejemplo, la de clientes a surtir, los tiempos de carga, espera y descarga, los horarios de recibo y despacho de mercancías, entre otros.

Las características de los vehículos, que debe acomodarse a las de infraestructura vial (dimensiones de la vía, zonas de cargue y descargue) y a la estrategia de distribución.

La distribución urbana de mercancía supone un sistema múltiple que integra componentes del transporte, desarrollo urbano y de infraestructura, las estrategias logísticas de los operadores, los consumidores y los conductores, asimismo debe tener en cuenta la dificultades en el tráfico vehicular, y limitaciones en los vehículos, además de un flujo permanente de información entre estos; que implica que las diferentes partes trabajen bajo una filosofía colaborativa para alcanzar resultados eficientes, [9].

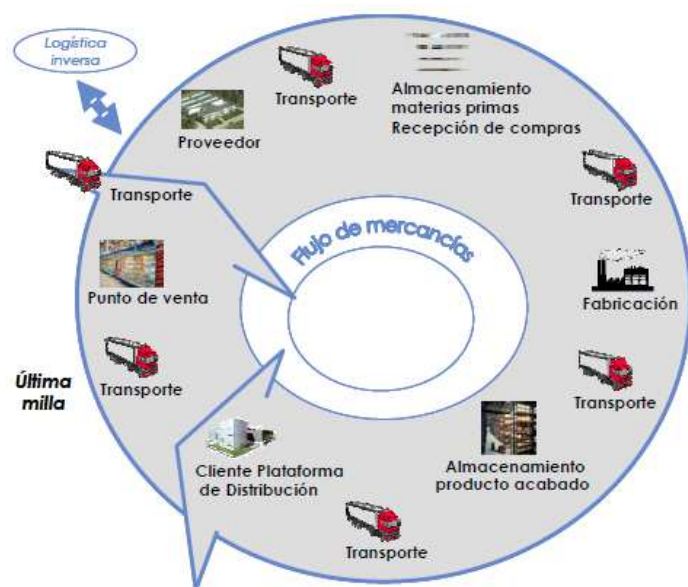


Figura 1. Cadena de logística.

Fuente: Pérez (2008)

En tal sentido, se puede afirmar que existen otros factores que inciden específicamente sobre la distribución urbana de mercancías en las ciudades y que relacionamos a continuación:

La disminución de los inventarios en destino, esto es, el dominio de la demanda ha posibilitado a las compañías controlar sus pedidos de manera que los costos asociados al almacenamiento se reduzcan significativamente, dando paso a un incremento en el número de despachos realizados, y su vez, un aumento en las labores de carga y descarga.

El incremento general en la variedad de productos ha originado un aumento exponencial en la cantidad de despachos en los últimos años, producto del aumento en la variabilidad de preferencias y gustos de los clientes.

Las nuevas tendencias de consumo, relacionados al comercio electrónico y que se han normalizado en los últimos años, transforman a cualquier ciudadano en cliente potencial y posible receptor de distribución urbana de mercancías o distribución capilar; lo que se llama B2C. La dificultad de la distribución urbana se agudiza, debido a que ahora el despacho puede efectuarse a un cliente ubicado en una dirección indeterminada de una ciudad, [10]

2.1 Problemas asociados a la distribución urbana de mercancías

La gestión eficiente y ecológica de la distribución urbana de mercancías, demanda una sincronización e integración de todas las partes que en ella intervienen, debido a que individualmente se buscan fines distintos, no obstante, estos deben aproximarse en algún punto, para encontrar soluciones convencionales. Es necesario señalar los fines generales de la logística urbana, los cuales pretenden obtener sostenibilidad, movilidad y habitabilidad a través del equilibrio entre el desarrollo económico de las ciudades y un medio ambiente sostenible, [3].

Los problemas asociados a la distribución urbana de mercancías fundamentalmente se componen de cuatro grandes aspectos: integración, coordinación, sostenibilidad y habitabilidad, y la movilidad, como lo sugiere, [11], estos pueden aparecer en la mayoría de las acciones que se desarrollan en la distribución urbana de mercancías, [8].

Evidentemente, existen otros aspectos a los que otros autores le dan igual importancia, es el caso de la congestión en sectores céntricos de las ciudades, normalmente ocasionada por ciudadanos en vehículos particulares, que frecuentan dichas áreas con intenciones comerciales. Además, los costos logísticos y los riesgos de incremento del costo de vida local, no obstante, en su mayoría pueden entenderse como resultados o efectos de políticas públicas o iniciativas empresariales para sostener beneficios.

2.1.1 Integración

Se refiere a la participación de todos los agentes en el sistema, desde la obtención de los datos hasta el enrutamiento de los vehículos, considerando sus características individuales y los intereses que persiguen, [12], [13], [14], la utilización de tecnologías de la información es indispensable para realizar esta integración, [15] .

2.1.2 Coordinación

Los inconvenientes de coordinación se generan cuando se cuenta con una variedad recursos o activos pertenecientes a varios agentes (operadores logísticos, gobierno local y ciudadanos) y existe la necesidad de que se trabaje conjuntamente para reducir simultáneamente los costos logísticos, mejorar la prestación del servicio, disminuir la congestión vehicular y reducir los niveles de contaminación ambiental, [16], [14], [17] . En síntesis, trabajar en el logro de objetivos compartidos de manera que el uso de todos los activos disponibles en la ciudad como vehículos y vías e infraestructura pública se utilice de forma eficiente y logre un resultado positivo, [18], [19]. [20], [21], muestra como los modelos soportados por las herramientas TIC, se articulan para incrementar la colaboración y compartir los recursos disponibles en el proceso de distribución urbana de mercancías, [15].

2.2 .3 Sostenibilidad y habitabilidad

Hace referencia a las consecuencias que tiene la distribución urbana de mercancías sobre los tres factores primordiales ambiental, económico y social y la forma en que se pueden reducir los impactos colaterales de contaminación, tráfico inseguro, accidentalidad, ruido, retrasos en las entregas y disminución del nivel de servicio, [14], [20].

2.2.4 Movilidad

Se relaciona con los problemas de flujo de vehicular de acuerdo al sistema de transporte y de la variedad de alternativas para realizar las entregas a los consumidores y satisfacer las necesidades

a un costo razonable para los operadores y el cliente, además, aumentar el cumplimiento de los tiempos estipulados, [22], [23] .

2.3 Casos de éxito sobre transporte urbano de mercancías

Aunque existen algunas experiencias exitosas de distribución urbana de mercancías utilizando los activos públicos como vías, vehículos de transporte público existente en las ciudades, no es una operación muy común. Esto debido a razones de índole políticas, logísticas y paradigmas organizacionales, [7]. No obstante, hay una tendencia creciente en la literatura sobre estudios de distribución urbana de mercancías, tal como se ilustra en la figura 2, específicamente, la estrategia de Freight of Transit (FOT) que se centra en la utilización del transporte y la infraestructura pública para el movimiento de mercancías al interior de las ciudades. Es el caso de, [24], que plantean la posibilidad de implantar un sistema de tránsito rápido a pedido de mercancías y pasajeros en áreas urbanas, con el objetivo de utilizar la capacidad de tránsito de las ciudades de manera eficiente e integrada, aprovechando las propiedades comunes del tránsito rápido de personal (PRT) y del tránsito rápido de carga (FRT). Asimismo, [25], se proponen modelos en el que las personas y los paquetes se transportan de forma integrada a través de la misma red de taxis, los beneficios para la ciudad estarían reflejados en reducción en la congestión vehicular y la contaminación ambiental. Por otro lado, los operadores de taxis pueden ampliar su portafolio de servicios con la entrega de paquetería. [26] Estudian los problemas principales de la primera y la última milla en el transporte de mercancías y pasajeros, y sobre esa base, se analizan las compatibilidades entre ellos para compartir la utilización de los activos, en función de tiempo espacio y vehículo. [27], estudia la distribución de última milla, para el sector de alimentos frescos y los procesos de entrega de alimentos a los comerciantes urbanos, es decir, cadenas minoristas, distribuidores independientes y el sector de hoteles, restaurantes y catering (Ho-

Re.Ca). [28], Este documento, plantea la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles como medida para reducir el calentamiento global, y a su vez, alerta a las compañías de construcción en la posibilidad de que en el corto plazo se reduzca la construcción de vías en las ciudades, para dar paso a alternativas más amigables como el ferrocarril. [29], estudian un problema de ruteo de stock de dos niveles para productos con vencimiento próximo. Las mercancías se remiten desde un suministrador a una bodega intermedia, donde es posible su almacenaje o envío a través de pequeños vehículos a los consumidores. Lo que se persigue es la reducción de los costos de traslado y almacenamiento. [30], analizan los efectos de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la generación de contaminantes y el costo CO₂. Presentan un patrón de ruteo verde de entero (0-1 lineal) para UAV para examinar los beneficios para el ambiente con utilizando vehículos aéreos no tripulados para distribución urbana de mercancías. [31], estudian un problema que se origina a nivel metódico para determinar la forma de distribución de mercancías en última milla, en una localidad contemplando varias empresas de transporte con diferentes costos y nivel de servicio. [32], modifican el problema del vendedor ambulante, para planear la distribución urbana de mercancías en la última milla integrando drones, lo que deriva en un problema de ruteo que integra al vehículo de reparto y al avión no tripulado, [33]. [34], estudian la utilización de módulos eléctricos que se pueden adaptar o remover a los vehículos utilizados en la distribución urbana de mercancías, con el objetivo de aumentar la capacidad y disminuir los retrasos en las entregas. [35], tratan el desarrollo del comercio electrónico y su influencia en la distribución de mercancía de entrega de “última milla”, señalan que la entrega de productos debe complementarse con operadores de transporte y que el objetivo debe estar orientado a la satisfacción del consumidor final. [36], se concentra en estudiar la conducta de la intervención del cliente en la creación conjunta de valor en el servicio logístico, usando la servucción como mecanismo para la creación de experiencias, menciona ejemplos

recientes como el Smart lockers. [16], presentan Car4Pac, un sistema de reparto de mercancías soportado en la utilización compartida de los viajes en las ciudades, aprovechado las bondades del (IoT) en la accesibilidad y visibilidad de la información de los vehículos en cualquier momento y lugar. [37], presentan un caso de enrutamiento sobre vehículos eléctricos de dos niveles (E2EVRP) como un problema arquetípico y formulan una metaheurística de pesquisa por barrios (LNS) grande, de igual modo un algoritmo de programación exacta, que usa técnicas de análisis para precisar resultados satisfactorios de nivel principal sumado con funciones de limitación y computo de rutas de nivel secundario.

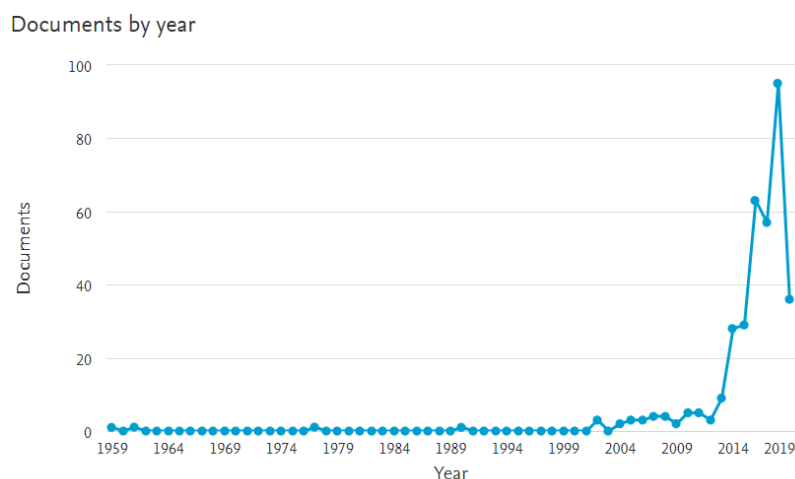


Figura 2. Publicaciones por año sobre distribución urbana.

Fuente: Scopus (2019)

3. Estudios recientes sobre el uso de sistemas ferroviario para distribución urbana de mercancías.

En los últimos años, la disminución de la accesibilidad a las vías en las ciudades y las restricciones en los centros urbanos por razones ambientales, han motivado un incremento en las

iniciativas de investigación que buscan soluciones de carga basados en el uso del ferrocarril, tal como se ilustra en la Figura 3. Con relación a esta tendencia creciente, se encontró que aproximadamente una docena de estudios han propuesto métodos de optimización, modelos de programación y técnicas de simulación, para la distribución urbana de mercancías a través de los sistemas ferroviarios. En ese sentido, se puede encontrar a, [10], que propone la operación de un sistema de recogida y entrega de paqueterías utilizando la infraestructura de transporte público de la ciudad a través de taquillas automatizadas ubicadas en las estaciones del metro de la ciudad de Roma. [4], propone un novedoso modelo para el transporte de mercancías en áreas urbanas, en el que se plantea la utilización del sistema ferroviario como medio de transporte para pasajeros y mercancías dentro de la ciudad, considera una única línea de ferrocarril en la que algunas estaciones pueden usarse como plataformas de carga / descarga de mercancías, la demanda se conoce anticipadamente y cada cliente desea un tiempo diferente para la entrega. Primero describen el caso de dos estaciones para las cuales se presentan un algoritmo de aproximación y un algoritmo de programación dinámica pseudo-polinómico, que es. Luego, extendemos la configuración a varias estaciones y desarrollamos un método heurístico, dos modelos enteros mixtos y una restricción. . Por otro lado, [38], se concentró en estudiar la utilidad de la antigua infraestructura ferroviaria en algunas regiones de Austria, para el transporte de mercancías en las primeras y últimas millas. [39], estudia la tendencia creciente de utilizar el ferrocarril para el transporte mercancías en áreas urbanas, y propone una metodología para la simulación de la demanda en este medio. Mas adelante, resalta un nuevo contexto de modelado y se comparten resultados que posibilitan determinar la opción de transporte ferroviario. [40], estudia un caso real del proyecto “Grand Paris”. Investigan una opción de transporte sostenible que utilice la red ferroviaria urbana, al suministrar instrumentos que soportan la toma de decisiones estudiando la viabilidad técnica, el efecto en los servicios a los usuarios, los requerimientos de infraestructura y

en consecuencia de inversión. [41], hace una revisión de la literatura y estudia los elementos implicados en la escogencia de este modo y, por último, recuerda un nuevo escenario de modelado y plantea progresos que posibilitan determinar la alternativa de transporte ferroviario. [42], estudia la forma diferente de movilizar la carga usando la infraestructura ferroviaria. En vez de utilizar camiones para el transporte de mercancías, analiza la forma de utilizar la estructura ferroviaria existente. En primer lugar, se formulan múltiples problemas de toma de decisiones vinculados a la logística de ciudad, la problemática estudiada tiene que ver con una línea de cercanías en la que se puede utilizar como plataforma de cargue/descargue. En segundo lugar, se analiza un modelo de programa lineal de enteros mixtos (MILP), para reducir la totalidad en el tiempo de espera de los repartos diarios, de manera que cada paquete se traslade desde su estación de salida hasta la de llegada. [43], resalta los retos técnicos y operativos en el uso de trenes de carga, en la red ferroviaria de uso masivo con tráfico múltiple, en el plano del gasto en la capacidad ferroviaria. El objetivo de la investigación es establecer la influencia de las propiedades del ferrocarril de carga en el consumo de capacidad en redes ferroviarias de flujo múltiple. Diseña un patrón de efecto para detectar los impulsores de capacidad y, en conclusión, para mostrar maneras eficientes de aprovechar la capacidad en la red urbana de tren. [44], plantea un nuevo sistema de transporte de logística urbana, apoyado en los activos públicos existentes. En contraste con la dinámica de operación actual de la carga en el sector logístico, esta modalidad permitiría el traslado de mercancías aprovechando el transporte de pasajeros y disminuyendo sustancialmente el parque automotor de las empresas dedicado al traslado de mercancías. [45], estudia un mecanismo de planeación para el sistema de logística subterránea, apoyado en la infraestructura del sistema metro. Inicialmente, se estableció un modelo de verificación del flujo de carga de subterránea teniendo en cuenta el nivel de servicio, el volumen de carga y la facilidad local. Luego, se implementó una serie de patrones de programación de enteros mixtos para

solucionar el problema de la asignación- ubicación (LAP) inmejorable de los nodos en la red. [46]proponen la utilización de la bicicleta como transporte adicional para enlazar con el sistema ferroviario, con el objetivo de mejorar el funcionamiento del transporte urbano y dar solución al “problema de última milla”. Tomar la bicicleta como la herramienta complementaria para conectar con el transporte ferroviario no solo puede resolver "el problema de la última milla", sino también mejorar la eficiencia general de operación del transporte urbano. [47], nos describe el proyecto Experimental Tranfret que se encuentra en etapa de ensayo y evaluación y que utiliza un tranvía de pasajeros reciclado como tranvía para el transporte de mercancías para comerciantes minoristas en la ciudad de Saint Étienne.

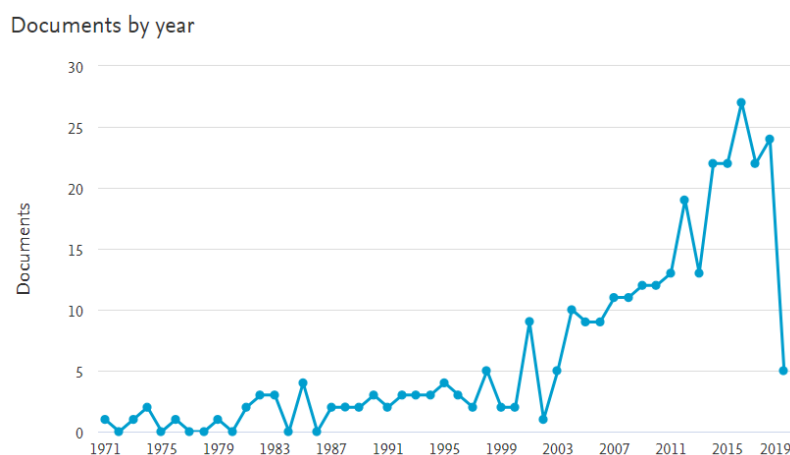


Figura 3. Publicaciones por año sobre distribución urbana con alternativa ferroviaria.

Fuente: Scopus (2019)

3.1 Clasificación de los estudios sobre distribución urbana de mercancías a través de los sistemas ferroviarios.

Los estudios sobre sistemas ferroviarios como alternativa para la distribución urbana de mercancías son recientes y hasta ahora los investigadores se han concentrado en plantear estudios que apuntan a solucionar problemas de movilidad, sostenibilidad y coordinación.

Los problemas de movilidad tienen como principal característica que proponen la utilización de la infraestructura ferroviaria para disminuir los tiempos de entregas a los clientes y satisfacer las necesidades a un costo razonable, [4], [44], [41]. Por otro lado, los estudios sobre sostenibilidad y habitabilidad, proponen la utilización del ferrocarril como alternativa para el transporte urbano de mercancías, con el objetivo de reducir las consecuencias sobre los tres factores primordiales ambiental, económico y social y la forma en que se pueden reducir los impactos colaterales de contaminación, tráfico inseguro, accidentalidad, ruido, retrasos en las entregas y disminución del nivel de servicio, [42] . Asimismo, en los estudios de coordinación se proponen soluciones para la utilización eficiente de la infraestructura ferroviaria en las ciudades, sobre la base del trabajo conjunto con otros agentes, para reducir simultáneamente los costos logísticos, mejorar la prestación del servicio, disminuir la congestión vehicular y reducir los niveles de contaminación ambiental, [10], [40], [43], [45], [47], [48].

3.2 Objetivos considerados en los estudios sobre distribución urbana de mercancías utilizando los sistemas ferroviarios.

Los estudios sobre movilidad se han planteado por ejemplo para minimizar los niveles de inventario en las estaciones de salida, [4], para minimizar las demoras para los clientes que establecen fechas límites de entrega, [4], [44], para modelar la demanda ferroviaria en un contexto urbano, primero estudian la posibilidad de utilizar la infraestructura ferroviaria urbana para la entrega de mercancías de un punto a otro dentro de los límites de una ciudad. Como segunda contribución es el desarrollar un marco matemático para resolver la asignación de la demanda a los trenes para reducir el tiempo de espera.[41]. Los estudios sobre problemas de sostenibilidad y habitabilidad se han desarrollado por ejemplo para estudiar la viabilidad técnica de la alternativa de transporte de carga urbana utilizando la red ferroviaria de

pasajeros, [42]. Las investigaciones sobre problemas de coordinación se han propuesto, por ejemplo, medir la voluntad de los usuarios del metro de actuar como posibles transportistas públicos, [10], para analizar las posibilidades de una utilización reforzada de la infraestructura ferroviaria para el transporte de mercancías en las primeras y últimas millas dentro de las regiones urbanas de Austria, [40], para investigar los factores involucrados en la elección de logística urbana multimodal, basada en el uso del ferrocarril, [43], para determinar el efecto de las características del tren de carga en el consumo de capacidad en redes ferroviarias de tráfico mixto, [45], para desarrollar un método de planificación de red ULS (Sistema Logístico Subterráneo) basado en el sistema de metro, [47], para predecir los cambios probabilísticos de los pasajeros, [48].

3.3 Métodos de solución utilizados en los estudios sobre distribución urbana de mercancías a través de los sistemas ferroviarios.

Debido a limitaciones de orden financiero, técnico, político y jurídico, además de la complejidad que supone realizar experimentación directa en un sistema real, es normal que los investigadores utilicen algunos métodos y modelos como los que presentan en la Tabla 1. en la cual también se relacionan los objetivos de los estudios recordando el método de solución que se implementó para su logro. Es importante mencionar que en los estudios revisados no se establecen patrones de utilización hacia un método de solución específico.

Los métodos de solución otorgan la posibilidad de hacer estudios sin incurrir en inversiones elevadas y situaciones de riesgo. Asimismo, pueden ser utilizados para determinar las fallas en la posible implementación de los sistemas. A continuación, se describe la manera como se han utilizado estos métodos de solución.

La primera metodología de recolección de datos que se relaciona en la Tabla 1, es la encuesta de preferencia revelada, que es una técnica de recolección de datos fundamentada en las preferencias de elección de un individuo, sobre opciones que aún no existen en la realidad. Esta técnica es comúnmente utilizada para estudiar la preferencia de consumo de las personas ante un nuevo producto o servicio. Una implementación de esta metodología la expone, [10], quienes utilizan esta técnica para para identificar los aspectos más relevantes asociados a la posibilidad de servir como transportista de multitudes, que es la alternativa de que los usuarios de metro puedan transportar paquetes para otros clientes que coinciden con su destino, (del lado de la oferta de servicios) asimismo con la capacidad de usar el servicio de envío de multitudes (del lado de la demanda de servicios). En el estudio se investiga el comportamiento del agente usando modelos de elección discreta en el que la probabilidad de que se elija una alternativa se define como la probabilidad de que dicha alternativa tenga la mayor utilidad entre el conjunto de alternativas posibles. Los escenarios de preferencia declarada se adecuan a la ciudad de Roma, se usan como un caso de estudio, y su sistema metro para entregas B2C. El estudio plantea una situación hipotética en la cual los paquetes pequeños pueden recogerse y dejarse en los armarios automatizados localizados en las estaciones del metro. Para resolver este problema se aplicaron dos encuestas, una dirigida a 240 habitantes de la ciudad de Roma, y la otra para 240 usuarios del metro, [48]. Se estableció un método de muestreo conveniente y alrededor de dos tercios de las entrevistas se aplicaron a través de correo electrónico y por redes sociales, mientras que el tercio restante se realizó cara a cara. El cuestionario se dividió en cuatro secciones; Socio-demográfico: reúne información sobre variables de género, edad, nivel educativo, trabajo y conducta. Configuración del viaje: estudia los aspectos del viaje primordial a domicilio. Los lugares de origen y destino, además, los tiempos de viaje son datos comunes recopilados en las dos encuestas. El cuestionario dirigido a los habitantes de la ciudad reúne datos sobre las estaciones

de metro involucradas, el método de ingreso/salida hacia/desde las estaciones de metro, así como la suscripción al transporte público. Construcción de situaciones de envío masivo calificadas a través de situaciones de preferencia declarada; El cuestionario dirigido a los habitantes de la ciudad estudia el papel que ejecutan los armarios automatizados en la localización, el pago, la reserva de entrega y los modos alternativos y Declaraciones de comportamiento adicionales: esta sección tiene como propósito identificar otras cualidades y conceptos del servicio, así como fallas específicas (por ejemplo, desvío de ruta normal) para el posible transportista de multitudes (salir de las estaciones del metro frecuentes o desplazarse fuera de las mismas), o el periodo de tiempo más acostumbrado para recolección del paquete para el posible comprador de envío de personas.

Tabla 1 Métodos de solución utilizados en los estudios sobre distribución urbana de mercancías a través de los sistemas ferroviarios.

Método de solución	Objetivo de investigación	Problema	Referencia
Instrumento de recolección de datos, Encuesta de preferencia declarada	Medir la voluntad de los usuarios del metro de actuar como posibles transportistas públicos.	Coordinación	[10]

	Minimizar los	Movilidad	[4]
	niveles de		
	inventario en		
	las estaciones		
Optimización a partir	de salida		
de modelos	/Minimizar las		
matemáticos.	demoras para		
	los clientes		
	que establecen		
	fechas límites		
	de entrega.		
	Analizar las	Coordinación.	[37]
	posibilidades		
	de una		
	utilización		
	reforzada de		
Caso de estudio	la		
	infraestructura		
	ferroviaria		
	para el		
	transporte de		
	mercancías en		
	las primeras y		

	últimas millas		
	dentro de las		
	regiones		
	urbanas de		
	Austria		
	Modelar la	Movilidad	[41]
	demanda		
	ferroviaria en		
	un contexto		
	urbano.		
	Estudiar	Sostenibilidad	[42]
Simulación	viabilidad		
	técnica de la		
	alternativa de		
	transporte de		
	carga urbana		
	utilizando la		
	red ferroviaria		
	de pasajeros		
	en el proyecto		
	“Grand Paris”.		
Modelado de elección	Investigar los	Coordinación	[43]

discreta.	factores involucrados en la elección de logística urbana multimodal, basada en el uso del ferrocarril.		
Modelo de impacto	Determinar el efecto de las características del tren de carga en el consumo de capacidad en redes ferroviarias de tráfico mixto	. Coordinación.	[45]
Modelo de programación de	Minimizar el tiempo total de espera de	Movilidad	[44]

enteros mixtos	las entregas		
	diarias		
	Desarrollar un	Coordinación.	[47]
	método de		
	planificación		
	de red ULS		
	(Sistema		
	Logístico		
	Subterráneo)		
	basado en el		
	sistema de		
	metro		
	Predecir los	Coordinación	[45]
Modelo de regresión	cambios		
logística multinomial	probabilísticos		
	de los		
	pasajeros		

Por ejemplo, [4], proponen un marco de optimización para la utilización del transporte ferroviario urbano/suburbano como alternativa para transporte de mercancías, examinaron métodos para la optimización de la operación de trenes o vagones de ferrocarril que transportan mercancías desde la estación de embarque a las de llegada.

Dichos trenes comparten el mismo ferrocarril que los trenes dedicados al transporte pasajeros, sin embargo, se concentran en el transporte de mercancías. Primero estudiaron el escenario de dos estaciones y desarrollaron un algoritmo de aproximación de 2 y un algoritmo de aproximación dinámica pseudo- polinómica (DP). Seguido, ampliaron el problema con múltiples estaciones de salida y llegada. Modelaron el problema como un gráfico de intervalos y proporcionaron un método heurístico poderoso para el caso de tamaños de demanda iguales. Para el caso general, desarrollaron dos modelos lineales de enteros mixtos, el primero para minimizar las demoras totales en las entregas en el caso de un horario fijo para los trenes. El segundo modelo minimiza la misma función objetivo, pero también determina un horario para los trenes dedicados al transporte de carga. El segundo modelo se integra después a un modelo de restricción que tiene como objetivo primordial la minimización del número de trenes. El primer modelo resuelve el mayor conjunto de escenarios de forma óptima, pero asume una programación de trenes fija. Por otra parte, [40], propusieron un marco general para modelar y simular los sistemas y desarrollar algunos métodos de optimización para dar solución al problema relevante que es el punto de partida para afrontar el problema global. Particularmente, identificaron los problemas importantes que debían ser optimizados. Luego investigaron el FRTSP, que considera el caso más general de intercambio de recursos (tren, ferrocarril y estaciones) y constituye la base para abordar otros problemas relacionados. Este problema se plantea matemáticamente en un MIP y se estudia su complejidad computacional. Luego proponen dos heurísticas para alcanzar soluciones casi óptimas. El efecto o influencia de estos métodos en diferentes puntos de la infraestructura y su desempeño dinámico se evaluaron utilizando un marco de simulación. Se desarrolló un modelo de simulación de eventos

discretos utilizando software ARENA. [41], se desarrolló un marco de modelación de elección, que plantea la elección del tipo de servicio y el modo de transporte fundamentado en análisis y modelos anteriores, asimismo, se pudo evidenciar una escasez en el modelado de elección de modo. Asimismo, se pudo asegurar que la elección de modo con alternativa ferroviaria en un escenario de bienes urbanos pocas veces se ha modelado. [42], Propusieron un modelo de programación lineal entera-mixta (MILP) para reducir el tiempo total de las entregas del día. Los estudios computacionales mostraron que el modelo de optimización puede solucionar velozmente planteamientos de tamaño moderado que establezcan hasta cien demandas diarias. [43], hicieron un análisis de impacto con el objetivo de modelar los efectos de cambiar las propiedades de los trenes de carga, ósea, cambiar el material rodante sobre el consumo de capacidad. Para este estudio la capacidad de la línea en oposición a la capacidad del nodo se utilizaron como indicador. En el modelo el nivel de ocupación de la infraestructura y el tiempo de tolerancia mínimo recomendado se obtuvieron para casos puntuales, utilizando las variables de velocidad, aceleración, desaceleración y longitud del tren. Esas variables se sustentaron en las características particulares del material rodante, como la tracción, la construcción de boje y vehículos, la fabricación de acopladoras, la característica de los frenos, el peso del tren o la carga por eje. No se incluyó en este estudio la variabilidad de la infraestructura y sus componentes. Se consideró una red de tráfico mixto con énfasis en servicios de proximidad para el modelo. [45], desarrollaron un modelo de múltiples etapas con un algoritmo combinado sustentado en la optimización jerárquica, teniendo como objetivo abordar el problema de asignación de ubicación de nodos óptimos en la operación conjunta de M-ULS. La factibilidad del modelo se comprobó escogiendo las líneas. El problema central de la configuración de una red M-

ULS es determinar un escenario operativo y un método de optimización para varios nodos. Tres clases diferentes de nodos se expusieron como depósito subterráneo (UD), hub subterráneo (UH) y terminal terrestre (GT), conforme con el estado actual y la configuración de la ciudad, logística y red de metro. [46], proponen un estudio de caso para la estación de metro Xipu en Chengdu. De acuerdo con los datos de preferencia revelada y preferencia declarada, el tiempo de viaje, el tiempo de espera y la información demográfica (edad, género, ingresos) se escogen como las variables explicativas para desarrollar un modelo logit multinomial para predecir cambios probabilísticos de los usuarios del metro.

4. Conclusiones

Este documento se revisó la literatura relacionada con el uso de los sistemas ferroviarios como método alternativo para el transporte de mercancías características de esto se presentó una descripción básica del proceso de distribución urbana de mercancías y se identificaron los problemas asociados a la distribución urbana mercancías y la forma como se clasifican. Posterior a esta descripción, se presentaron estudios recientes relacionados con distribución urbana de mercancías. En este trabajo también se estudiaron artículos recientes sobre el uso de sistemas ferroviario para distribución urbana de mercancías y su clasificación, finalmente se presentan los objetivos considerados en los estudios y sus métodos de solución.

De los estudios revisados es posible concluir que existe un interés creciente en plantear soluciones de logística urbana para mejorar la sustentabilidad y habitabilidad, esto debido a la disminución en la accesibilidad de las vías urbanas y las restricciones ambientales. Además, el uso de los sistemas ferroviarios en la logística urbana puede de ayudar a mitigar estas

externalidades, debido a sus ventajas adicionales como la utilización de infraestructura independiente de la vía, su confiabilidad operativa y la alta eficiencia energética.

5. Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento a la profesora Gloria Osorno por su asesoría y acompañamiento durante la elaboración y construcción de este documento. Al grupo de profesores de la Especialización en Logística Integral de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, por compartir su tiempo y sus valiosas experiencias durante el desarrollo del programa.

6. Referencias

- [1] J. P. Antún, «Distribución urbana de mercancías: Estrategias con centros logísticos,» *IBD Technical Note*, n° 167, pp. 1-118, 2013.
- [2] V. B. e. al., «Freight Transport Demand Models for Applications in Urban areas,» *Applied Mechanics and Materials*, vol. 442, pp. 634-644, 2014.
- [3] E. T. R. G. & Y. T. Taniguchi, «New opportunities and challenges for city logistics,» *Transportation Research Procedia*, vol. 12, pp. 5-13, 2016.
- [4] O. P. J. Ozturk, «An optimization model for freight transport using urban rail transit,» *European Journal of Operational Research*, vol. 3, n° 267, pp. 1110-1121, 2018.
- [5] K. H. J. L. Y. X. Yubo Liu, «Analysis of the Concept of Urban Rail Transit Based City Logistics System,» de *2008 International Conference on Smart Manufacturing Application*, Gyeonggi-do, South Korea, 2008.
- [6] A. L. S. R. Katjha Buhrkal, «The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context,» *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 241-254, 2012.
- [7] S. S. M. J. R. & A. S. Keith Cochrane, «Moving freight on public transit: Best practices,» *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 11, n° 2, pp. 120-132, 2017.
- [8] A. F. M. Ricardo Bozzo, «Decision Support System for City Logistics: Literature Review, and Guidelines for an Ex-ante Model,» *Transportation Research Procedia*, vol. III, pp. 518-527, 2014.
- [9] V. M. E. N. M. S. S. Gatta, «Sustainable urban freight transport adopting public transport-based crowdshipping for B2C deliveries,» *European Transport Research Review*, pp.

11(1),13, 2019.

- [10] M. Arango Serna, C. Gómez Marín y C. Serna Urán, «Modelos logísticos aplicados en la distribución urbana,» *Revista EIA*, vol. 14, n° 28, pp. 57-76, 2017.
- [11] E. J.F., *Integration of Information and Optimization Models for Routing in City Logistics*, New York: Springer, Boston, MA, 2012.
- [12] K. C. P. D. J. R. S. Ewedairo, «Building Last Mile Delivery Scenarios: A Case Study of Melbourne,» de *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Bangkok, Thailand, 2018.
- [13] A. A. N. K. L. Z. R. Arslan, «Crowdsourced delivery—a dynamic pickup and delivery problem with ad hoc drivers,» *Transportation Science*, vol. 53, pp. 222-235, 2019.
- [14] L. A. H. C. M. Dahle, «The Vehicle Routing Problem with Dynamic Occasional Drivers,» de *International Conference on Computational Logistics*, Cham, 2017.
- [15] F. W. F. M. X. L. J. Wang, «Demystifying the Crowd Intelligence in Last Mile Parcel Delivery for Smart Cities,» *IEEE Network*, vol. XXXIII, n° 2, pp. 23-29, 2019.
- [16] H. V. S. M. J. & M. C. Buldeo Rai, «Crowd logistics: An opportunity for more sustainable urban freight transport,» *European Transport Research Review*, vol. 9, n° 39, 2017.
- [17] G. R. M. Perboli, «Parcel delivery in urban areas: Opportunities and threats for the mix of traditional and green business models,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 99, pp. 19-36, 2019.
- [18] F. Z. Y. W. F. L. J. Wang, «Ridesharing as a Service: Exploring Crowdsourced Connected Vehicle Information for Intelligent Package Delivery,» de *2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, Banff, AB, Canada, 2018.
- [19] J. C. F. R. M. Ana Lúcia Martins, «Collaborative Gamified Approach for Transportation,» de *First International Conference on Intelligent Transport Systems*, Guimarães, Portugal, 2018.
- [20] R. H. K. O'Neil, «Decision diagrams for solving traveling salesman problems with pickup and delivery in real time,» *Operations Research Letters*, vol. 47, n° 3, pp. 197-201, 2019.
- [21] A. P. J. C. C. Mourad, «A survey of models and algorithms for optimizing shared mobility,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 123, pp. 323-346, 2019.
- [22] S. W. M. Lim, «Configuring the last-mile in business-to-consumer e-retailing,» *California Management Review*, vol. 61, n° 2, pp. 132-154, 2019.
- [23] J. C. W. K. Ezzeddine Fatnassi, «Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 81, n° 2, pp. 440-460, 2015.
- [24] D. K. T. V. W. Baoxiang LI, «The Share-a-Ride Problem: People and parcels sharing taxis,» *European Journal of Operational Research*, vol. 238, n° 1, pp. 31-40, 2014.
- [25] N. Arvidsson, M. Givoni y J. Woxenius, «Exploring Last Mile Synergies in Passenger and Freight Transport,» *Built Environment*, vol. 42, n° 4, pp. 523-538, 2016.
- [26] J. G.-F. Eleonora Morganti, «The last food mile concept as a city logistics solution for perishable products,» *Enterprise Interoperability*, vol. I, n° 14, pp. 202-207, 2015.
- [27] T. Williams, «Railroad Construction Opportunities in an Age of Global Warming and Peak Oil,» de *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*,

West Lafayette Indiana, United States, 2012.

- [28] S. C. G. L. G. Rohmer, «A two-echelon inventory routing problem for perishable products,» *Computers and Operations Research*, vol. 107, pp. 156-172, 2019.
- [29] W.-C. L. Y. S. J. U. T. Chiang, «Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization,» *Applied Energy*, pp. 1164-1175, 2019.
- [30] M. M. D. P. G. T. R. Baldi, «A Generalized Bin Packing Problem for parcel delivery in last-mile logistics,» *European Journal of Operational Research*, vol. 274, n° 3, pp. 990-999, 2019.
- [31] D. P. D. R. S. Sacramento, «An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 102, pp. 289-315, 2019.
- [32] A. G. Chase C. Murray, «The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 54, pp. 86-109, 2015.
- [33] D. C. S. J. A.-M. W. B. H. Rezgui, «Application of a variable neighborhood search algorithm to a fleet size and mix vehicle routing problem with electric modular vehicles,» *Computers and Industrial Engineering*, vol. 130, pp. 537-550, 2019.
- [34] Y. F. X. Z. L. Zhang, «Analysis and Research on the "last mile" distribution innovation model of e-commerce express delivery,» de *Journal of Physics: Conference Series*, Beijing, 2019.
- [35] X. Y. K. W. Y. T. C.-C. Wang, «Consumer participation in last-mile logistics service: an investigation on cognitions and affects,» *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 49, n° 2, pp. 217-238, 2019.
- [36] U. B. R. H. R. V. T. Breunig, «The electric two-echelon vehicle routing problem,» *Computers and Operations Research*, vol. 103, pp. 198-210, 2019.
- [37] H. D. M. W. A. R. Bardo Hörl, «METRO.FREIGHT.2020 – strategies for strengthening rail infrastructure for freight transport in urban regions,» *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 2776-2784, 2016.
- [38] A. C. A. Nuzzolo, «Modelling the demand for rail in an urban context: Some methodological aspects,» *European Transport - Trasporti Europei*, p. 57, 2015.
- [39] W. B.-B. S. C. C. Behiri, «Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis,» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 115, pp. 227-245, 2018.
- [40] A. N. A. Comi, «Modelling challenges to forecast urban goods demand for rail,» *Transport Problems*, vol. 10, n° 4, pp. 75-90, 2015.
- [41] W. O. O. B.-B. S. Behiri, «Urban freight by rail: A MILP Modeling for optimizing the transport of goods,» de *6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Bordeaux, France., 2016.
- [42] T. B. D. W. U. Fumasoli, «Operation of freight railways in densely used mixed traffic networks - An impact model to quantify changes in freight train characteristics,» *Research in Transportation Economics*, vol. 54, pp. 15-19, 2015.
- [43] J. Q. F. L. W. F. P. Shen, «A New Urban Logistics Transport System Based on a Public

Transit Service,» de *15th COTA International Conference of Transportation Professionals*, Beijing , China, 2015.

- [44] J. H. W. Y. S. R. R. Z. X. Dong, «Network Planning Method for Capacitated Metro-Based Underground Logistics System,» *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, p. 14, 2018.
- [45] G. C. J.-J. X. H. J. Q.-Y. Y. C.-Q. Ren, «Research on public bicycle shuttle demands in urban rail transit station,» de *CICTP 2017: Transportation Reform and Change—Equity, Inclusiveness, Sharing, and Innovation*, Reston, 2018.
- [46] F. d. l. F. Españoles, «Via Libre,» 23 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.vialibreffe.com/noticias.asp?not=22079>. [Último acceso: 24 05 2019].
- [47] S. N. M. G. V. & M. E. Serafini, «Sustainable crowdshipping using public transport: A case study evaluation in Rome.,» *Transportation Research Procedia*, vol. 30, pp. 101-110, 2018.
- [48] Antun, Juan Pablo, «Distribución urbana de mercancías: Estrategias con centros logísticos,» *BID*, 201.