

TESIS DOCTORAL

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN
VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE VEHÍCULOS DE
PASAJEROS Y DE CARGA.

PhD THESIS

STRATEGIC PLANNING OF ON-STREET PARKING FACILITIES
CONSIDERING PASSENGER AND FREIGHT VEHICLES
COMPETITION.

AUTORA

MAIRA MILENA DELGADO LINDEMAN

DIRECTORES

JOSÉ LUIS MOURA BERODIA

JULIÁN ALBERTO ARELLANA OCHOA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

UNIVERSIDAD DEL NORTE

Escuela de Doctorado de la Universidad de Cantabria

Santander 2022

Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a DIOS, sin Él nada en mi vida es posible. A mi madre que consolidó el ser humano que soy y sembró en mí el interés de estudiar, establecer metas y esforzarme por hacer realidad los anhelos de mi corazón.

A mi padre y hermanas porque sin su amor, confianza y apoyo incondicional, este camino profesional que he ido cimentando no fuera una realidad.

Con especial gratitud hacia mis directores de tesis, profesor Julián Arellana y José Luis Moura quienes fueron la guía idónea para desarrollar este trabajo de investigación de manera satisfactoria. Asimismo, una mención especial al profesor Víctor Cantillo quien contribuyó en mi formación profesional durante todos estos años.

A la gobernación de Bolívar por la financiación de mis estudios dentro del programa “Bolívar gana con ciencia”, la fundación CEIBA, la Universidad del Norte y a la Universidad de Cantabria por su apoyo administrativo durante toda esta etapa académica.

Finalmente resalto la importancia de cada uno de mis amigos, compañeros de estudio y al grupo SUM+LAB, quienes han sido especial compañía en este proceso personal y profesional en el que he afianzado y enriquecido mis conocimientos.

Maira Delgado Lindeman

Resumen

La presencia de los usuarios de los vehículos de pasajeros y de carga interesados en utilizar el limitado espacio disponible dentro de los centros urbanos hacen que la planificación del estacionamiento en vía sea un desafío. En particular, el estacionamiento sobre vía hace referencia al espacio público en los que se incluyen porciones de las vías, bahías, andenes y otros espacios urbanos dispuestos para estacionar vehículos. Una vez que el espacio público ha sido asignado para ser utilizado como estacionamiento, los tomadores de decisión necesitan herramientas de planificación para distribuir eficientemente los estacionamientos entre los diferentes usuarios, considerando sus necesidades y mitigando las externalidades provocadas por su uso. Esta tesis doctoral, propone modelos matemáticos flexibles y multicriterio que puedan ser usados como herramientas de planificación estratégica de plazas de estacionamiento en vía en áreas urbanas, considerando la competencia entre usuarios de vehículo de carga y pasajeros.

Por tanto, primeramente, se estimaron modelos de elección discreta para identificar los principales factores que influyen el comportamiento de estacionamientos en vía para ambos usuarios. Además, se compararon las valoraciones de los factores que dominan la elección de ambos usuarios y se evaluó la influencia de la variable latente *conducta al estacionar* en la probabilidad de elección del estacionamiento informal para el caso de conductores de automóviles y del estacionamiento ilegal en el caso de los conductores de vehículos de carga.

Seguidamente, se proponen dos enfoques de planificación que integran los principales factores identificados. El primer enfoque propuesto maximiza el Nivel de Servicio (NS) del sistema, definido por el número de usuarios servidos, el uso de la infraestructura disponible y el efecto de la búsqueda de estacionamiento de los usuarios. Con el modelo NS, se evaluó el efecto en la asignación de estacionamientos al diferenciar por tipo de usuario, al considerar la circulación de vehículos, al priorizar el servicio de un tipo de usuario y al variar los objetivos de planificación. El segundo enfoque propuesto maximiza el Bienestar Social (BS), definido por el excedente del productor, el excedente del consumidor y las externalidades por circulación de vehículos en la búsqueda de estacionamientos y la congestión por el estacionamiento ilegal de los vehículos de carga. Con la función BS se analizaron diferentes escenarios para conocer el efecto del flujo vehicular, las tarifas, la demanda y el valor esperado de la multa. Finalmente, se compararon los dos enfoques propuestos y se resaltaron las recomendaciones que surgen del análisis de los modelos.

El caso de estudio es inspirado en la ciudad de Cartagena, Colombia. Los resultados muestran la importancia de considerar por separado las necesidades de espacio de los diferentes usuarios. Asimismo, muestran el efecto que tiene la asignación de estacionamiento, según el enfoque de planificación seleccionado, sobre ambos tipos de usuarios, el proveedor del servicio de estacionamiento y las externalidades del sistema. Además, el enfoque NS se considera una alternativa cuando no exista información de las preferencias de los usuarios y el efecto del flujo vehicular y de las externalidades sobre el sistema sean bajo. Por otra parte, el enfoque BS se considera útil cuando los usuarios tengan varias alternativas de estacionamiento, se quiera involucrar a todos los actores del sistema, se tenga un nivel de

flujo vehicular alto, un mayor nivel de congestión y externalidades en el sistema. Además, BS permitirá obtener la tarifa óptima del sistema y evaluar económicamente diversas políticas de estacionamiento. Finalmente, estas herramientas de planificación podrían ser útiles cuando la información en tiempo real no está disponible, en áreas donde se debe realizar una primera planificación o se debe redistribuir el espacio de estacionamiento disponible.

Abstract

The presence of passenger and freight vehicle users interested in using the limited space available within urban centers makes on-street parking planning a challenge. On-street parking refers to public space including portions of roads, bays, platforms, and other urban spaces available for parking vehicles. Once public space has been allocated for parking, decision makers need planning tools to efficiently distribute parking among different users, considering their needs and mitigating the externalities caused by its use. This doctoral thesis proposes flexible and multi-criteria mathematical models that can be used as strategic planning tools for on-street parking spaces in urban areas, considering the competition between freight and passenger vehicle users.

Therefore, first, two discrete choice models were estimated to identify the main factors influencing on-street parking behavior for both users. In addition, the factor assessments dominating the choice of both users were compared. The influence of the latent variable *parking behavior* on the probability of choosing informal parking in the case of passenger vehicle drivers and illegal parking in the case of freight vehicle drivers was also evaluated. Afterwards, two planning approaches are proposed that integrate the main factors identified. The two proposed approaches were compared and recommendations arising from the analysis of the models were highlighted.

The first proposed approach maximizes the Level of Service (NS, for its acronym in Spanish) of the system, defined by the number of users served, the use of the available infrastructure and the effect of user parking search. With the NS model, the effect on parking allocation was evaluated by differentiating between user type, considering vehicle circulation, prioritizing the service of one type of user, and varying the planning objectives.

The second proposed approach maximizes Social Welfare (BS, for its acronym in Spanish), defined by producer surplus, consumer surplus, and externalities due to vehicle circulation in the search for parking and congestion due to illegal parking of freight vehicles. Using the BS function, different scenarios were analyzed to determine the effect of vehicle flow, rates, demand, and the expected value of the fine.

The study case is inspired by the city of Cartagena, Colombia. The results show the importance of considering separately the space needs of different users. They also show the effect of parking allocation, according to the selected planning approach, on both types of users, the parking service provider, and the system externalities. In addition, the NS approach is considered as an alternative when there is no information on user preferences and the effect of vehicular flow and system externalities are low. On the other hand, the BS approach is considered useful when users have several parking alternatives, all system stakeholders want to be involved, there is high levels of vehicle flow, congestion, and externalities. In addition, the BS approach will allow to obtain the optimal system tariff and to economically evaluate different parking policies. Finally, these planning tools could be useful when real time information is not available, in areas where a first planning must be done, or the available parking space must be redistributed.

Contenido

1 INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 OBJETIVOS	- 3 -
1.1.1 GENERAL	- 3 -
1.1.2 ESPECÍFICOS	- 3 -
1.2 CONTRIBUCIONES	- 3 -
2 ESTADO DEL ARTE	- 5 -
2.1 GENERALIDADES DE LA PLANIFICACIÓN DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA	- 5 -
2.1.1 LA DEMANDA	- 6 -
2.1.2 LA TARIFA	- 6 -
2.1.3 LA DISTANCIA DE CAMINATA (TIEMPO DE ACCESO)	- 7 -
2.1.4 CONTROL DEL ESTACIONAMIENTO ILEGAL	- 7 -
2.1.5 TIEMPO DE BÚSQUEDA	- 8 -
2.2 PREFERENCIAS DE LOS USUARIOS AL ESTACIONAR	- 10 -
2.3 EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA	- 13 -
2.4 ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS DE PLANIFICACIÓN DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA	- 15 -
2.4.1 ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS RELACIONADAS A LA INFRAESTRUCTURA	- 16 -
2.4.1.1 Estrategias y políticas de localización y asignación	- 16 -
2.4.1.2 Estrategias y políticas de diseño	- 17 -
2.4.2 ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS RELACIONADAS A LA GESTIÓN	- 17 -
2.4.2.1 Estrategias y políticas de restricción	- 17 -
2.4.2.2 Estrategias y políticas de tarificación	- 18 -
2.4.2.3 Estrategias y políticas de implementación de sistemas inteligentes	- 18 -
3 METODOLOGÍA	- 20 -
3.1 MODELO DE ELECCIÓN	- 20 -
3.1.1 DISEÑO DE ENCUESTA	- 21 -
3.1.1.1 Conductores de vehículos de carga	- 21 -
3.1.1.2 Conductores de vehículos de pasajeros	- 23 -
3.1.2 ENFOQUE DE MODELACIÓN	- 25 -
3.2 MODELO DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA	- 28 -
3.2.1 MAXIMIZACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO	- 29 -
3.2.1.1 Notación	- 30 -
3.2.1.2 Formulación del Problema	- 31 -
3.2.2 MAXIMIZACIÓN DEL BIENESTAR SOCIAL	- 33 -
3.2.2.1 Notación	- 34 -
3.2.2.2 Formulación del Problema	- 35 -

4	MODELO DE ELECCIÓN	- 38 -
4.1	CASO DE ESTUDIO	- 38 -
4.2	ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS	- 40 -
4.2.1	CONDUCTORES DE VEHÍCULOS DE CARGA	- 40 -
4.2.2	CONDUCTORES DE VEHÍCULOS DE PASAJEROS	- 44 -
4.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 48 -
5	MODELO DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA.	- 58 -
5.1	CASO DE ESTUDIO	- 58 -
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES	- 60 -
5.2.1	MAXIMIZACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO	- 60 -
5.2.1.1	Evaluación del modelo	- 62 -
5.2.2	MAXIMIZACIÓN DEL BIENESTAR SOCIAL	- 67 -
5.2.2.1	Evaluación del modelo	- 68 -
5.2.3	COMPARACIÓN DE ENFOQUES NS Y BS	- 75 -
6	RECOMENDACIONES EN LA PLANIFICACIÓN DE ESTACIONAMIENTO EN VÍA.	- 78 -
7	CONCLUSIONES	- 80 -
7	CONCLUSIONS	- 84 -
8	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	- 87 -
9	BIBLIOGRAFÍA	- 88 -

Lista de figuras

FIGURA 1 ESQUEMA METODOLÓGICO.	- 20 -
FIGURA 2. EJEMPLO DE ESCENARIO DE ELECCIÓN - CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE CARGA.....	- 22 -
FIGURA 3. EJEMPLO DE ESCENARIO DE ELECCIÓN – CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE PASAJEROS	- 24 -
FIGURA 4. MARCO DE MODELACIÓN DEL MODELO HDC.	- 26 -
FIGURA 5. MODELOS DE PLANIFICACIÓN PROPUESTOS.....	- 29 -
FIGURA 6. UBICACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.....	- 38 -
FIGURA 7. IMÁGENES DE LA ZONA DE BOCAGRANDE	- 39 -
FIGURA 8. IMÁGENES DE LA ZONA DE MANGA	- 40 -
FIGURA 9. ELECCIONES DEL EXPERIMENTO PD POR ZONA DE ESTUDIO- CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE CARGA.	- 43 -
FIGURA 10. RESPUESTAS POR INDICADORES- CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE CARGA.....	- 44 -
FIGURA 11. ELECCIONES DEL EXPERIMENTO PD POR ZONA DE ESTUDIO - CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE PASAJERO.	- 47 -
FIGURA 12. RESPUESTAS POR INDICADORES - CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE PASAJERO.....	- 47 -
FIGURA 13. DAP POR REDUCIR LA DISTANCIA AL DESTINO	- 53 -
FIGURA 14. DAP POR REDUCIR EL TIEMPO DE BÚSQUEDA.	- 53 -
FIGURA 15 ESQUEMA DEL ÁREA DE ESTUDIO SIMULADA.....	- 58 -
FIGURA 16 FRECUENCIA DE LLEGADAS POR TIPO DE USUARIO.....	- 59 -
FIGURA 17 ASIGNACIÓN DE NS_1 EN EL TIEMPO.	- 62 -
FIGURA 18 ASIGNACIÓN DE NS_2 EN EL TIEMPO.....	- 62 -

Lista de tablas

TABLA 1. MODELOS DE ELECCIÓN DISCRETA DE ESTACIONAMIENTOS (2018-2022) -VEHÍCULOS DE PASAJEROS.....	- 10 -
TABLA 2. MODELOS DE ELECCIÓN DISCRETA DE ESTACIONAMIENTOS-VEHÍCULOS DE CARGA.	- 12 -
TABLA 3. ATRIBUTOS Y NIVELES DEL EXPERIMENTO DE ELECCIÓN – CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE CARGA.....	- 22 -
TABLA 4. INDICADORES ACTITUDINALES – CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE CARGA	- 23 -
TABLA 5. ATRIBUTOS Y NIVELES DEL EXPERIMENTO DE ELECCIÓN – CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE PASAJEROS	- 24 -
TABLA 6. INDICADORES ACTITUDINALES – CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE PASAJERO.	- 25 -
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS Y SOCIOECONÓMICAS DE LA MUESTRA- VEHÍCULOS DE CARGA.....	- 41 -
TABLA 8. RESUMEN INFORMACIÓN DE PRIMERA SECCIÓN DE ENCUESTA - CONDUCTORES DE VEHÍCULO DE CARGA.	- 42 -
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS DE LA MUESTRA- VEHÍCULO DE PASAJEROS.	- 44 -
TABLA 10. RESUMEN INFORMACIÓN DE LA PRIMERA SECCIÓN DE LA ENCUESTA- VEHÍCULO DE PASAJEROS.	- 46 -
TABLA 11 VARIABLES Y PARÁMETROS EN LOS MODELOS DE ELECCIÓN	- 48 -
TABLA 12 ECUACIONES ESTRUCTURALES Y DE MEDICIÓN	- 51 -
TABLA 13 RESULTADOS MODELOS MNL.....	- 52 -
TABLA 14 ELASTICIDADES PARA USUARIOS DE VEHÍCULO DE CARGA.	- 54 -
TABLA 15 ELASTICIDADES PARA USUARIOS DE VEHÍCULO DE PASAJEROS.	- 54 -
TABLA 16 RESULTADOS MODELOS HDC.	- 56 -
TABLA 17 DAP POR REDUCIR LA DISTANCIA (COP/BLOQUE).....	- 57 -
TABLA 18 DAP POR REDUCIR EL TIEMPO DE BÚSQUEDA (COP/MIN).....	- 57 -
TABLA 19 NÚMERO DE AFECTADOS POR ESTACIONAMIENTO ILEGAL SEGÚN EL NIVEL DE FLUJO VEHICULAR.	- 60 -
TABLA 20 RESULTADOS DEL MODELO PARA NS_1 Y NS_2	- 61 -
TABLA 21 RESULTADOS DEL MODELO NS – EFECTO DE LA CIRCULACIÓN DE USUARIOS	- 63 -
TABLA 22 RESULTADOS DEL MODELO NS – EFECTO DE LA PRIORIZACIÓN DE UN TIPO DE USUARIO.....	- 64 -
TABLA 23 PORCENTAJE DE VARIACIÓN - EFECTO DE LA PRIORIZACIÓN DE UN TIPO DE USUARIO. VALOR DE REFERENCIA: $\gamma = 0.5$	- 64 -
TABLA 24 RESULTADO DEL MODELO NS – EFECTO DE LA SELECCIÓN DE LOS OBJETIVOS DE PLANIFICACIÓN.....	- 66 -
TABLA 25 PORCENTAJE DE VARIACIÓN - EFECTO DE LA SELECCIÓN DE LOS OBJETIVOS DE PLANIFICACIÓN. VALOR DE REFERENCIA: $\alpha = 0.5$	- 66 -
TABLA 26 RESULTADOS DEL MODELO BS – ESCENARIO BASE.	- 68 -
TABLA 27 RESULTADOS DEL MODELO BS – EFECTO DEL FLUJO VEHICULAR.....	- 70 -
TABLA 28 RESULTADOS DEL MODELO BS – EFECTO DE LA TARIFA DE AUTOMÓVILES.	- 71 -
TABLA 29 RESULTADOS DEL MODELO BS – EFECTO DE LA TARIFA DE CAMIÓN.	- 72 -
TABLA 30 RESULTADOS DEL MODELO BS – EFECTO DE AUMENTAR LOS VEHÍCULOS DE CARGA.	- 73 -
TABLA 31 RESULTADOS DEL MODELO BS – EFECTO DEL VALOR ESPERADO DE LA MULTA.....	- 74 -
TABLA 32 RESULTADOS DEL MODELO BS Y MODELO NS-ED.....	- 76 -

1 Introducción

El crecimiento económico y vehicular, combinado con la falta de una planificación adecuada en los centros urbanos, ha llevado a un déficit de áreas de estacionamiento. Por tanto, en zonas de alta atracción de viajes, existe una competencia constante por el uso del escaso espacio disponible entre diferentes tipos de usuarios, como bicicletas, transporte público, automóviles y camiones (Jaller et al., 2021; Marsden et al., 2020).

Los requerimientos de los usuarios que llegan a un estacionamiento son diferentes y dependen de las características y necesidades de cada uno. En este sentido, por ejemplo, para los usuarios de vehículos de pasajeros un estacionamiento puede representar el destino final del viaje, mientras que para los vehículos de servicio público de pasajeros o el servicio de carga los estacionamientos son un destino parcial de un tour o recorrido (Nourinejad et al., 2014). En general, algunas diferencias se basan principalmente en especificaciones como el tamaño del espacio requerido, el tiempo de utilización del espacio, la distancia de caminata máxima esperada al destino final, y el comportamiento del conductor del vehículo en el proceso de búsqueda de un estacionamiento (Amer & Chow, 2017; Figliozzi & Tipagornwong, 2017; Kim & Wang, 2021).

Usualmente, el uso del espacio público para estacionar dentro de las ciudades se basa en una normativa local diseñada a criterio de los planificadores urbanos, en la cual predomina la prohibición del estacionamiento en vía aun cuando los espacios están disponibles. Estas normativas buscan mejorar las condiciones de movilidad en los entornos urbanos, no obstante, en la mayoría de los casos no logran su objetivo (Dablanc, 2007). Por otra parte, en algunas zonas sin normatividad, la dinámica del espacio disponible se basa en el uso libre del espacio sin ninguna priorización por tipo de usuario.

En ambos casos, una inadecuada o inexistente gestión de los estacionamientos, sobre todo aquellos sobre vía, generan ciertos comportamientos en los usuarios como lo son el estacionamiento ilegal (tal como el doble parqueo y ocupación de espacios inadecuados) y la circulación en la zona a la espera de una plaza disponible (Dezi et al., 2010; D. C. Shoup, 2006). Eventualmente, estos comportamientos de los usuarios afectan los intereses económicos y comerciales de las áreas urbanas, debido a la afectación en la demanda de viaje a la zona (Van Der Waerden et al., 2009) y a las externalidades como la congestión, el ruido, las emisiones y la siniestralidad causadas principalmente por los tiempos de búsqueda (Inci et al., 2017; J. N. Van Ommeren et al., 2012).

Como ya se ha mencionado, en los centros urbanos el espacio público disponible es un bien altamente valorado y al mismo tiempo representa una alternativa como espacio de estacionamiento. En particular, el estacionamiento sobre vía hace referencia al espacio público administrado por el Estado, en los que se incluyen porciones de las vías, bahías, andenes y otros espacios urbanos dispuestos para estacionar vehículos. Una vez que los espacios ya han sido asignados para ser utilizados como estacionamiento, se ha mostrado que las ciudades pueden administrarlos de manera más efectiva maximizando los beneficios públicos, estableciendo objetivos de ocupación en lugar de objetivos de ingresos (Pierce, Willson and

Shoup, 2015). Sin embargo, cuando existen varios tipos de usuarios, no es tan claro como los tomadores de decisión deben distribuir el espacio entre ellos.

En el caso del transporte de carga, la importancia de la planificación del estacionamiento es evidente, particularmente en escenarios donde el estacionamiento no está disponible. Diferentes actores de la logística urbana (por ejemplo, transportistas, receptores y ciudadanos) reconocen la importancia de contar con lugares de estacionamiento disponibles para mejorar las operaciones de carga urbana (Amaya et al., 2020). Sin embargo, en escenarios con oferta de estacionamientos para el transporte de carga, existe la necesidad de atender los recurrentes problemas de saturación de estos espacios. La solución pasa por la replanificación y gestión eficiente, regulando con precisión las zonas de carga para evitar el uso excesivo de maniobras de estacionamiento ilegal que agraven los problemas de congestión del tráfico existentes (Ezquerro et al., 2020).

Debido a la complejidad de la dinámica de los estacionamientos, los tomadores de decisiones necesitan herramientas de planificación y gestión del espacio urbano que se alineen con las necesidades de sus entornos urbanos y permitan la mitigación de las externalidades (Brooke et al., 2014). Por lo general, existen dos enfoques para abordar este tipo de problema de estacionamiento en la literatura. Tradicionalmente, el primer enfoque está más centrado en resolver el problema a nivel operativo a través de técnicas de simulación. Mientras tanto, el segundo enfoque utiliza regularmente la optimización matemática para resolver el problema a nivel táctico o estratégico, especialmente en ausencia de datos en tiempo real (Chong & Zak, 2001).

En particular, esta tesis propone modelos de optimización matemática que permiten planificar el estacionamiento en vía considerando la competencia entre automóviles y camiones. Los modelos están pensados como herramientas de planificación estratégica en escenarios donde no hay disponible información en tiempo real e integrando los principales factores de interés tanto de los planificadores urbanos como de los diferentes usuarios que utilizan los estacionamientos.

Esta tesis se ha organizado de la siguiente forma. El capítulo 1, presenta una introducción que incluye la motivación, los objetivos y las principales contribuciones de la investigación. En el capítulo 2, se exponen los resultados de un análisis exhaustivo del estado del arte. En este capítulo se incluyeron algunas generalidades de la planificación de los estacionamientos en vía, las necesidades y preferencias de los usuarios al momento de estacionar, los modelos de asignación de estacionamiento tanto de vehículos de pasajero como de zonas de carga y descarga para vehículos de mercancías y las principales estrategias y políticas de planificación a nivel estratégico. Todos estos temas son relevantes como fundamentos de la investigación. En el capítulo 3, se muestra la metodología utilizada para plantear las herramientas de planificación de los estacionamientos en vía considerando la competencia entre usuarios de carga y pasajeros. En la primera parte de este capítulo, se muestra el diseño de un instrumento y el enfoque de modelación utilizados para entender las preferencias de los usuarios de vehículos de carga y pasajeros en la elección de estacionamiento. En la segunda parte del capítulo 3, se describe el problema de asignación que se pretende resolver en esta investigación y las consideraciones establecidas. Además, se exponen dos enfoques para la planificación estratégica de estacionamientos. Para cada uno de ellos se presentan

los fundamentos, la notación y la formulación matemática utilizada. En el capítulo 4, se presentan el caso de estudio, la toma de información y los resultados y la discusión de la implementación del enfoque de modelación de elección discreta descrito en la primera parte de capítulo 3. En el capítulo 5, se presenta el caso de estudio, los resultados y discusión obtenidos al aplicar los dos enfoques de modelación propuestos para la asignación de plazas de estacionamiento a vehículos de carga y pasajeros. Este capítulo finaliza con los resultados y discusión del modelo que permite comparar los dos enfoques propuestos. Finalmente, los capítulos 6, 7 y 8 presentan respectivamente las principales recomendaciones, conclusiones y líneas de investigación futura que surgen a partir de la metodología y resultados presentados en esta tesis.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Desarrollar modelos matemáticos que permitan la planificación estratégica de plazas de estacionamiento en vía considerando competencia por el espacio entre los usuarios de vehículos de carga y pasajeros.

1.1.2 Específicos

1. Identificar los principales factores que influyen el comportamiento de los estacionamientos en vía para los diferentes usuarios en el espacio vial (carga y pasajeros).
2. Formular modelos matemáticos que permitan planificar los estacionamientos en vía considerando diferentes usuarios integrando los principales factores identificados.
3. Aplicar los modelos matemáticos a un caso de estudio que permita analizar los resultados obtenidos dentro del contexto de la logística urbana de una ciudad dentro de un país en vía de desarrollo.
4. Entregar recomendaciones que permitan mejorar la planificación estratégica de plazas de estacionamiento en vía para los diferentes usuarios en ciudades de países en vía de desarrollo.

1.2 Contribuciones

- Se modelizó la elección de estacionamiento de usuarios de carga en un caso hipotético inspirado en la ciudad de Cartagena, Colombia. El caso de estudio considera los principales factores del comportamiento de estacionamiento en vía de los conductores y la influencia de su conducta al estacionar.
- Se comparó y cuantificó la valoración de los principales factores del comportamiento de estacionamiento entre usuarios de vehículos de carga y pasajeros.
- Se proponen dos enfoques de optimización para la planificación estratégica de los espacios de estacionamiento en vía para usuarios de carga y pasajeros:
 - Maximización del nivel de servicio
 - Maximización del bienestar social

- Se aplicaron ambos modelos a un escenario simulado, inspirado en la ciudad de Cartagena, que permite plantear recomendaciones para planificar estacionamientos considerando diferentes tipos de usuarios.

Como parte de la fase exploratoria de la investigación desarrollada en esta tesis, se han publicado los siguientes trabajos:

- Amaya, J., Arellana, J., & **Delgado-Lindeman, M.** (2020). Stakeholders perceptions to sustainable urban freight policies in emerging markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 329-348. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.11.017>
- Amaya, J., **Delgado-Lindeman, M.**, Arellana, J., & Allen, J. (2021). Urban freight logistics: What do citizens perceive?. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102390. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102390>

Además, a partir de la investigación desarrollada en esta el siguiente artículo se encuentra en revisión:

- **Delgado-Lindeman, M.**, Rodríguez, A., Moura, J. & Arellana, J. (2022). Optimization approach for planning urban on-street parking considering car and truck users. *Cities*. (En revisión)

2 Estado del arte

Este capítulo contiene una revisión del estado del arte de diversos tópicos que permiten entender el problema asociado a la planificación estratégica de estacionamiento en vía teniendo en cuenta la presencia de dos usuarios (vehículos de carga y pasajeros) que requieren su uso.

El primer tópico está relacionado a entender aspectos generales de la dinámica de los estacionamientos en vía, incluyendo la discusión relacionada a los principales factores involucrados en su planificación. Seguidamente se expone las necesidades y preferencias de los usuarios de vehículos de carga y pasajeros al momento de estacionar, resaltando sus similitudes y diferencias. En este apartado se incluye la revisión de la literatura de los diferentes modelos de elección discreta de estacionamiento que nos ayudan a entender y cuantificar los principales atributos que rigen las elecciones de los usuarios. El tercer tópico está relacionado con los modelos de asignación de estacionamientos en vía. Finalmente, se presentan las principales estrategias o políticas para la planificación estratégica de estacionamientos.

2.1 Generalidades de la planificación de estacionamientos en vía

La literatura acerca del suministro de estacionamiento para vehículos de pasajeros es abundante. Litman (2006) lo resume como un viejo paradigma que se caracteriza por ofrecer suficientes lugares de manera gratuita y un nuevo paradigma que se caracteriza por una oferta óptima con una tarifa asignada. Se ha dicho que la provisión de estacionamiento debe ser limitada de tal manera que se comporte como una medida de control de la demanda (Z. Guo & Ren, 2013; J. Van Ommeren et al., 2014; Weinberger, 2012). La tendencia entonces en los países desarrollados ha sido eliminar la normativa que establece un número mínimo de estacionamientos requeridos para los establecimientos de centros urbanos. Es el caso de Shoup (2011), donde se menciona la existencia de al menos 129 ciudades en los Estados Unidos que han eliminado la normativa. No obstante, menciona que esta debe ser mejorada estableciendo un número máximo de provisión de lugares de estacionamiento.

Sin embargo, en los países en desarrollo la discusión está orientada a un enfoque muy diferente. El problema de estacionamientos se centra en la flexibilidad y la informalidad de la oferta, dejando una interacción no muy clara entre las regulaciones y el mercado, y con un persistente problema de demanda no satisfecha (Thanh & Friedrich, 2017; Swamy & Baidur, 2014). Esta diferencia se explica debido al contexto de estos países, caracterizados por la alta tasa de motorización, un servicio público inadecuado, altos costos del precio de la tierra en el centro de la ciudad y un gobierno local con recursos limitados (Morichi, 2009; Swamy & Baidur, 2014).

Sin importar el contexto y la visión de los planificadores urbanos para establecer la oferta de los estacionamientos, existen un gran número de factores que influyen en la dinámica de los estacionamientos. En su mayoría, estos factores se encuentran altamente relacionados entre sí (Brooke et al., 2014). A continuación, se presentarán los factores más estudiados en la literatura relacionados al estacionamiento en el espacio público tales como la demanda, la tarifa, la distancia de caminata al destino final, la duración, el estacionamiento ilegal y el tiempo de búsqueda. En cada subsección se definirá el factor presentando los aspectos más relevantes y las investigaciones que los han tratado recientemente.

2.1.1 La demanda

La demanda de estacionamiento es quizás el factor más importante para la planificación de estos espacios. Sin embargo, hay que entender que la caracterización de la demanda es compleja pues depende del tipo de usuario y otras características.

Por ejemplo, mientras que la demanda de un vehículo de pasajeros es elástica a los costos por estacionamiento y el tráfico, la demanda de los vehículos de carga no tienden a ser tan elásticas (Amer & Chow, 2017). Regularmente, el comportamiento de la elasticidad del vehículo de carga se debe a que los costos adicionales de la actividad de estacionar pueden ser transferidos al consumidor final de los productos transportados (Figliozzi & Tipagornwong, 2017). Adicionalmente, se ha demostrado que la demanda de estacionamiento en vía no solo está relacionada con el tipo de usuario, sino que existe una relación compleja con el tiempo de permanencia en el estacionamiento. Por un lado, algunos usuarios que eligen estacionar en la vía tienen un tiempo de permanencia corto. Por otro lado, los usuarios con grandes tiempos de permanencia también eligen el estacionamiento en la vía. Ambos casos motivados por la disponibilidad de espacios legales para estacionar a un bajo costo (Zong et al., 2019).

2.1.2 La tarifa

Tal como se mencionó anteriormente, la tarifa del estacionamiento es determinante en el comportamiento de la demanda para usuarios de vehículos de pasajeros (Golias et al., 2002). Por esta razón, un gran número de políticas de estacionamiento se basan en la modificación de la tarifa. Por ejemplo, cuando los espacios son insuficientes y se evidencia una afectación en los costos de viaje tanto para el que busca estacionamiento como para el vehículo que transita por la vía, aumentar la tarifa de estacionamiento puede ayudar a disminuir la demanda. Sin embargo, asumir que el incremento del costo del estacionamiento es equivalente a incrementar el costo del viaje puede aplicar solo para usuarios regulares que estacionan por un tiempo fijo. En el caso de usuarios que pueden variar la duración del estacionamiento, el incremento de la tarifa puede no tener efecto sobre la congestión de la zona o incluso aumentar dicho efecto (Glazer & Niskanen, 1992).

En general, fijar la tarifa óptima de los estacionamientos en vía no es una tarea fácil. Dependerá de factores relacionados con la disponibilidad y la accesibilidad tales como la duración promedio, el tiempo de búsqueda y el tiempo de caminata al destino. Por ejemplo, si se aumenta la tarifa, el tiempo de permanencia en el estacionamiento será menor (Zong et al., 2019) pero además se sabe que la sensibilidad al precio aumenta si los usuarios parquean por duraciones relativamente largas (Kobus et al., 2013). Igualmente, se conoce que existe una mayor disposición a pagar por reducir el tiempo de caminata y el tiempo de búsqueda (Zhang & Zhu, 2016). Adicionalmente, la determinación de la tarifa óptima es diferente cuando se encuentran disponibles estacionamientos en vía y fuera de vía en los cuales se ha demostrado que los individuos están dispuestos a elegir un estacionamiento en la vía si este tiene una tarifa más baja, aunque resulte en un aumento del volumen de tráfico y mayores tiempos de espera (Arnott & Rowse, 2009; Golias et al., 2002; Kobus et al., 2013; D. C. Shoup, 2006; Zong et al., 2019). Así mismo, estudios recientes evidencian la diferencia metodológica para establecer la tarifa cuando existen

o no herramientas tecnológicas para la reserva de los espacios de estacionamiento, con información de la ocupación y/o información del tiempo de búsqueda (Qian & Rajagopal, 2015; Z. Qian & Rajagopal, 2014a, 2014b; P. Wang et al., 2019).

2.1.3 La distancia de caminata (tiempo de acceso)

La distancia de caminata al destino final corresponde al trayecto que los usuarios deben recorrer desde la zona de estacionamiento hasta el lugar donde se cumplirá el propósito de su viaje. Este factor ha sido considerado por un gran número de autores en la modelación de la elección del tipo de estacionamiento y para el cálculo del costo total del viaje (Zong et al., 2019). En otras palabras, el tiempo de caminata está muy relacionado a la disposición a pagar por el estacionamiento. Lo anterior sugiere que las tarifas de los estacionamientos que proporcionan un menor tiempo de caminata deberán ser más altas.

Varios autores han definido valores de la máxima disposición a caminar por los usuarios. Estos valores son diferentes según el tipo de usuario y el contexto en el que se desarrolla el estudio. Para el caso de vehículos de carga, Dezi, Dondi and Sangiorgi (2010) calcularon un valor de 50 metros como distancia máxima de caminata, mientras Delaître and Routhier(2010) consideraron 10 metros luego de preguntarle a los conductores cual sería la mayor distancia entre el punto de entrega y el área de descarga para que ellos estuvieran dispuestos a utilizarla. Por otra parte, Muñuzuri *et al.* (2012) asumen 200 metros como distancia máxima que se puede cubrir a pie desde un mini-hub. Los resultados del caso de aplicación de la localización de mini-hub mostró que los costos de la entrega decrecen en la medida que el número de mini-hubs aumenta debido a las pequeñas distancias a pie que deben recorrerse. Finalmente, Alho *et al.* (2018) asumen para su simulación distancias máximas de caminata desde la bahía al establecimiento de 25, 30 y 75 metros, si la distancia es mayor al valor máximo, el modelo le asigna doble estacionamiento al vehículo. Sus resultados mostraron que la reducción en el número total de bahías cuando se supone el rango de caminata más alto (75 metros) no se logra una compensación adecuada, especialmente porque la geografía de la ciudad y las características de la acera no hacen que sea fácil llevar las entregas sin un equipo especial.

Por otra parte, para el caso de vehículos de pasajeros, estudios concluyen que los conductores prefieren el estacionamiento en vía siempre y cuando el tiempo de caminata sea menor a 15 min (Zhang & Zhu, 2016). Otros autores concluyen que la disposición a caminar al destino aumenta en la medida que el tiempo de búsqueda es mayor, tomando un valor máximo de 550 metros (Gantelet & Lefauconnier, 2006).

2.1.4 Control del estacionamiento ilegal

Estacionar ilegalmente se puede definir como la acción de ubicar un vehículo en un lugar prohibido por la ley o hacerlo de una manera inadecuada. Algunos ejemplos de estas prácticas son el parqueo en vía en espacios no autorizados, usar espacios reservados para otro tipo de vehículo, estacionar en las aceras o cruces peatonales, y el doble parqueo. El doble parqueo se refiere al estacionamiento paralelo a un vehículo que está legalmente estacionado en la vía.

La falta de disponibilidad, el inadecuado estado y la inapropiada planeación de los estacionamientos son las principales causas del estacionamiento ilegal (Dezi et al., 2010; Muñuzuri et al., 2012; Thanh & Friedrich, 2017). Sin embargo, la decisión de estacionar ilegalmente también está relacionada con la duración esperada del propósito de viaje, es decir el tiempo de estacionamiento, y el control de las restricciones vigentes por parte de las autoridades (Ishida, 2006; Thanh & Friedrich, 2017). Así mismo, las prácticas varían según el tipo de usuario. Por ejemplo, es más común ver que ante la ausencia de un lugar disponible, un vehículo de pasajeros decida circular en la zona hasta encontrar un lugar disponible, mientras que un vehículo de carga frecuentemente toma la decisión de hacer doble parqueo. En el caso de este último, se ha observado que las multas resultantes de este comportamiento son tenidas en cuenta en los costos operacionales, dando a entender que es una práctica inevitable (Figliozzi & Tipagornwong, 2017; Haider et al., 2009; Nourinejad et al., 2014).

El estacionamiento ilegal reduce la velocidad de flujo y la capacidad de la vía, generando congestión, aumentando las demoras, el ruido, la probabilidad de que se generen accidentes y ocasionando un deterioro en el paisaje urbano (Aiura & Taniguchi, 2006; Delaître, 2009; Dezi et al., 2010; Morillo & Campos, 2014). En esencia la magnitud de las consecuencias dependerá del número de vehículos mal estacionados, la posición de los vehículos, las características de la vía y la duración del mal estacionamiento (Alho et al., 2018; Morillo & Campos, 2014).

Debido al impacto que genera la presencia de vehículos estacionados ilegalmente, varios estudios han centrado su atención en comprender los factores que influyen en la decisión de estacionar ilegalmente, el papel de las autoridades para regular este comportamiento y en la cuantificación del impacto en las condiciones de tráfico, en las operaciones de carga y en el medio ambiente (Delaître & Routhier, 2010; Kladeftiras & Antoniou, 2013; McLeod & Cherrett, 2011; Muñuzuri et al., 2002). Trabajos como los de Aiura & Taniguchi, (2006) y Alho *et al.* (2018) modelaron el estacionamiento ilegal por parte de vehículos de pasajeros que estacionaban en áreas dedicadas al transporte de carga. Estos modelos obtienen datos de la demanda de vehículos que estacionan ilegalmente y simulan la aplicación del control disminuyendo dicha demanda con el fin de evaluar la mejoras en el sistema de bahías y el impacto en la movilidad. Amer & Chow, (2017) también tuvieron en cuenta el estacionamiento ilegal en la asignación y tarificación de estacionamientos en vía.

2.1.5 Tiempo de búsqueda

El tiempo de búsqueda es el tiempo que un conductor gasta para localizar un espacio para estacionar. Cuando no existe estacionamiento disponible, el usuario puede decidir esperar, circulando alrededor de la zona para no estacionar ilegalmente y aumentando su tiempo de búsqueda (D. C. Shoup, 2006). Tal como se explicó anteriormente, circular en búsqueda de estacionamiento es una práctica más común en vehículos de pasajeros que en vehículos de carga.

El tiempo de circulación es un tema de interés para los planificadores debido a las externalidades asociadas tal como: el aumento del tráfico, el consumo adicional de combustible, el aumento del estrés en el viaje y las demoras para completar el propósito del viaje (D. Shoup, 2011a). Estudios revelan que la probabilidad

que un vehículo circule es mayor si el estacionamiento fuera de vía es costoso, si la gasolina es económica, si el usuario requiere parquear por largos periodos, si el usuario se encuentra solo en el vehículo y si la valoración del tiempo es muy baja (D. C. Shoup, 2006). Adicionalmente, el tiempo de búsqueda en estacionamiento en vía depende de variables relacionadas al estacionamiento como: la tasa de ocupación, la capacidad, la tasa de rotación y la tarifa (Spitaels & Maerivoet, 2008). Lo anterior reafirma el componente espacial y el componente temporal que tiene la circulación de vehículos que buscan un lugar para estacionar (Van Ommeren et al., 2012).

Una recopilación de estudios desarrollados en el siglo veinte en diferentes ciudades muestra tiempos de búsqueda de estacionamiento en vía entre 3.5 y 14 minutos y porcentajes de tráfico que circulaba en búsqueda de estacionamiento entre 8 y 74% (D. C. Shoup, 2006). Mediciones en Francia mostraron tiempos de búsqueda de estacionamiento en vía entre 3.3 y 11.8 minutos y un porcentaje de congestión debido a la búsqueda de estacionamiento entre el 5 al 10% (Gantelet & Lefauconnier, 2006). En zonas residenciales se ha estimado que aproximadamente el 20% del tiempo total de viaje corresponde al tiempo de búsqueda de estacionamiento (J. Van Ommeren et al., 2011). Asimismo, en zonas residenciales se ha estimado que el 20% del tráfico en el área se debe a la búsqueda de estacionamiento (Bischoff & Nagel, 2017). En Holanda, donde los precios del estacionamiento en vía y fuera de vía son iguales, solo el 30% de los vehículos de pasajeros circula en búsqueda de estacionamiento y el tiempo promedio es de tan solo 36 segundos. En cuanto al propósito de viaje, se estimó que en Holanda el tiempo de búsqueda es mayor para viajes de compras o viajes de ocio comparada con los viajes de trabajo. Asimismo, se estimó que el tiempo de búsqueda aumenta en la medida que el tiempo de viaje y la duración del estacionamiento sean mayor, y disminuye con el nivel de ingreso del conductor. Finalmente, el nivel de ocupación del vehículo no demostró tener una relación con el tiempo de búsqueda de estacionamiento (J. N. Van Ommeren et al., 2012).

Por su parte, Belloche (2015) en su estudio propone modelos para estimar los tiempos de búsqueda de estacionamiento para vehículos particulares. En su modelo la razón de congestión es el factor que determina el tiempo de búsqueda. Este resultado está relacionado con el estudio de Gallo, D'Acierno and Montella (2011) quienes demostraron el impacto del tiempo de circulación de estacionamiento en la congestión. Este último, afirma la utilidad en la estimación del efecto de las políticas de parqueo en la congestión, en el medio ambiente y en los costos sociales. Además, resalta su importancia en la estimación de las tarifas óptimas.

Políticas relacionadas al ajuste de las tarifas se han estudiado para disminuir o eliminar los tiempos de búsqueda y circulación (Arnott et al., 2015; D. Shoup, 2011b; D. C. Shoup, 2006; J. Van Ommeren et al., 2011). Sin embargo, estudios como los de Shoup (2011a) advierten que políticas mal implementadas pueden llevar a un aumento del 30% del tráfico debido al aumento del número de vehículos que circulan en búsqueda de estacionamiento. Por otra parte, el uso de aplicaciones tecnológicas para la búsqueda y/o reserva de estacionamientos se han mostrado como una opción para reducir el tiempo de búsqueda (Teng et al., 2002).

2.2 Preferencias de los usuarios al estacionar

La elección del estacionamiento es un proceso de decisión bastante complejo en el que influyen muchos factores (Chaniotakis & Pel, 2015). En la literatura se encuentran un gran número de trabajos en los que se han estimado modelos que buscan reflejar las preferencias de los usuarios al momento de estacionar. Sin embargo, el principal foco de la literatura ha estado en los modelos de elección de estacionamiento de los conductores de vehículos de pasajeros (Dalla Chiara et al., 2020). Al respecto, Dalla Chiara et al., (2020) hacen una revisión de los 16 modelos de elección más relevantes para los usuarios de vehículo de pasajeros. Su revisión empieza con el trabajo de Gillen (1978) y termina con Soto et al. (2018). De cada uno de los modelos expone el tipo de información utilizada, la elección que se modela, el enfoque de modelación y las principales variables incluidas en la modelación. La Tabla 1 muestra un resumen de los modelos de elección para pasajeros más recientes (2018-2022). El objetivo es actualizar la revisión desarrollada por Dalla Chiara et al., (2020).

Tabla 1. Modelos de elección discreta de estacionamientos (2018-2022) -vehículos de pasajeros.

Autor (Año)	Datos	Elección	Enfoque	Variables Principales Incluidas					
				Tarifa	Tiempo. Búsqueda	Tiempo. Caminata	Duración	Disponibilidad/ Ocupación	VSG
Khaliq et al., (2018)	PD	Tipo	MNL	SI	NO	NO	SI	NO	NO
X. H. Li et al., (2019)	PD	Tipo	ML	SI	NO	SI	NO	SI	SI
Qin et al., (2020)	PD	Tipo-Localiz	MNP	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Ben Hassine et al., (2022)	PR	Tipo	MNL	SI	SI	SI	SI	NO	SI
J. Li et al., (2021)	PD	Tipo	BL	SI	NO	NO	SI	NO	SI
Qin et al., (2022)	PD	Localiz	MNL	SI	NO	SI	NO	SI	SI
Rodríguez et al., (2022)	PD	Tipo	HL	SI	SI	SI	NO	SI	NO
Mahmud et al., (2022)	PD	Tipo-Localiz	LPP	SI	SI	SI	NO	NO	SI
<u>Datos:</u>					<u>Enfoque:</u>				
PD: Preferencia declarada					MNL: Logit multinomial				
PR: Preferencia revelada					ML: Logit mixto				
<u>Elección:</u>					MNP: probit multinomial				
Tipo: En vía, Fuera de vía, Ilegal, entre otros					BL: Logit Binario				
Localiz: Localización del estacionamiento.					LPP: preferencia preliminar latente				

Fuente: Elaboración propia.

Entre los trabajos más recientes se encuentra Khaliq et al., (2018) quienes utilizaron un experimento de preferencias declarada basado en el método de información jerárquica integrada (Hierarchical Information Integration method, HII). Siguiendo esta metodología evaluaron un gran número de atributos como la tarifa, el tiempo de acceso, la duración esperada, las opciones de pago, el número de calles visitadas en

búsqueda de estacionamiento, las condiciones de la calle (límite velocidad, actividades alrededor y disponibilidad de estacionamientos) y condiciones del estacionamiento (ocupación, seguridad, límite de uso). Finalmente, siguiendo un enfoque de modelación tipo MNL aplicado a los datos recolectados en Bélgica, solo la tarifa, la duración esperada, el límite de uso del estacionamiento, las actividades alrededor de la zona y el límite de velocidad resultaron significativas. Ben Hassine et al., (2022) con información tomada en la ciudad de Túnez, estimaron un MNL para la elección de estacionamiento, los resultados de las utilidades marginales mostraron que los conductores eran más sensibles para cambiar sus elecciones en términos del ahorro en el tiempo de búsqueda que en términos del tiempo de caminata. Además, las tres alternativas consideradas (En vía, fuera de vía y subterráneo) mostraron la misma elasticidad y efecto marginal para el tiempo de caminata.

Otros autores han estimado modelos de elección como parte de una metodología para estudiar otros aspectos relevantes de los estacionamientos. Qin et al., (2020) utilizan un modelo probit multinomial, para entender el comportamiento de búsqueda y las elecciones de los usuarios para estacionar en la vía considerando decisiones secuenciales durante el periodo de búsqueda de estacionamiento. El principal resultado de este estudio es que la distancia recorrida en proceso de búsqueda, la distancia de caminata al destino y la tasa de ocupación de los estacionamientos son los factores que afectan el comportamiento de búsqueda. Además, cuanto más cerca están los conductores de su destino, es más probable que elijan estacionar en la vía. J. Li et al., (2021) estiman un modelo logit binario para ser usado dentro de un modelo de optimización del precio del estacionamiento en vía. El modelo de optimización considera tres tipos de usuarios definidos según el tiempo de permanencia en el estacionamiento y cada tipo de usuario le es asociado un costo de estacionamiento esperado. Qin et al., (2022) estimaron un modelo MNL para ser incluido dentro de una simulación de búsqueda de estacionamiento en vía y explorar el efecto de la variación de los precios de estacionamiento en la demanda y sobre el tráfico vial. Los resultados mostraron que las tarifas dinámicas pueden regular la distribución de la demanda, asegurar la utilización de las plazas de estacionamiento alrededor de los distritos comerciales y mejorar el desempeño del flujo vehicular. Rodríguez et al. (2022) utilizaron un modelo logit jerárquico para modelar la elección de estacionamiento. Este modelo hace parte de la descripción del comportamiento de usuario que va incluido dentro del modelo de búsqueda de estacionamiento propuesto para analizar diferentes políticas de gestión del estacionamiento. Sus resultados mostraron la relevancia de incluir la dinámica de los estacionamientos en vía en la micro simulación de tráfico vehicular.

Asimismo, algunos estudios han utilizado el escenario de elección del estacionamiento para explorar métodos de elección de los usuarios. X. H. Li et al., (2019) consideran un escenario de elección de estacionamiento para indaga acerca de la heterogeneidad en las reglas de decisión de grupos de usuarios. Su principal conclusión es que los grupos de usuarios pueden delimitarse ya que las reglas de decisión son diferentes para diferentes usuarios en la misma situación de decisión, y las reglas de toma de decisiones para los mismos usuarios en diferentes escenarios también son diferentes. Finalmente, Mahmud et al., (2022) aplican una encuesta de preferencia de estacionamiento para examinar la presencia de aversión a la pérdida y la inercia o diversificación en el comportamiento de búsqueda de los usuarios. Para ello, plantea el modelo de preferencia preliminar latente (LPP), que utiliza para estimar las probabilidades de

preferencia preliminar (PP) en función de las características del tomador de decisiones y los atributos de cada alternativa.

Tabla 2. Modelos de elección discreta de estacionamientos-vehículos de carga.

Autor	Datos	Elección	Enfoque	Variables Principales Incluidas					VSG
				Tarifa	Tiempo. Búsqueda	Tiempo. Caminata	Esperanza de Multa	Disponibilidad/Ocupación	
Nourinejad et al., (2014)	PR	Tipo, Localiz	BL	NO	NO	SI	NO	NO	NO
Dalla Chiara et al., (2020)	PR	Tipo	ML	SI	NO	NO	SI	SI	SI
Gopalakrishnan et al., (2020)	PR	Tipo	MNL	SI	NO	SI	NO	NO	SI
<u>Datos:</u>					<u>Enfoque:</u>				
PR: Preferencia revelada					MNL: Logit multinomial				
<u>Elección:</u>					ML: Logit mixto				
Tipo: En vía, Fuera de vía, Ilegal, entre otros					BL: Logit Binario				
Localiz: Localización del estacionamiento.									

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la literatura relacionada a modelos de elección de estacionamientos para vehículos de carga es muy limitada. Nourinejad et al. (2014) utilizan datos de preferencias reveladas tomados en Toronto, Canadá para estimar un modelo logit binario para describir la elección de la ubicación y el tipo de estacionamiento de los usuarios de vehículos de carga. Las variables incluidas dentro del modelo son: la distancia al destino y el tipo de estacionamiento (En la vía y bahía de carga/descarga). Este modelo de elección hace parte de un proceso de simulación que evalúa el impacto en el tráfico de diversas políticas de estacionamiento de carga en áreas urbanas. Los resultados del estudio muestran que cuando se reservan algunas calles para el estacionamiento de camiones su tiempo de búsqueda disminuye al mismo tiempo que aumenta los tiempos de búsqueda y caminata para los usuarios de vehículos de pasajero.

Dalla Chiara et al. (2020) utilizan datos de preferencia revelada en un contexto urbano en la ciudad de Singapur. En este contexto, los usuarios de vehículos de mercancía y de servicio que requieren acceder a dos centros comerciales de la zona tienen las siguientes alternativas de estacionamiento: bahías de carga/descarga fuera de vía o estacionar ilegalmente ya sea en doble estacionamiento en la vía o en una plaza dispuesta para automóvil fuera de vía. Con los datos recolectados Dalla Chiara et al., (2020) estiman un modelo logit mixto descrito por: la tarifa, el valor esperado de la multa, la longitud de la cola de las bahías de carga/descarga y el efecto del volumen de mercancías manejadas por trabajador. Luego, analizan la disposición a pagar por estacionar, los efectos de la congestión del estacionamiento, el comportamiento de los conductores cuando están en cola y el comportamiento de los conductores hacia el estacionamiento ilegal. Además, analizan el efecto de las tarifas y el control del estacionamiento ilegal en las elecciones. Finalmente, Gopalakrishnan et al., (2020) desarrollan un modelo de elección de suscripción de estacionamiento nocturno de vehículos de carga para un caso de estudio aplicado en Singapur. El modelo fue implementado dentro de una plataforma de simulación urbana basada en agentes

para la evaluación de políticas. En la Tabla 2 se relacionan los modelos de elección de estacionamiento de vehículos de carga encontrados en la literatura.

De la revisión realizada se observa que aún no se estiman modelos de elección de estacionamiento para vehículos de carga en centros urbanos donde la atracción de viaje no se encuentre localizada en un gran centro de atracción y la principal alternativa disponible sean los estacionamientos en vía. Además, no se han estimado modelos de elección de estacionamiento para vehículos de carga y de pasajeros en el mismo contexto con el fin de comparar la valoración de los factores que rigen sus preferencias al estacionar. Finalmente, no se explorado la influencia de la actitud de los conductores al estacionar en la elección de los usuarios.

2.3 El problema de asignación de estacionamientos en vía

El problema de asignación de espacios de estacionamiento ha sido estudiado a lo largo de los años utilizando diferentes enfoques y considerando varios factores. El problema de asignación discutido en esta tesis es desde la perspectiva de la planificación del espacio urbano cuando diferentes usuarios requieren el espacio disponible para estacionar. En otras palabras, tenemos tomadores de decisiones que buscan obtener el máximo beneficio asignando el espacio disponible entre los usuarios que interactúan en el entorno urbano y que requieren la infraestructura para estacionar.

Sin embargo, la mayoría de los artículos estudian el problema de la asignación de espacios desde la perspectiva de la gestión. Es decir, los espacios ya están asignados a un tipo de usuario determinado. Luego, los modelos determinan, a nivel operativo, qué usuario ocupa el espacio de estacionamiento de acuerdo con los objetivos establecidos y considerando diferentes factores y requisitos. A excepción de Errouso et al. (2021), los estudios de estacionamiento previos no se enfocan en determinar el número de estacionamientos requeridos por los usuarios, sino que analizan la operación de las plazas de estacionamiento asignados por cada tipo de usuario por separado.

Considerando la asignación de espacios de estacionamiento para vehículos de pasajeros en áreas urbanas, Wey (2003) la formuló como un problema dinámico de p-medias cuyo objetivo era encontrar la mejor ubicación para un número preestablecido y limitado de espacios de estacionamiento, considerando la distancia al destino y la demanda variable en el horizonte de planificación. Aydinoglu & Iqbal (2021) calcularon la oferta y la demanda de estacionamiento mediante métodos de análisis geográfico, luego compararon los resultados del problema de ubicación-asignación utilizando un análisis de p-medias y el método de cobertura máxima. Este método maximiza el número de puntos de demanda cubiertos dentro de una distancia dada o tiempo de viaje dado un número predeterminado de puntos de oferta.

Otro grupo de artículos trata sobre el problema de la ubicación de los estacionamientos públicos (*Public Parking Facility*, PPF). Los objetivos planteados recurrentemente son la minimización de la distancia desde el estacionamiento hasta el destino y los costos totales, por ejemplo, precio de uso de suelo, costo de construcción y costo de operación, entre otros (Ni et al., 2013; Y. Wang et al., 2018; Z. Wang et al., 2008). Otros objetivos menos recurrentes son la minimización de las emisiones de CO₂ para las redes viales urbanas a través de la optimización del flujo de tráfico en cada segmento vial (Shen et al., 2019); y la

minimización de la distancia promedio a lugares de interés como monumentos históricos, centros recreativos, administrativos y comerciales (Alinia et al., 2015; Jelokhani-Niaraki & Malczewski, 2015). El trabajo reciente sobre PPF de Aydin, (2022) propuso un modelo matemático que considera la demanda estocástica, el tiempo de caminata a los estacionamientos, el costo de las instalaciones y las emisiones de CO₂.

Los objetivos del problema de localización de áreas de carga y descarga para el transporte de mercancía, mini-hubs y apartaderos para vehículos de carga varían. Aiura & Taniguchi (2006) propusieron un modelo de simulación y optimización para minimizar los costos totales definidos por multas por demora, costos fijos, costos de operación, tarifas de estacionamiento y costos de espera de automóviles de pasajeros ilegales y vehículos de recogida y entrega. Dezi et al. (2010) proponen un método empírico que permite optimizar el tamaño, número y ubicación de los muelles de carga/descarga para maximizar la cobertura del transporte de carga. Muñuzuri et al. (2012) estimaron un modelo de ubicación de mini-hub basado en algoritmos genéticos para vehículos de carga. Su función objetivo minimizaba el costo de entrega en términos de distancia al destino considerando la densidad comercial y el tiempo de acceso. Pinto et al. (2016) presentan un enfoque mixto de simulación analítica-Monte Carlo para encontrar una distribución óptima y tamaños de estacionamiento relativos de acuerdo con la demanda y la ubicación de las actividades comerciales. Su objetivo era encontrar el número mínimo de apartaderos que permitieran cubrir en un radio de peatones considerando todos los destinos de entrega.

Además, Muñuzuri et al. (2017) proponen una metodología de dos etapas para establecer el número, ubicación y asignación de zonas de carga para una calle o área determinada. En su metodología, primero estiman el número de zonas de carga considerando el nivel de servicio y tres posibles estimaciones de demanda (demanda promedio, hora de máxima demanda y demanda coincidente). En la segunda etapa, proponen dos funciones objetivo para ubicar/asignar plazas considerando las características de los establecimientos: minimizar la suma-producto de la distancia y la demanda y minimizar el máximo producto entre la distancia y la demanda de cada establecimiento. Tamayo et al. (2017) presentan un modelo de optimización para evaluar los espacios de carga/descargas existentes y determinar la ubicación óptima de los nuevos, considerando las distancias reales, el radio de influencia y las restricciones físicas. Alho et al. (2018) propusieron un modelo de simulación y optimización que determina el número y el tamaño óptimos de las plazas de estacionamiento. Su objetivo era maximizar la cobertura involucrando factores como la distancia al destino y el flujo vehicular. Además, estimaron cambios en el sistema si se aplicaba el control al uso ilegal de bahías y utilizaron el cambio en el flujo vehicular como indicador de mejoras en el sistema de bahías. Por su parte, Letnik et al. (2018) desarrollaron un modelo de optimización que utiliza el agrupamiento difuso de k-means de receptores con un algoritmo de enrutamiento para seleccionar dinámicamente el número y la ubicación óptimos de los muelles de carga y administrar las entregas de carga urbana. El estudio probó dos estrategias de gestión para medir las distancias recorridas por los operadores, los tiempos de viaje, las emisiones de CO₂ y los ahorros en el consumo de energía. Comi et al. (2018) presentan una metodología que integra la planificación y gestión de las bahías aprovechando la información en tiempo real que ofrecen los sistemas inteligentes de transporte. En la etapa de planificación, utilizan un enfoque de simulación de eventos discretos para comparar con uno

base. Su objetivo era satisfacer la demanda de entrega para promover el uso legal del estacionamiento en vía y reducir la interferencia con otros usuarios de la vía.

Involucrar a diferentes tipos de usuarios en el proceso de planificación del espacio de estacionamiento es muy inusual en la literatura. Ciertos estudios implican la planificación de áreas de carga/descarga de usuarios de vehículos de pasajero para resaltar las consecuencias y plantear soluciones al comportamiento inadecuado de estos usuarios, que en ocasiones estacionan ilegalmente en estas zonas (Aiura & Taniguchi, 2006; Alho et al., 2018; Delaître, 2009). Amer & Chow (2017) utilizan un modelo de equilibrio de estacionamiento con el comportamiento de flujo de tráfico que relacionan el comportamiento de los usuarios de automóviles y camiones. Los resultados proporcionan una herramienta para los tomadores de decisiones que optimiza las compensaciones en la proporción del área de la calle asignada a espacios de estacionamiento, los precios y la congestión de la red. Según la revisión realizada, solo Errousso et al. (2020, 2021) proponen una herramienta de gestión que asigna espacios a los transportistas de carga y transporte privado. Su enfoque consiste en un modelo de dos niveles. El primer nivel asigna las solicitudes de los usuarios a una zona de la ciudad, mientras que el segundo nivel asigna un espacio de estacionamiento de acuerdo con algunos criterios. Su modelo utiliza la teoría difusa para dar cuenta de la naturaleza imprecisa de los parámetros en la asignación.

El enfoque de esta tesis se alinea con la visión de Errousso et al. (2020) al considerar conjuntamente la selección de espacios de estacionamiento tanto para carga como para vehículos privados. Sin embargo, considerar la variación en la asignación de los espacios disponibles en tiempo real, según la demanda de vehículos de carga y pasajeros en el periodo evaluado puede ser complejo en algunos contextos. Tal es el caso de las ciudades con menor capacidad de inversión tecnológica, ciudades con escasez de información en tiempo real y ciudades donde los usuarios tienen restricciones para obtener información en tiempo real. Además, en línea con Aydin (2022), se formuló el problema desde la perspectiva del tomador de decisiones, pero con la ubicación del estacionamiento en vía para usuarios de automóviles y camiones.

Específicamente, se proponen herramientas flexibles y multicriterio de planificación de estacionamiento en vía para los tomadores de decisiones que podría usarse en contextos más restrictivos (es decir, sin información en tiempo real) y proporcionar beneficios en áreas de crecimiento económico donde no exista una planificación previa o se deba redistribuir el espacio disponible. Los criterios de asignación propuestos consideran las principales necesidades de los usuarios que requieren el espacio de estacionamiento, al mismo tiempo que buscan mitigar las externalidades ocasionadas por el sistema de estacionamiento.

2.4 Estrategias y políticas de planificación de estacionamientos en vía

Las estrategias y políticas de planificación de estacionamiento tienen por objetivo mejorar el nivel de servicio de los usuarios proveyendo espacios adecuados, mientras se disminuyen las externalidades ocasionadas en el sistema. Usualmente, se suelen implementar un conjunto de estrategias y políticas en una misma área de estacionamiento, sin embargo, cada una de las estrategias y políticas tiene un impacto diferente y su aplicación o no, dependerá del contexto, es decir, según las necesidades y características específicas del área urbana. A continuación, se describen las estrategias y políticas para estacionamiento

en vía más comunes encontradas en la literatura. Las estrategias y políticas se han clasificado en dos grupos el primero son las estrategias y políticas relacionadas a la infraestructura y el segundo son las estrategias y políticas relacionadas a la gestión de los estacionamientos. Esta tesis doctoral pretende contribuir a los lineamientos de las estrategias y políticas relacionadas a la infraestructura. Específicamente, en la asignación de espacios de estacionamiento en vía para usuarios de vehículos de carga y pasajeros.

2.4.1 Estrategias y políticas relacionadas a la infraestructura

Las estrategias y políticas relacionadas a la infraestructura se refieren a las medidas de planificación que involucra la adecuación, modificación o instalación de nueva infraestructura. Los horizontes de planificación de estas estrategias y políticas usualmente son largos y pueden requerir una inversión económica significativa.

2.4.1.1 Estrategias y políticas de localización y asignación

Las estrategias y políticas de localización y asignación de las plazas de estacionamiento buscan proveer espacios eficientes para los requerimientos de los diferentes usuarios. Dentro de este grupo de estrategias y políticas se encuentra, aumentar el número de plazas disponibles, el uso compartido de la infraestructura, ubicar estacionamientos en vías de poco flujo vehicular, distribuir el número de estacionamientos existentes entre diferentes usuarios. Los objetivos pueden ser muy variados, proveer un mejor servicio, maximizar la utilización del espacio, maximizar los ingresos, minimizar las externalidades, priorizar a un tipo de usuario, mitigar las ilegalidades, entre otras. En el apartado 2.3 se describieron algunas metodologías utilizadas para la implementación de este tipo de estrategias y políticas.

Dentro de algunos casos de análisis e implementación de estas estrategias y políticas se encuentra el caso de Sevilla, España, en el que se aplicó una metodología que buscaba modificar la situación actual para encontrar un número y la ubicación de áreas de carga y descarga que resultara en una mejora en el nivel de servicio los resultados produjeron una reducción considerable de la distancia de caminata de los transportadores desde los estacionamientos hasta los lugares de entrega (Muñuzuri et al., 2017). En Barcelona, se implementó un sistema de carriles multipropósito en el que 44 espacios de estacionamiento en vía son utilizados en las horas de máxima demanda como carriles de circulación de autobuses, el resto del día son utilizadas como zonas de carga y descarga y en la noche son utilizadas como estacionamiento de vehículos de pasajero (Russo & Comi, 2011). En Nueva York, se decidió habilitar un mayor número de áreas de carga con el mejorar las condiciones de las entregas en la zona (José Holguín-Veras et al., 2016).

Por su parte, Roca-Riu et al. (2017) proponen el concepto de Dynamic Delivery Parking Spots (DDPS), que son instalaciones de entrega de mercancía ubicadas en la vía que se activan dinámicamente. En el estudio se demostró la ventaja de ubicar estas instalaciones en la mitad de la cuadra ya que conlleva a que las interrupciones en el tráfico se mantienen de forma local reduciendo las demoras.

2.4.1.2 Estrategias y políticas de diseño

Las estrategias y políticas de diseño buscan mejorar la configuración geométrica y las características físicas de los estacionamientos teniendo un impacto en la operación, la estética y la seguridad. En este grupo de estrategias y políticas se encuentra establecer las dimensiones y la disposición de los estacionamientos mejorando la maniobra de entrada y salida de vehículos, aumentando la capacidad del espacio disponible y reduciendo la afectación del flujo vehicular adyacente. Otra política que hace parte de este grupo es disponer de rampas de acceso en las aceras para personas en condición de discapacidad o para el movimiento de mercancía mejorando la accesibilidad, reduciendo el tiempo de permanencia y aumentando la eficiencia en las entregas (Holguín-Veras et al., 2016).

En Washington, dentro de las recomendaciones que surgieron para la entrega de la mercancía se encontraba alargar las zonas de carga y descarga (Jones et al., 2009). Finalmente, en Bolonia se estudiaron las dimensiones que debían tener las zonas de carga y descarga en relación con el tamaño de los vehículos, la configuración de los estacionamientos y las maniobras que realizan los operadores (Dezi et al., 2010).

2.4.2 Estrategias y políticas relacionadas a la gestión

Las estrategias y políticas de la gestión de la infraestructura de estacionamiento hacen referencia a las reglas de operación de los espacios asignados para ser utilizados como estacionamiento. Estas estrategias y políticas pueden ser definidas durante la planificación inicial de las zonas de estacionamiento o se pueden ir implementando o modificando de acuerdo con las necesidades del área urbana o requerimientos de los usuarios.

2.4.2.1 Estrategias y políticas de restricción

Las estrategias y políticas de restricción pueden ser diseñadas por el tiempo o el horario de utilización de la infraestructura o por alguna característica del vehículo, tales como su peso, tamaño, capacidad o potencial de contaminación entre otras. Estas estrategias y políticas tienen como principal objetivo mitigar los conflictos entre los diferentes usuarios que necesitan la infraestructura. Sin embargo, también pueden ser usadas como forma de priorización o incentivo a un tipo de usuario o para adoptar un comportamiento o cambio dispuestos por las autoridades. En estos últimos casos es más común que la restricción vaya sobre el acceso al área y no sobre el uso del estacionamiento. Un ejemplo de lo anterior son las estrategias y políticas que fomentan la utilización y renovación de la flota de vehículos con menor impacto ambiental. Por un lado, lo más común es crear una zona de bajas emisiones restringiendo el ingreso de vehículos con un estándar de emisiones, sin embargo, aplicar restricciones en los estacionamientos con los mismos estándares también es una alternativa. En Bremen, Alemania, en una zona donde normalmente es un desafío encontrar estacionamiento disponible, se asignaron algunas plazas para uso exclusivo de vehículos de carga que cumplen con estrictos estándares de desempeño ambiental (Holguín-Veras et al., 2020).

Por otra parte, otros ejemplos de estrategias y políticas de restricción es el caso de París, donde se aplicó la restricción en el tiempo de permanencia de los vehículos de carga en los estacionamientos hasta 30 minutos. En Gotemburgo se restringió el uso de las bahías de carga y descarga para vehículos con factor de carga menores de 65% (Russo & Comi, 2011). En el distrito de Westminster en London, se emitió un

protocolo de control para las zonas de estacionamiento que permitía que los vehículos de mercancía pudieran realizar sus entregas sin restricción de tiempo en la franja horaria entre las 8:30 y las 11:00 am (Browne et al., 2007).

En Nueva York se implementó una estrategia de ventana de tiempo en la cual se establecieron periodos para que los estacionamientos fueron usados por vehículos de carga y otros para ser usados por vehículos de pasajero (Holguín-Veras et al., 2015). Además, en el centro de Manhattan se establecieron un conjunto de normativas adicionales para la entrega de la mercancía relacionadas con el método de estacionamiento, el límite de tiempo de espera y restricciones en algunas áreas internas (Holguín-Veras et al., 2016). Finalmente, en Roma, se han aplicado varias restricciones combinando criterios de horarios y capacidad del vehículo, por ejemplo, los camiones de más de 3,12 toneladas solo pueden estacionar en el horario de 8:00 pm a 7:00 am (Holguín-Veras et al., 2020).

2.4.2.2 Estrategias y políticas de tarificación

Las estrategias y políticas de tarificación en estacionamientos se pueden establecer como una estrategia de gestión que favorece la rotación de los estacionamientos o como una estrategia de gestión que favorecen el flujo vehicular (Maternini et al., 2017). En todos los casos establecer las tarifas de estacionamiento es una labor compleja debido a su efecto sobre la demanda y la dependencia con varios factores (ver apartado 2.1.2). Las estrategias y políticas de tarificación de estacionamiento más común son: la tarificación variable según duración, hora del día o día de la semana; la tarificación basada en la ocupación de los estacionamientos; y la tarificación dinámica.

En San Francisco, dentro del proyecto *SFpark*, se implementó la tarificación basada en la ocupación acompañado de una restricción por límite de tiempo. Los resultados mostraron reducciones en el tiempo de búsqueda de estacionamiento y distancias de caminata hasta el destino (Maternini et al., 2017). Por otra parte, dentro del plan de mejora de las entregas de carga en la ciudad de Nueva York, se implementó una estructura de tarifas variable según la duración del estacionamiento para asegurar una mejor rotación de los estacionamientos. Los resultados mostraron una reducción en la duración promedio del estacionamiento de los vehículos de carga (Holguín-Veras et al., 2016).

2.4.2.3 Estrategias y políticas de implementación de sistemas inteligentes

Las estrategias y políticas de implementación de sistemas inteligentes van orientados a mejorar el sistema de reserva, búsqueda, cobro y control de la ilegalidad de las plazas de estacionamiento. Además, también van asociados al monitoreo de la ocupación y la seguridad de estos espacios.

Existen varios casos donde se han implementado sistemas inteligentes para la gestión de los estacionamientos. En Roma en la zona de bajas emisiones, se han monitoreado en tiempo real las zonas de carga y descarga con el fin de controlar y mejorar su tiempo de uso (Comi et al., 2017). En el proyecto *SFpark* en San Francisco implementaron sistemas inteligentes para monitorear la ocupación y establecer las tarifas variables (Maternini et al., 2017). Asimismo, en Londres, se implementó una aplicación móvil, *ParkRight*, que informaba a los usuarios de la disponibilidad de estacionamientos y además se podía consultar información de las tarifas, horas de funcionamiento y el pago. La aplicación, se alimentaba de

datos en tiempo real que provenían de sensores instalados en los estacionamientos en vía. La evaluación de este caso de aplicación mostró los beneficios potenciales en cuanto a la disminución de emisiones contaminante, el gasto en combustible (Peng et al., 2017).

3 Metodología

Teniendo en cuenta los objetivos planteados, esta investigación se realizó en cuatro fases (Figura 1). La primera fase corresponde a la revisión de la literatura y construcción del estado del arte. Esta fase fue desarrollada desde el planteamiento de la propuesta de investigación hasta el cierre de este documento y se logró a través del acceso a las diferentes bases de datos científicas y la participación en diferentes encuentros académicos durante los últimos años. Los resultados de esta fase se resumen en el capítulo anterior (Capítulo 2). La segunda fase fue la modelación de las preferencias de los usuarios de vehículos de carga y pasajero al momento de elegir donde estacionar. La metodología utilizada dentro de esta actividad se presenta en el apartado 3.1 y sus resultados e implicaciones en el capítulo 0. La tercera fase corresponde a la formulación y aplicación del modelo de planificación de estacionamientos en vía para usuarios de vehículos de carga y pasajero. La metodología utilizada se describe en el apartado 3.2 de este capítulo y sus resultados y discusión se presentan en el capítulo 0. Finalmente, la cuarta fase corresponde al planteamiento de recomendaciones, conclusiones y descripción de líneas futuras, basado en los principales resultados obtenidos durante la investigación (capítulos 6 al 8).



Figura 1 Esquema metodológico.

3.1 Modelo de elección

Para entender los atributos que influyen en las preferencias de los usuarios de vehículos de carga y de pasajeros al momento de elegir un lugar para estacionar se utilizaron modelos de elección discreta estimados con información recolectada a partir de encuestas de preferencias declaradas. Estas encuestas además incluyeron preguntas acerca de la conducta que tienen los usuarios de carga y pasajeros al

estacionar. Estos modelos permiten comparar la valoración de los principales atributos entre los dos tipos de usuarios y considerar la influencia de la conducta, conceptualizada como una variable latente. A continuación, se detalla el diseño de las encuestas y se plantea el enfoque de modelación.

3.1.1 Diseño de encuesta

El estudio requirió el diseño de dos encuestas, uno para cada tipo de usuario, con información relacionada al uso y elección de estacionamientos en vía. Para diseñar los instrumentos se realizó una revisión de la literatura, se hicieron visitas a diferentes zonas de la ciudad de Cartagena con diferentes condiciones para los estacionamientos, y se realizaron entrevistas semiestructuradas tanto a conductores de vehículo de carga como de pasajeros. Con la información recolectada, se realizaron diseños preliminares, los cuales se probaron mediante una prueba piloto que incluyó 18 encuestas a usuarios de vehículos de pasajeros y 29 encuestas a usuarios de vehículos de carga. La encuesta piloto permitió mejorar la redacción y contenido de los instrumentos.

El diseño final de ambas encuestas se dividió en cuatro secciones:

Sección 1: Información acerca de la última visita de los conductores a la zona.

Sección 2: Experimento de elección discreta.

Sección 3: Evaluación de indicadores actitudinales.

Sección 4: Información adicional (socioeconómica).

A continuación, se muestran los detalles de las encuestas a cada tipo de usuario.

3.1.1.1 Conductores de vehículos de carga

En la primera sección de la encuesta a los conductores de vehículos de carga se les pidió recordar la entrega más grande que habían realizado en la última visita a la zona donde se encontraban. Seguidamente, se les preguntó por el tipo de producto que entregaron, el lugar donde estacionaron, el tiempo que les tomó encontrar un lugar para estacionar y el tiempo que demoraron en descargar y entregar la mercancía.

En la segunda sección de la encuesta, se diseñó un experimento de Preferencias Declaradas (PD). El escenario hipotético de elección situó a los conductores justo en el momento cuando debían hacer una entrega. Las cuatro alternativas de estacionamiento presentadas fueron: dos alternativas de estacionamiento sobre la vía, estacionarse ilegalmente sobre la vía, o seguir buscando una mejor opción. La diferencia entre las dos opciones de estacionamiento en vía era que siempre la distancia de la segunda alternativa era más grande y con un costo menor. A los encuestados se les explicó que la alternativa de estacionarse ilegalmente implicaba estacionar al frente del lugar de la entrega ocasionando congestión y con el riesgo de ser multados.

Los atributos utilizados en el experimento fueron: la distancia al destino, la tarifa del estacionamiento, la probabilidad de ser multado, la hora del día, el número de entregas realizadas hasta ese momento, el tiempo restante para realizar la entrega, el tiempo de búsqueda y la duración del estacionamiento. El

número total de entregas en el día, el número de entregas realizadas hasta ese momento, y la duración del estacionamiento se establecieron a partir de la información proporcionada por el conductor en la primera sección de la encuesta. En la Tabla 3 se presentan los atributos y los niveles utilizados en el experimento. En total se le presentaron 6 escenarios de elección a cada conductor, tomados de un diseño eficiente realizado en el software NGENE. La Figura 2 muestra un ejemplo de escenario de elección de la encuesta.

Tabla 3. Atributos y niveles del experimento de elección – Conductores de vehículo de carga.

Atributo(unidades)	Niveles	En vía 1	En vía 2	Ilegal	Seguir Buscando
Distancia al destino (bloque*)	3	½, 1, 2	1,2,3	(Al frente)	-
		3600	2400		
Tarifa (COP/hora)	3	2400	1200	-	-
		1200	600		
Probabilidad de multa	Aleatorio	-	-	Entre 1/20 y 1	-
Duración (min)	-	Dato reportado			
Hora del día	3	Mañana, tarde, noche			
Tiempo restante (min)	3	10, 30, 60			
Tiempo de búsqueda (min)	3	5,20,40			
Entregas realizadas (%)	3	20, 60, 80			
Número total de entregas	-	Dato reportado			

*Un bloque es aproximadamente 200 metros de longitud horizontal

Fuente: Elaboración propia.

N° total de entregas: (dato reportado)

Hora del día: Mañana

N° de entregas realizadas: (80% de las reportadas)

Tiempo restante para completar la entrega: 10 minutos

Tiempo que lleva buscando estacionamiento: 20 minutos

Tiempo de espera y descarga: (dato reportado)

Escenario 2	En vía 1	En vía 2	Ilegal
Distancia al destino	2 cuadras	3 cuadras	Frente al destino
Tarifa (\$/hora)	\$2.400	\$600	\$0
Probabilidad de multa	---	---	7 de cada 10 vehículos

Elección ☐ En vía 1 ☐ En vía 2 ☐ Ilegal ☐ Seguir buscando

Figura 2. Ejemplo de escenario de elección - Conductores de vehículo de carga.

La tercera sección de la encuesta evalúa indicadores relacionados a las conductas habituales de los conductores al estacionar. En esta sección los conductores debían indicar el grado de acuerdo con cada una de las frases presentadas. Se utilizó una escala Likert de 5 niveles: 1) Muy en desacuerdo, 2) En desacuerdo, 3) Ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4) De acuerdo y 5) Muy de acuerdo. La Tabla 4 muestra los indicadores presentados y la notación que se utilizará a lo largo del documento.

Tabla 4. Indicadores actitudinales – Conductores de vehículo de carga

Indicadores	Notación
Evito estacionar en zonas prohibidas	Evito zonas prohibidas
Intento estacionar en zonas seguras.	Busco zonas seguras
Estaciono frente al lugar de la entrega sin importar que provoque un poco de congestión.	Causo congestión
Para cumplir con la entrega, me permito descargar en la vía pública	Descargo en la calle
Si tengo que entregar y no hay espacio disponible, uso la acera	Utilizo la acera

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la cuarta sección de la encuesta se les preguntó información socioeconómica tal como: edad, nivel de ingreso, nivel de educación, años de experiencia como conductor e información de las operaciones de carga: la capacidad del vehículo, el tipo de contrato de trabajo (salario fijo o pago por entrega), el tipo de operación (tiempo de entrega fijo, ruta hasta finalizar, ruta hasta que se acabe la jornada laboral), quién es el propietario del vehículo, quién paga las multas por estacionamiento ilegal y la frecuencia con la que realiza las entregas en la zona.

3.1.1.2 Conductores de vehículos de pasajeros

En el caso de los conductores de vehículos de pasajeros, en la primera sección de la encuesta se les pidió recordar acerca de su última visita a la zona. Luego se les preguntó cuál había sido el propósito del viaje, la ocupación del vehículo, en donde se estacionaron, a qué distancia se encontraba el estacionamiento del lugar de destino, el tiempo que demoraron en encontrar donde estacionar, y el tiempo que estuvo su vehículo estacionado.

En la segunda sección de la encuesta, al igual que para la encuesta de carga, se seleccionaron 6 escenarios y cuatro alternativas de elección. Las cuatro alternativas fueron: un estacionamiento en vía, un estacionamiento informal, un estacionamiento fuera de vía, y seguir buscando. La alternativa de estacionamiento informal implica un pago voluntario para un cuidador informal.

Los atributos utilizados en el experimento de la encuesta para los conductores de vehículos de pasajeros fueron la distancia al destino, la tarifa de estacionamiento, el propósito del viaje, la duración en el

estacionamiento, la hora del día, la hora de búsqueda, el clima y la hora de llegada. Tabla 5 muestra los atributos y los niveles utilizados en el diseño del experimento. Los datos relacionados con el propósito de viaje, la tarifa a pagar al cuidador informal y la duración del vehículo en el estacionamiento fueron tomados de las respuestas de la primera sección de la encuesta. La Figura 3 muestra un ejemplo de un escenario de elección.

Tabla 5. Atributos y niveles del experimento de elección – Conductores de vehículo de pasajeros

Atributo (unidades)	Nivel	En vía	Informal	Fuera de Vía	Seguir buscando
Distancia (bloque*)	3	½, 1, 2	½, 1, 2	1,2,3	-
		3500		3500	
Tarifa (COP/hora)	3	2500	Dato reportado	3000	-
		2000		2500	
Propósito del viaje			Dato reportado		
Duración (min)			Dato reportado		
Hora	3		Mañana, tarde, noche		
Tiempo de búsqueda (min)	3		5,15,30		
Clima	3		Soleado, nublado, lluvioso		
			15 minutos antes		
Hora de llegada	3		A tiempo		
			15 minutos de retraso		

*Un bloque es aproximadamente 200 metros de distancia horizontal

Fuente: Elaboración propia.

Propósito del viaje: (dato reportado)

Clima: Soleado

Hora del día: Tarde

Hora de llegada: 15 minutos de retraso

Tiempo que lleva buscando estacionamiento: 5 minutos

Duración: (dato reportado)

Escenario 3	Pago En vía	Cuidador Informal	Privado Fuera de vía
Distancia al destino	1/2 cuadra	1 cuadra	3 cuadras
Tarifa (\$/hora)	\$2.000	dato reportado	\$2.500

Elección ☐ En vía ☐ Informal ☐ Fuera de vía ☐ Seguir buscando

Figura 3. Ejemplo de escenario de elección – Conductores de vehículo de pasajeros

Al igual que en la encuesta para los conductores de vehículos de carga, en la sección tres de la encuesta de conductores de vehículos de pasajeros se evaluaron indicadores actitudinales usando una escala Likert de cinco niveles. Los indicadores y la notación se presentan en la Tabla 6. Por último, la cuarta sección de las encuestas recoge información adicional relacionada con las características socioeconómicas e información de viaje a la zona como: la edad, el nivel de ingresos, el nivel educativo, el género, años de experiencia conduciendo, el tipo de vehículo, la frecuencia con la que visita la zona, y si suele estacionar en estacionamientos informales.

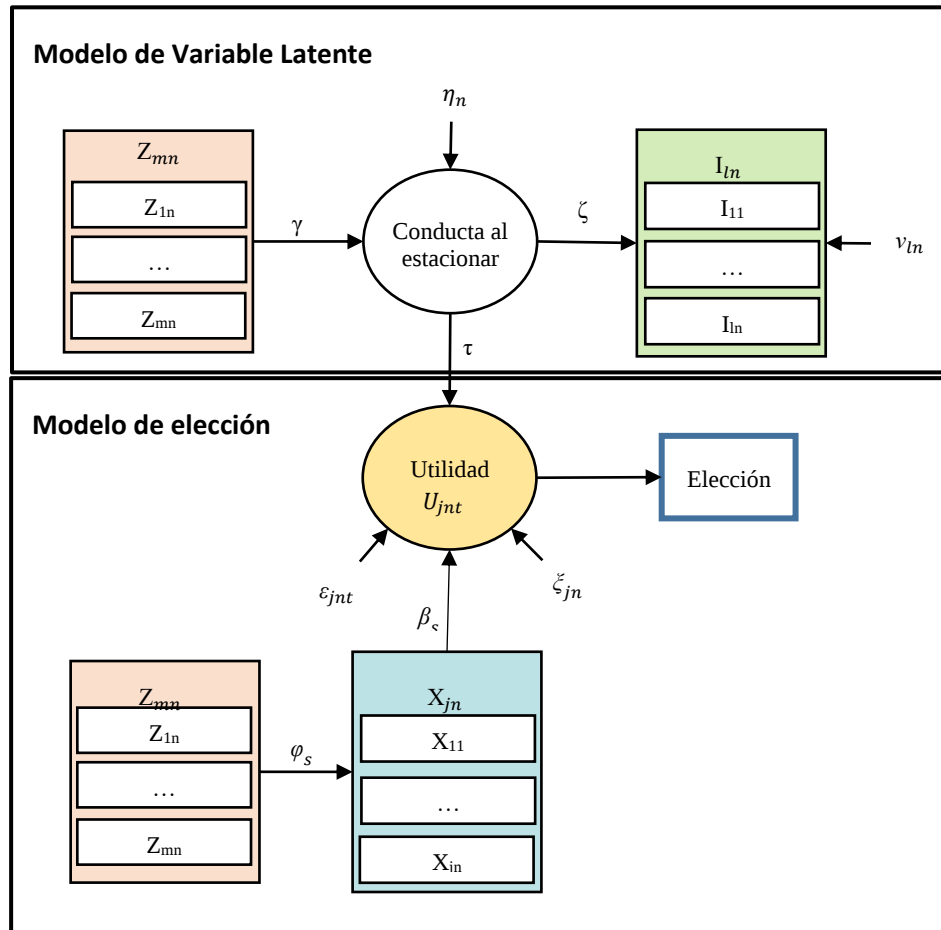
Tabla 6. Indicadores actitudinales – Conductores de vehículo de pasajero.

Indicadores	Notación
Evito estacionar en zonas prohibidas	Evito zonas prohibidas
Prefiero estacionar mi vehículo en zonas con vigilancia, aunque sea más costoso	Busco zonas seguras
Para llegar a tiempo, estaciono frente a mi destino sin importar que provoque un poco de congestión.	Causo congestión
Si tengo que estacionar rápidamente y no hay espacio disponible, uso la acera.	Utilizo la acera
No me importa que el estacionamiento no esté en el mismo bloque que mi destino	Camino para acceder

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Enfoque de modelación

Como enfoque de modelación se propone un modelo híbrido de elección discreta (HDC) para analizar las elecciones de los dos tipos de usuarios (conductores de vehículos de carga y pasajero). En general, los modelos de elección discreta permiten conocer la valoración de los diferentes atributos que describen cada una de las alternativas disponibles para los usuarios a la hora de realizar una elección. Algunos de estos modelos permiten además considerar la heterogeneidad en la valoración de los atributos e incluir el efecto panel derivado de tener múltiples respuestas de un mismo individuo asociadas al ejercicio de preferencias declaradas. Adicionalmente, el desarrollo de modelos HDC permite incorporar variables latentes. En este caso particular se plantea un modelo HDC para determinar si la conducta de los conductores a la hora de estacionar influye en la probabilidad de elegir el estacionamiento ilegal en el caso de los conductores de vehículo de carga y el estacionamiento informal en el caso de los conductores de vehículo de pasajeros.

**Figura 4. Marco de modelación del modelo HDC.**

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra el marco de modelación del modelo HDC, el cual se divide en dos partes. La primera parte es el modelo de variable latente y la segunda el modelo de elección. El modelo de variable latente está conformado por las ecuaciones estructurales y las ecuaciones de medida. Por su parte, el modelo de elección está definido por las funciones de utilidad que describen a cada alternativa y el cálculo de la probabilidad de elección. A continuación, se presentan detalles de cada parte del modelo.

A la variable latente se le denominó *Conducta al estacionar*. La ecuación estructural que la conforma está definida por un vector de variables socioeconómicas (Z_{mn}), un vector de coeficientes asociados a esas variables (γ_m) y un término de error independiente y normalmente distribuido con media cero y desviación estándar igual a 1 (η_n), definido de esta manera para efectos de normalización e identificabilidad tal y como se presenta en la ecuación 1.

$$\text{Conducta al estacionar}_n = \gamma_1 * Z_{1n} + \gamma_2 * Z_{2n} + \dots + \gamma_m * Z_{mn} + \eta_n \quad \text{Ec. 1}$$

Por otra parte, las ecuaciones de medida usan los valores de los indicadores actitudinales (I_i) como variables dependientes, según la forma de la ecuación 2:

$$I_i = \zeta_i * VL + v_i \quad \text{Ec. 2}$$

Donde VL es la variable latente *Conducta al estacionar*, ζ_i es el coeficiente que mide el impacto de la VL en I_i y v_i determina el comportamiento del modelo de medida y es dependiente de la naturaleza del indicador. Debido a que los indicadores están modelados como elecciones ordenadas con K niveles, las ecuaciones estructurales están dadas por ciertos umbrales τ_{lk} a estimar dentro del proceso de modelación, acorde a la ecuación 3:

$$I_{ln} \begin{cases} i_1 & \text{if } -\infty < VL_n \leq \tau_{l,1} \\ i_2 & \text{if } \tau_{l,1} < VL_n \leq \tau_{l,2} \\ \vdots & \\ i_k & \text{if } \tau_{l,k-1} < VL_n \leq \infty \end{cases} \quad \text{Ec. 3}$$

La probabilidad de observar un valor específico para I_i está dado por la ecuación 4:

$$P(I_i = j|VL) = F\left(\frac{\tau_{lk} - \zeta_i VL}{\sigma_{vi}}\right) - F\left(\frac{\tau_{lk-1} - \zeta_i VL}{\sigma_{vi}}\right) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde $F(\bullet)$ es la función de la distribución logística acumulada y σ_{vi} es la varianza que en este caso es fijada en 1 por motivos de normalización e identificabilidad del modelo.

Por su parte, el modelo de elección esta descrito por las funciones de utilidades relacionadas a cada alternativa disponible. La ecuación 5 describe de forma general la función de utilidad de las alternativas que hacen parte del modelo HDC donde la variable latente es incluida directamente en esta función. En la ecuación, ASC_i es la constante específica de la alternativa j , X_{jn} es el vector de atributos que definen la alternativa y Z_n es el vector de las características socioeconómica de los individuos. Además, para conocer la relación de las variables, los coeficientes β_x , φ_z y α_{VL} deberán ser estimados en el modelo de elección bajo el supuesto de que el término de error (ε_{jnt}) es aleatorio, y sigue una distribución Gumbel, independiente e idénticamente distribuido.

$$U_{jnt} = ASC_j + \beta_x X_j + \varphi_z Z_n + \alpha_{VL} * VL + \varepsilon_{jnt} \quad \text{Ec. 5}$$

Finalmente, la probabilidad conjunta a ser maximizada de que cada individuo elija una alternativa específica y observe un valor determinado para cada indicador asociado a la variable latente puede escribirse como la siguiente ecuación 6:

$$P(y, I_i | X, Z, VL, ASC) = P(y | X, Z, VL, \beta_x, \varphi_z, \alpha_{VL}) f(I_i = j | VL) g(VL | \gamma_{VL}, Z_{VL}) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde $P(\cdot)$ es la probabilidad de elegir la alternativa de parqueo j en los escenarios de elección, $f(\cdot)$ es la densidad de las ecuaciones de medida del modelo de variable latente y $g(\cdot)$ es la función de densidad de los atributos que describen la variable latente.

3.2 Modelo de planificación estratégica

Este trabajo aborda el problema de asignación de estacionamientos desde la perspectiva de la planificación estratégica del espacio urbano cuando existen diferentes usuarios que requieren el espacio disponible para ser utilizado como estacionamiento. Es decir, tomar decisiones en busca de obtener el máximo beneficio asignando el espacio disponible entre los usuarios que interactúan en el entorno urbano y que requieren la infraestructura para estacionar. El modelo determinará qué estacionamientos se deben asignar a cada tipo de usuario (carga y pasajero).

A continuación, se enumeran las consideraciones generales del problema:

- Se dispone de espacios preestablecidos para ser usados como estacionamiento en vía.
- La fase de modelado se dividirá por períodos.
- La demanda es conocida y corresponde a dos tipos de usuarios (usuarios en camión y usuarios en vehículo de pasajero). Además, para cada usuario se dispone de información sobre el periodo de llegada, la duración de la estancia y su destino.
- Para cada tipo de usuario se conoce información acerca del tiempo máximo que están dispuestos a conducir para encontrar estacionamiento (tiempo de circulación). Por lo tanto, si un usuario no ha sido asignado antes de que haya transcurrido su tiempo máximo de circulación, se asumirá que ha abandonado la zona y no podrá ser asignado en períodos posteriores.
- Para cada usuario se conoce la distancia máxima que está dispuesto a caminar hasta el destino. Por lo tanto, los usuarios sólo estacionarán en las plazas que se encuentren a una distancia inferior a la distancia máxima que estén dispuestos a recorrer.
- Cada plaza de estacionamiento sólo puede asignarse a un único tipo de usuario.
- El decisor conoce los costos y las tarifas asociadas al sistema.

Para analizar el problema de asignación de espacios de estacionamiento se proponen dos enfoques: la maximización del Nivel de Servicio (NS) y la maximización del Bienestar Social (BS) cuyo planteamiento se detallarán en los apartados 3.2.1 y 3.2.2 respectivamente, en los cuales se presentarán los fundamentos, la notación y la formulación matemática utilizada.

En particular, el enfoque de la maximización del bienestar social involucra en su planteamiento la utilización de modelos de elección discreta. Por tanto, para comparar los dos enfoques propuestos se consideró la integración del modelo de elección discreta dentro del modelo de nivel de servicio. La Figura 5 muestra un esquema que resume la relación de los modelos de optimización propuestos, según el enfoque y la integración del modelo de elección discreta. Los tres modelos corresponden a modelos de programación no lineal entera mixta (por sus siglas en inglés Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP).

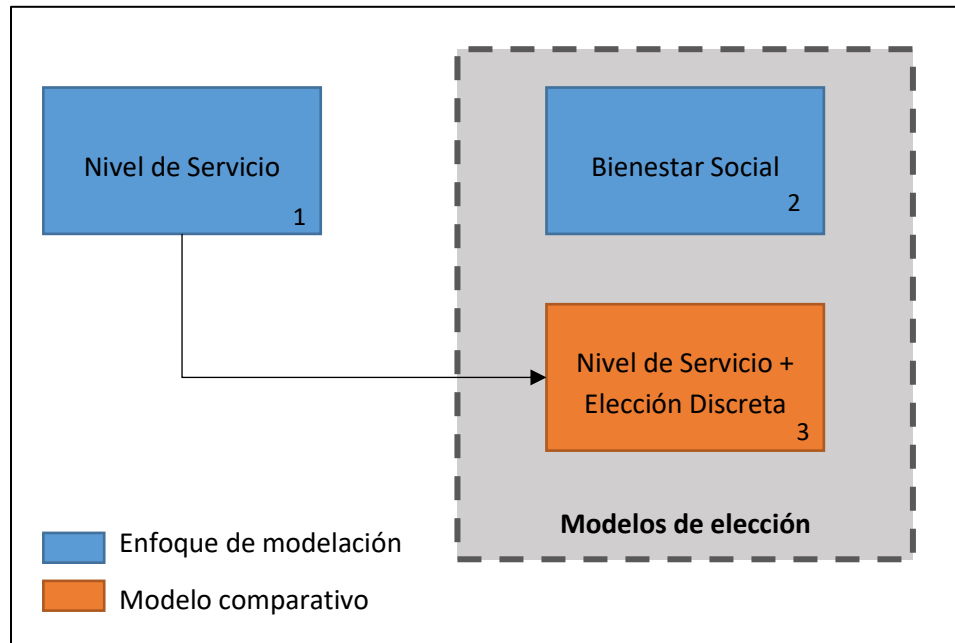


Figura 5. Modelos de planificación propuestos.

3.2.1 Maximización del Nivel de Servicio

El concepto de Nivel de Servicio (NS) para el estacionamiento cambia entre las diferentes investigaciones. Por ejemplo, el NS ha sido definido como método para medir la eficiencia del estacionamiento de instalaciones individuales, basado en la disponibilidad del estacionamiento y la relación flujo/capacidad (Yu & Lincoln, 1973). Se ha utilizado como criterio para el diseño de estacionamientos (Chrest et al., 2012) a partir de la medición de la eficiencia y la accesibilidad del estacionamiento en la acera (Ye et al., 2013); y la ocupación de las diferentes zonas para optimizar la congestión (Fernandez Pozo et al., 2021). También ha servido como herramienta para la prevención del delito a través del diseño del entorno de los estacionamientos basado factores en relacionados con la seguridad (Smith, 1996).

Asimismo, con el objetivo de evaluar el servicio al usuario, He et al. (2012) definieron el NS en base a cuatro indicadores: la relación entre la demanda en hora punta y la capacidad, la tasa media de ocupación de las plazas de estacionamiento, el coste del estacionamiento, y el tiempo de circulación. Moeinaddini et al. (2013) propusieron evaluar el NS de las áreas de estacionamiento ponderando dos indicadores, el inventario de estacionamiento para medir la accesibilidad y la demanda para medir el uso de los

estacionamientos. Das & Ahmed, (2018) evaluaron el NS de estacionamiento en vía considerando tres características: disponibilidad de estacionamiento, seguridad y diseño.

Un trabajo reciente desarrolla un índice de rendimiento del estacionamiento (*Parking Performance Index*, PPI) que evalúa la instalación de estacionamiento desde la perspectiva de los usuarios considerando cuatro indicadores: la relación demanda-capacidad, el tiempo de búsqueda y la duración del estacionamiento, el tiempo de acceso y las tarifas de estacionamiento (P. Das et al., 2021). Estas definiciones inspiran el enfoque de la función objetivo del modelo de asignación propuesto. Dado que los aspectos de seguridad y diseño exceden el alcance del modelo de planificación propuesto, solo se consideraron las variables relacionadas con la operación y el servicio del estacionamiento.

3.2.1.1 Notación

índices y conjuntos

i	Conjunto de usuarios $\{U_1, \dots, U_I\}$
i'	Conjunto de usuarios i en vehículo de pasajero.
i''	Conjunto de usuarios i en vehículo de carga.
I	Conjunto de plazas de estacionamiento $\{E_1, \dots, E_L\}$
t	Conjuntos de periodos $\{T_1, \dots, T_T\}$

Parámetros

I	número total de usuarios.
L	número total de plazas de estacionamiento
T	número total de periodos
K	número total de usuarios en vehículos de carga
J	número total de usuarios en vehículos de pasajero
θ	efecto diferencial de la circulación de los usuarios.
$MCirc_p$	tiempo máximo de circulación para los usuarios en vehículo de pasajero.
$MCirc_c$	tiempo máximo de circulación para los usuarios en vehículo de carga
$MDist_p$	distancia máxima que los usuarios en vehículo de pasajero están dispuestos a caminar hasta el destino
$MDist_c$	distancia máxima que los usuarios en vehículo de carga están dispuestos a caminar hasta el destino
$Duración_i$	duración de la estancia del usuario i
$Llegada_i$	periodo de llegada del usuario i

Último_i	último periodo en el que el usuario i puede ser atendido ($\text{Last}_i = \text{Llegada}_i + \text{MCirc}_i$).
Dist_{il}	distancia desde el destino del usuario i hasta la plaza de estacionamiento l
Tipo_i	$= \begin{cases} 1, & \text{si el vehiculo del usuario } i \text{ es de pasajero} \\ -1, & \text{si el vehiculo del usuario } i \text{ es de carga} \end{cases}$
Variables	
Inicio_i	periodo de inicio de la atención del usuario i
Fin_i	periodo de finalización de la atención del usuario i
X_{ilt}	$= \begin{cases} 1, & \text{si el usuario } i \text{ está asignado a un estacionamiento } l \text{ durante el periodo } t \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$
A_{il}	$= \begin{cases} 1, & \text{si el usuario } i \text{ está asignado a un estacionamiento } l \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$

3.2.1.2 Formulación del Problema

La función objetivo (Ecuación 7) busca maximizar el NS en la zona asignando la oferta de los estacionamientos disponible a los diferentes usuarios mientras minimiza el efecto de la circulación de los usuarios que buscan estacionar. La función NS está conformada por tres términos que se refieren a maximizar el número de usuarios que son atendidos (*Vehículos Servidos*, VS), maximizar el uso de la infraestructura disponible (*Uso del Estacionamientos*, UE), y minimizar el efecto de la circulación debido a la no atención o no atención inmediata de los usuarios (*Búsqueda de Estacionamiento*, BE).

Maximizar:

$$\text{Nivel de Servicio (NS)} = \left[\begin{array}{c} \text{Vehículos} \\ \text{Servidos} \\ \text{(VS)} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Uso del} \\ \text{Estacionamientos} \\ \text{(UE)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Búsqueda de} \\ \text{Estacionamiento} \\ \text{(BE)} \end{array} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

Debido a que el problema de planificación estratégica involucra dos tipos de usuarios, se presentarán dos formulaciones para el NS. El objetivo de las dos formulaciones es comparar el efecto en la asignación al diferenciar por tipo de usuario. Por tanto, la función objetivo NS en la ecuación 8 considera a todos los vehículos como un todo, sin diferenciar entre los diferentes usuarios. Por el contrario, la función NS en la ecuación 9 desagrega el efecto de tener los dos usuarios en los términos *Vehículos Servidos* y *Búsqueda de Estacionamiento*.

$$\text{NS}_1 = \left[\frac{\sum_i \sum_l A_{il}}{I} \right] + \left[\frac{\sum_i \sum_l \sum_t X_{ilt}}{L * T} \right] - \left[\frac{(\sum_i \text{Inicio}_i - \text{Llegada}_i) + (J - \sum_{i'} \sum_l A_{i'l}) * \text{MCirc}_p + (K - \sum_{i''} \sum_l A_{i''l}) * \text{MCirc}_c}{J * \text{MCirc}_p + K * \text{MCirc}_c} \right] \quad \text{Ec. 8}$$

$$NS_2 = \left[\frac{\sum_i' \sum_l A_{i'l}}{2 * J} + \frac{\sum_i'' \sum_l A_{i''l}}{2 * K} \right] + \left[\frac{\sum_i \sum_l \sum_t X_{ilt}}{L * T} \right] - \frac{[(\sum_i' Inicio_{i'} - Llegada_{i'}) + (J - \sum_i' \sum_l A_{i'l}) * MCirc_p + \theta * (\sum_i'' Inicio_{i''} - Llegada_{i''}) + (K - \sum_i'' \sum_l A_{i''l}) * MCirc_c]}{J * MCirc_p + \theta * K * MCirc_c} \quad \text{Ec. 9}$$

En la función NS, el término *Vehículos Servidos*, se definió como el porcentaje de usuarios que son atendidos en los estacionamientos disponibles. En el caso de NS_2 , este término es el promedio de los porcentajes de atención de cada uno de los usuarios. El término *Uso del Estacionamientos*, se definió como el porcentaje de utilización de las plazas de estacionamiento disponibles y es igual tanto en NS_1 como en NS_2 . Por último, el tercer término *Búsqueda de Estacionamiento*, se definió como el porcentaje de periodos de circulación de vehículos para NS_1 . Para NS_2 , se ha añadido el parámetro θ para considerar el efecto diferencial de tener un camión o un vehículo de pasajero circulando.

Las dos formulaciones están sujetas a las restricciones presentadas a continuación:

<u>Restricción</u>	<u>Descripción</u>	
$\sum_t X_{ilt} \leq 1 \quad \forall i, t$	Asigna a cada usuario un máximo de un estacionamiento en cada período.	Ec. 10
$\sum_i X_{ilt} \leq 1 \quad \forall l, t$	Establece que cada plaza de estacionamiento puede ser utilizada por un máximo de un usuario en cada periodo.	Ec. 11
$\sum_l A_{il} \leq 1 \quad \forall i$	Asigna a cada usuario un máximo de una plaza de estacionamiento en la zona.	Ec. 12
$\sum_{t \geq Llegada_i} X_{ilt} = A_{il} * Duración_i \quad \forall i, l$	Establece que cada usuario asignado complete todos sus periodos de estancia en el mismo estacionamiento.	Ec. 13
$\sum_l \sum_{t < Llegada_i} X_{ilt} \leq 0 \quad \forall i$	Asegura que a los usuarios no se les asigne un estacionamiento antes del periodo de llegada a la zona	Ec. 14
$Inicio_i \leq Ultimo_i \quad \forall i$	Asegura que el inicio del servicio para cada usuario esté entre el periodo de llegada y el último periodo en el que el usuario podría ser atendido	Ec. 15
$Inicio_i \geq Llegada_i \quad \forall i$		
$X_{ilt} * Inicio_i \leq X_{ilt} * t \quad \forall i, l, t$	Sí un usuario es asignado a una plaza durante varios periodos, $Inicio_i$ será el primer periodo de su estancia.	Ec. 16
$\sum_l X_{ilt} * t \leq Fin_i \quad \forall i, t$	Sí un usuario es asignado a una plaza, Fin_i toma el último valor de la estancia.	Ec. 17
$Inicio_i + Duración_i - 1 = Fin_i \quad \forall i$	Asigna el valor de Fin_i . Notar que para los usuarios no asignados el valor de $Inicio_i$ es igual a $Llegada_i$	Ec. 18

$$\sum_t (t - Inicio_i) * X_{ilt} \leq \sum_{t < duración} t \quad \forall i, l \quad \text{Asigna a los usuarios en un estacionamiento en períodos continuos.} \quad \text{Ec. 19}$$

$$A_{i''l} + X_{ilt} * Tipo_i \leq 1 \quad \forall i, l, t, i'' \quad \text{Los estacionamientos se asignan durante toda la fase de modelización a un único tipo de usuario.} \quad \text{Ec. 20}$$

$$Dist_{i'l} * A_{i'l} \leq MDist_p \quad \forall i', l \quad \text{La distancia al estacionamiento asignado es menor que la máxima disposición a caminar de cada usuario.} \quad \text{Ec. 21}$$

$$Dist_{i''l} * A_{i''l} \leq MDist_c \quad \forall i'', l$$

$$X_{ilt} \in \{0,1\} \quad \forall i, l, t \quad \text{Restricciones de integridad y naturaleza de las variables.} \quad \text{Ec. 22}$$

$$A_{il} \in \{0,1\} \quad \forall i, l$$

$$Inicio_i \geq 0 \quad \forall i$$

$$Fin_i \geq 0 \quad \forall i$$

3.2.2 Maximización del bienestar social

La economía del bienestar es una rama de la economía que surge con la aplicación de la teoría de la utilidad y que estudia el efecto que tiene la asignación de recursos en el bienestar económico. En microeconomía, la utilidad es el valor percibido asociado a un bien o servicio. En general, la función de bienestar social permite sumar las utilidades individuales para construir una “utilidad social” (Varian, 1992). Los principios de la economía de bienestar se han aplicado en varios contextos. Por ejemplo, en modelos analíticos de operaciones en post desastre en el ámbito de la logística humanitaria (Holguín-Veras et al., 2013; Macea et al., 2018); modelos de tarificación vial (Fuentes et al., 2022; Holguín-Veras & Cetin, 2009); en problemas de optimización en el mercado de energía (Sun et al., 2016); y en el control total de emisiones de aguas residuales (Guo et al., 2019). En temas relacionados al estacionamiento se resalta el trabajo Kobus et al. (2013) quienes utilizaron el concepto de bienestar para la evaluación de políticas de tarifas, y Amer & Chow (2017) quienes propusieron un modelo que maximiza el bienestar social en las condiciones de equilibrio.

Usualmente, la función del bienestar social (BS) tiene dos componentes: los costos y beneficios percibidos por quienes participan en la transacción económica y los costos de las externalidades asociados al impacto producto de esta transacción. De tal manera, que en el proceso de asignación de recursos siguiendo los principios del bienestar social se involucra a los productores, los consumidores y la sociedad en general.

La integración del concepto de bienestar social en el modelo de asignación de espacios de estacionamiento implica entre otras cosas conocer la utilidad percibida por los individuos en el sistema de estacionamientos. Una forma de hacerlo es a través de los modelos econométricos de elección discreta basados en la utilidad aleatoria. Estos modelos, permiten modelar las elecciones de los usuarios entre un número finito de alternativas y de acuerdo con la teoría de la maximización de la utilidad, los individuos toman decisiones buscando recibir el máximo beneficio (Ortúzar & Willumsen, 2011; Train, 2009; Williams, 1977).

El resultado de incluir estos modelos de elección junto a las variables de decisión dentro de un modelo de optimización representa una formulación matemática compleja. Algunos trabajos recientes han presentado procesos de linealización que permiten utilizar la demanda en términos de la probabilidad de elección dentro de problemas de localización (Aros-Vera et al., 2013; Freire et al., 2016). Recientemente, Pacheco Paneque et al. (2021) presentaron una metodología que permite utilizar la demanda en términos de la función de utilidad dentro del proceso de decisión relacionada con la oferta. Este enfoque conserva las ventajas que tienen los modelos de elección discreta para capturar las preferencias de los individuos a un nivel desagregado. En consecuencia, el enfoque de modelación que maximiza el bienestar social presentados en este capítulo, integra los modelos de elección y el modelo de asignación de espacios siguiendo los fundamentos de la economía del bienestar y los fundamentos de la metodología presentado por Pacheco Paneque et al. (2021).

3.2.2.1 Notación

índices y conjuntos

i	Conjunto de usuarios $\{U_1, \dots, U_I\}$
i'	Conjunto de usuarios i en vehículo de pasajero.
i''	Conjunto de usuarios i en vehículo de carga.
j	Conjunto de plazas de estacionamiento $\{E_1, \dots, E_J\}$
l	Conjunto de alternativas $\{E_1, \dots, E_J, E_{J+1}=\text{NoEstacionar}, E_{J+2}=\text{Ilegal}\}$
t	Conjuntos de periodos $\{T_1, \dots, T_T\}$

Parámetros

$MCirc_i$	tiempo máximo de circulación para el usuario i .
$Duración_i$	duración de la estancia del usuario i
$Llegada_i$	periodo de llegada del usuario i
$Último_i$	último periodo en el que el usuario i puede ser atendido ($Last_i = Llegada_i + MCirc_i$).
$Dist_{il}$	distancia desde el destino del usuario i hasta la plaza de estacionamiento l
$Tipo_i$	$= \begin{cases} 1, & \text{si el vehiculo del usuario } i \text{ es de pasajero} \\ -1, & \text{si el vehiculo del usuario } i \text{ es de carga} \end{cases}$
$Disponibilidad_{li}$	$= \begin{cases} 1, & \text{si la alternativa } l \text{ está disponible para usuario } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
l_{li}	Límite inferior de U_{li}
m_{li}	Límite superior de U_{li}
l_i	Límite inferior más pequeño entre las alternativas de i

m_i	Límite superior más grande entre las alternativas de i
M_{li}	$= m_{li} - l_i$
M_i	$= m_i - l_i$
β_{Costo_i}	Parámetro del costo del modelo de elección discreta.
$Tarifa_i$	Tarifa del usuario i por estacionar un periodo
$CCong$	Costo de congestión por periodo por estacionar ilegalmente
$CCirc$	Costo por un periodo de circulación del usuario i .
Afect	Número de usuarios afectados por un camión mal estacionado

Variables

$Inicio_i$	periodo de inicio de la atención del usuario i
Fin_i	periodo de finalización de la atención del usuario i
U_{li}	utilidad asociada a la alternativa l del usuario i
U_i	máximo valor de Z_{li} para el usuario i .
W_{li}	$= \begin{cases} 1, & \text{si el usuario } i \text{ elige la alternativa } l \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$
Z_{li}	$= \begin{cases} U_{ji}, & \text{if } Y_{ijt} = 1 \\ U_{li}, & \text{if } Y_{li} = 1 \forall l = \{E_{j+1}, E_{j+2}\} \\ l_i, & \text{en otro caso} \end{cases}$
Y_{ijt}	$= \begin{cases} 1, & \text{si el usuario } i \text{ está asignado al estacionamiento } j \text{ durante el periodo } t \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$

3.2.2.2 Formulación del Problema

La función objetivo (ecuación 23) busca maximizar el BS asignando los estacionamientos disponibles entre ambos usuarios. El BS está compuesto por tres términos: el excedente del productor (EP), el excedente del consumidor (EC) y las externalidades(E).

Maximizar:

$$Bienestar\ Social(BS) = \left[\begin{array}{c} \text{Excedente del} \\ \text{Productor} \\ (EP) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Excedente del} \\ \text{Consumidor} \\ (EC) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Externalidades} \\ (E) \end{array} \right] \quad \text{Ec. 23}$$

El término *Excedente del Productor*, está determinado por los ingresos percibidos por las tarifas que pagan los usuarios por el uso de los estacionamientos. En el planteamiento, no se incluyen los costos fijos debido al supuesto que dice que ya los espacios están preestablecidos para ser utilizados como estacionamiento. Es decir, en el modelo los costos fijos se convierten en una constante.

El excedente del consumidor (EC) se define como la utilidad en términos monetarios que un individuo percibe en una situación de elección. Bajo el supuesto de la maximización de la utilidad de los modelos logit, el EC de un individuo se define como: $EC_i = (1/\alpha_i) \max(U_{il} \forall l)$ donde α_i es la utilidad marginal del ingreso ($\alpha_i = \frac{dU_i}{dY_i}$) y Y_i son los ingresos. Por definición, el negativo de la variable del costo dentro de la utilidad representativa es igual a α_i (Train, 2009; Williams, 1977). Por tanto, el término *Excedente del Consumidor* dentro de la función objetivo se define como la suma de la máxima utilidad percibida por los usuarios dentro de la asignación, dividido por el negativo del parámetro asociado al costo ($\frac{1}{-\beta Cost_i}$).

Finalmente, el término *Externalidad* se define por dos componentes: el costo de congestión por la circulación de los vehículos en búsqueda de estacionamiento y el costo de congestión causado por los vehículos que deciden estacionar ilegalmente en doble parqueo.

$$BS = \left[\sum_i \sum_l \sum_t Tarifa_{a_i} * Y_{ijt} \right] + \left[\frac{1}{-\beta Cost_i} * \sum_i U_i \right] -$$

$$\left[CCirc_i * \left((\sum_i Start_i - Arrival_i) + \sum_i W_{il=E_{j+1}} * MCirc_i \right) + CCong * Afect * \sum_i W_{il=E_{j+2}} * Duracion_i \right]$$

Ec. 24

El modelo de planificación estratégica que maximiza el BS, presentado en la ecuación 24, está sujeto a las siguientes restricciones:

Restricción

$$l_i \leq Z_{li} \forall i, l$$

$$Z_{ji} \leq l_i + M_{ji} * \frac{\sum_l Y_{ijt}}{Duracion_i} \forall i, j$$

$$Z_{li} \leq l_i + M_{li} * Y_{li} \forall i, l = \{E_{j+1}, E_{j+2}\}$$

$$U_{ji} - M_{ji} \left(1 - \left(\frac{\sum_l Y_{ijt}}{Duracion_i} \right) \right) \leq Z_{ji} \forall i, j$$

$$U_{li} - M_{li} (1 - Y_{li}) \leq Z_{li} \forall i, l = \{E_{j+1}, E_{j+2}\}$$

$$Z_{li} \leq U_{li} \forall i, l$$

$$U_{li} = ASC_{li} + \sum_k \beta_{lik} X_{lik} + \varepsilon_{li} \forall i, l$$

$$Y_{ijt} \leq Y_{ij} \forall i, j, t$$

$$\sum_l W_{il} = 1 \forall i$$

$$W_{il} \leq Y_{il} \forall i, l$$

Descripción

Linealización de la variable Z_{ji} que asigna el valor de U_{li} cuando las alternativas E_{j+1} o E_{j+2} están disponible, U_{ji} si se asigna E_j y l_i en otro caso, evitando que una alternativa no disponible tenga asociado una utilidad grande.

Ec. 25

Estimación de la utilidad percibida por cada usuario de las alternativas disponibles.

Ec. 26

Los usuarios no pueden ser asignados a un estacionamiento que no esté disponible.

Ec. 27

Cada usuario escoge solo una alternativa.

Ec. 28

Los usuarios no pueden elegir una alternativa que no esté disponible.

Ec. 29

$$Z_{li} \leq U_i \forall i, l$$

$$U_i \leq Z_{li} + M_i(1 - W_{il}) \forall i, l$$

$$\sum_j Y_{ijt} \leq 1 \forall i, t$$

$$\sum_i Y_{ijt} \leq 1 \forall j, t$$

$$\sum_{t \geq Llegada} Y_{ijt} = W_{il} * Duracion_i \forall i, j$$

$$\sum_j \sum_{t < Llegada} Y_{ijt} \leq 0 \forall i$$

$$Inicio_i \leq Last_i \forall i$$

$$Inicio_i \geq Llegada_i \forall i$$

$$Y_{ijt} * Inicio_i \leq Y_{ijt} * t \forall i, j, t$$

$$\sum_j Y_{ijt} * t \leq Fin_i \forall i, t$$

$$Inicio_i + Duracion_i - 1 = Fin_i \forall i$$

$$\sum_t (t - Inicio_i) * Y_{ijt} \leq \sum_{t < duracion} t \forall i, j$$

$$W_{li''} + Y_{ijt} * Tipo_i \leq 1 \forall i, j, t, i''$$

$$Y_{ijt} \in \{0,1\} \forall i, j, t$$

$$W_{li} \in \{0,1\} \forall i, l$$

$$Inicio_i \geq 0 \forall i$$

$$Fin_i \geq 0 \forall i$$

$$Z_{li}, U_{li}, U_i \in \mathbb{R} \forall i, l$$

Linealización de U_i que le asigna el máximo valor de Z_{li} que corresponde a la alternativa elegida. **Ec. 30**

Cada usuario se le asigna un máximo de un estacionamiento en cada período. **Ec. 31**

Cada plaza de estacionamiento puede ser utilizada por un máximo de un usuario en cada periodo. **Ec. 32**

Cada usuario asignado completa todos sus periodos de estancia en el mismo estacionamiento. **Ec. 33**

Asegura que a los usuarios no se les asigne un estacionamiento antes del periodo de llegada a la zona. **Ec. 34**

El inicio del servicio para cada usuario está entre el periodo de llegada y el último periodo en el que el usuario podría ser atendido **Ec. 35**

Sí un usuario es asignado a una plaza durante varios periodos, $Inicio_i$ será el primer periodo de su estancia. **Ec. 36**

sí un usuario es asignado a una plaza, Fin_i toma el último valor de la estancia **Ec. 37**

Asigna el valor de Fin_i . Notar que para los usuarios no asignados el valor de $Inicio_i$ es igual a $Llegada_i$ **Ec. 38**

Los usuarios son asignados a un estacionamiento en períodos continuos. **Ec. 39**

Los estacionamientos se asignan durante toda la fase de modelización a un único tipo de usuario **Ec. 40**

Naturaleza de las variables **Ec. 41**

4 Modelo de Elección

4.1 Caso de estudio

El caso de estudio se encuentra inspirado en la ciudad de Cartagena, Colombia. Cartagena es la capital del departamento de Bolívar y está ubicada en la costa norte del país. A nivel nacional, es la quinta ciudad más poblada, con un área de 609 Km² y densidad poblacional aproximadamente de 1812 hab/km². Sus principales actividades económicas son el turismo, la producción petroquímica y el comercio. Este último especialmente caracterizado por la presencia del puerto marítimo que actualmente es el que más carga maneja en el país y el cuarto en América Latina (CEPAL, 2022).

Se recolectó información en dos barrios de alta atracción de viaje, ubicados al norte de la ciudad: Bocagrande y Manga (Figura 6). Cada barrio tiene sus propias características en términos de infraestructura, uso del suelo y restricciones de movilidad. A continuación, se describen las principales características de las dos zonas seleccionadas.

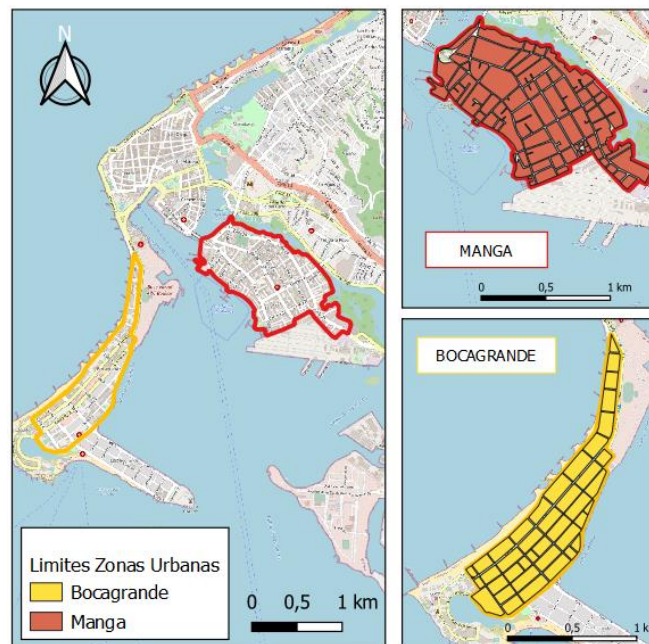


Figura 6. Ubicación de las zonas de estudio.

Bocagrande es una península, lo que significa que tiene un solo acceso al resto de la ciudad. El área es de aproximadamente 1,23 Km², con una población de 14.800 habitantes, 2073 hogares, y un alto nivel de ingreso promedio (DANE, 2018). El uso del suelo es predominantemente turístico y comercial, con gran cantidad de hoteles, restaurantes, tiendas y zonas de playa. Sin embargo, el uso del suelo residencial, e institucional está presente en menor medida. Bocagrande tiene tres calles principales que atraviesan toda la zona. Su vía principal tiene cinco carriles con flujos vehiculares en una dirección, tres de ellos utilizados para circular y dos carriles utilizados para el estacionamiento en la calle, la parada del autobús o la maniobra. Además, las calles tienen aceras anchas a ambos lados. Las demás calles tienen dos carriles

utilizados para circular. En la zona es habitual encontrar estacionamientos privados en el exterior o en el interior de los edificios, por lo que el flujo vehicular se ve frecuentemente interrumpido debido a las maniobras provocadas por la presencia de estos estacionamientos. La Figura 7 muestra algunas imágenes de la zona. En la actualidad, el transporte de mercancías está restringido a los vehículos de más de 7 toneladas de capacidad, y para poder transitar se debe solicitar permisos especiales a las autoridades competentes.



Figura 7. Imágenes de la zona de Bocagrande

Manga es una isla conectada a la ciudad por cuatro puentes. El área es de aproximadamente 1,82 Km², con una población de 16.474 habitantes, 3401 hogares, y un nivel de ingresos medio-alto (DANE, 2018). El uso del suelo es principalmente residencial y comercial, en particular, por la presencia de tiendas y restaurantes. Sin embargo, Manga cuenta con entidades educativas, zonas turísticas como la Bahía, el Puerto Marítimo Turístico y el Club de Pesca. Además, en los últimos años ha crecido el número de entidades gubernamentales y de salud. Por tanto, hoy en día es importante el uso del suelo institucional y turístico en esta zona. Otro aspecto importante por destacar es la influencia de la ubicación del puerto de contenedores al flujo vehicular del barrio Manga, ya que este se encuentra al lado. En cuanto a la infraestructura vial, Manga, al igual que Bocagrande, tiene tres calles principales, pero sus vías sólo tienen dos carriles de circulación vehicular, las aceras son más angostas y hay menos estacionamientos privados dentro y fuera de los edificios. Debido a la escasez de plazas de estacionamiento, en Manga son más frecuentes los vehículos estacionados ilegalmente en las calles. La Figura 8 muestra algunas imágenes de

la zona. Al igual que en Bocagrande, el tránsito de vehículos de más de 7 toneladas está prohibido en la zona.



Figura 8. Imágenes de la zona de Manga

4.2 Análisis descriptivo de los datos

Las encuestas se realizaron presencialmente en el mes de noviembre de 2020. La muestra está compuesta por 504 conductores que fueron seleccionados aleatoriamente dentro de las dos zonas de estudio. De la muestra 268 corresponden a conductores de vehículos de pasajeros y 236 a conductores de vehículos de mercancías. A continuación, se presenta el análisis descriptivo de la muestra de conductores de vehículos de carga y pasajeros.

4.2.1 Conductores de vehículos de carga

De la muestra de conductores de vehículos de carga, 131 se realizaron en Bocagrande y 105 en Manga. En la Tabla 7, se muestran las características operativas y socioeconómicas de los conductores encuestados recolectados en la cuarta sección de la encuesta. En general, se observa que más del 60% de los conductores tienen menos de 40 años. El máximo nivel educativo del 88% de los encuestados es estudios primarios o secundarios. El 84% declararon tener un nivel de ingreso bajo. El 52% tiene menos de 10 años de experiencia como transportador. Además, se encontró que los contratos laborales de los conductores podían ser de dos tipos: por salario fijo (67%) o pago por entrega/ruta realizada (33%). También se encontró que las capacidades de los vehículos oscilaban entre 0,5 y 17 toneladas y que sólo el 16% de los

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

conductores encuestados eran propietarios de los vehículos. En los demás casos, los vehículos eran propiedad del dueño de la mercancía o de terceros.

También, se preguntó a los conductores cómo planificaban sus operaciones. El 64% dijo que tenía una ruta estipulada que tenía que completarse independientemente de la hora de finalización. Según los datos, el 93% de los conductores visita la zona al menos una vez a la semana. Por último, en caso de ser multados por estacionar en zonas prohibidas mientras hacen las entregas, al 89% les corresponde pagar la multa.

Tabla 7. Características operativas y socioeconómicas de la muestra- Vehículos de carga.

Atributo	Total (%)	Atributo	Total (%)	Atributo	Total (%)
Edad		Experiencia del conductor		Propietario del vehículo	
menos de 30 años	22	Menos de 5 años	21	Otros	84
30 y 40 años	38	5 y 10 años	31	Conductor	16
41 y 50 años	21	11 y 20 años	29		
más de 50 años	19	más de 20 años	19	Tipo de operación	
				Tiempo de entrega fijo	14
Nivel educativo		Tipo de contrato		Ruta hasta terminar entregas	64
Primaria	6	Salario fijo	67	Ruta hasta terminar jornada laboral	22
Secundaria	72	Pago por entrega	33		
Técnico	17			Frecuencia (días por semana)	
Pregrado	5	Capacidad del vehículo		Menos de 1 día	7
		Menos de 1.1 Ton	7	1 y 2 días	46
Nivel de ingresos		1.1 y 2.0 Ton	24	3 y 4 días	21
Bajo	84	2.1 y 3.0 Ton	27	Más 5 días	26
Medio	16	3.1 y 4.0 Ton	20		
		Más de 4.0 Ton	22	Pagador de la multa	
				Empleador	11
				Conductor	89

Fuente: Elaboración propia.

En la primera sección de la encuesta se recolectó información de la entrega más grande realizada en su visita más reciente en la zona de estudio (Tabla 8). Lo anterior sirvió para caracterizar las operaciones en la zona y como dato de entrada del ejercicio de elección en la segunda sección de la encuesta. El número de entregas realizadas por los conductores en su visita más reciente a Bocagrande oscila entre 1 y 150. Sin embargo, al menos el 50% de los conductores declaró realizar un número de entregas inferior o igual a 4. Incluso, al menos el 75% declaró realizar un número de entregas inferior o igual a 10.

El tipo de producto transportado por los conductores de la muestra fue variado. Se establecieron dos clasificaciones para efectos de análisis. Una primera clasificación fue si los productos eran perecederos (52%) o no perecederos (48%). Una segunda clasificación se basó en si los productos se transportaban en vehículos refrigerados (35%) o no refrigerados (65%). El tipo de estacionamiento utilizado para realizar la entrega variaba entre estacionamiento legal (73%), en la acera (3%) y en la vía (24%). El 95% de los estacionamientos estaban frente al destino, el 3% al otro lado de la calle, el 1% en el mismo bloque, y el 1% restante a más de un bloque. Estas estadísticas demuestran la inclinación a elegir la alternativa más

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

cercana al lugar de entrega. Además, se encontró que el 78% de los conductores reportaron tiempos de búsqueda menores a 5 minutos. Por último, en Bocagrande, el tiempo de permanencia en el estacionamiento fue superior a 46 minutos en el 47% de los casos, y el 16% correspondió a tiempos superiores a una hora. Sólo el 2% reportó tiempos menores a 5 minutos.

En el caso de Manga, al menos la mitad de los conductores reportó que el número de entregas realizadas en la zona fue menor o igual a 2. En comparación con Bocagrande, los conductores de Manga visitan menos clientes en el mismo viaje. En cuanto al tipo de producto, el 42% era perecedero y el 23% se transportaba en vehículos refrigerados. Los conductores optaron por estacionar en la vía en el 53% de los casos y en la acera en el 8%, ambas cifras superiores a las de Bocagrande (24% y 3% respectivamente). Estas estadísticas reflejan la escasez de espacios legales para la descarga y entrega de mercancías, que es más evidente en Manga. Además, un gran porcentaje de conductores en Manga (82%) declaró haber estacionado en frente del lugar de entrega. Sólo el 7% declaró haber estacionado en un bloque diferente. En ambas zonas hay una tendencia a estacionar lo más cerca posible del lugar de entrega, independientemente de la opción disponible. Por otra parte, los conductores indicaron tiempos de búsqueda inferiores a 5 minutos en el 77% de los casos; y tiempos superiores a 30 minutos en el 4% de los casos. Por último, se indicaron tiempos de duración más cortos en Manga que en Bocagrande; el 7% indicó un tiempo de duración inferior a 5 minutos, el 51% entre 6 y 25 minutos, el 18% entre 46 y 60 minutos y el 6% superior a 60 minutos. Los largos tiempos de espera usualmente se deben a las esperas para ser atendidos en los comercios locales.

Tabla 8. Resumen información de primera sección de encuesta - Conductores de vehículo de carga.

	Bocagrande	Manga	Total		Bocagrande	Manga	Total
Número de entregas				Distancia al destino (%)			
Rango	1 a 150	1 a 90	1 a 150	Al frente	95	82	89
Media	10.0	7.2	8.7	Cruzando la calle	3	2	3
1er cuartil	2	1	1	En el mismo bloque	1	9	5
Mediana	4	2	3	A un bloque o más	1	7	3
3er Cuartil	10	6	8	Tiempo de búsqueda (%)			
Tipo de producto (%)				Menos de 5 minutos	78	77	78
Perecederos	52	42	47	6 y 18 minutos	5	12	9
No perecederos	48	58	53	19 y 30 minutos	8	7	7
				Más de 30 minutos	9	4	6
Refrigerado	35	23	29	Duración (%)			
No Refrigerado	65	77	71	Menos de 5 minutos	2	7	4
Lugar de estacionamiento (%)				6 y 25 minutos	34	51	42
En un estacionamiento	73	39	58	26 y 45 minutos	17	18	18
En la acera	3	8	5	46 y 60 minutos	31	18	25
En la vía	24	53	37	Más de 60 minutos	16	6	11

Fuente: Elaboración propia.

En general, las elecciones de los conductores en el experimento de la segunda parte de la encuesta fueron: el 54% para la primera alternativa de estacionamiento en vía, el 12% para la segunda alternativa de estacionamiento en vía, el 22% para estacionamiento ilegal, y el 12% para la alternativa seguir buscando (Figura 9). Si se comparan las elecciones por zonas, se observa que los porcentajes de elección de las alternativas estacionamiento en vía 2 e ilegal son similares. Sin embargo, los conductores de Manga eligieron la alternativa estacionamiento en vía 1 vez más que los conductores de Bocagrande. Asimismo, los conductores de Bocagrande eligieron la alternativa de Seguir Buscando más veces que los conductores de Manga. Es importante destacar que más del 60% de las elecciones fueron para alternativas de estacionamiento en vía 1 o estacionamiento en vía 2 que tienen una tarifa asociada. Actualmente, no existen alternativas de estacionamiento en las zonas de estudio que cobren tarifa a los vehículos de carga.

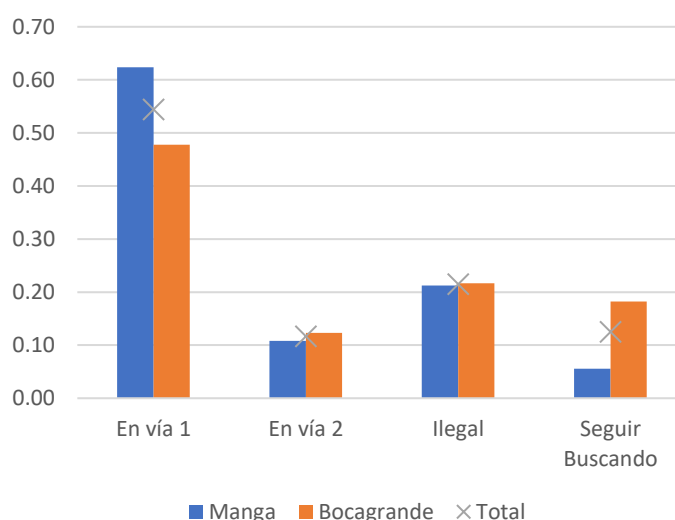


Figura 9. Elecciones del experimento PD por zona de estudio- Conductores de vehículo de carga.

En la tercera parte de la encuesta, los conductores evaluaron algunos indicadores actitudinales (Figura 10). El 88% de los encuestados afirma que evita estacionar en zonas prohibidas. El 94% dice que busca zonas seguras para estacionar. El 75% dice que evita estacionar frente del lugar de entrega, ya que puede provocar algo de congestión. El 66% no se permite descargar en la vía pública, aunque tenga que cumplir con la entrega. Y el 65% dice que evita utilizar la acera, incluso si no hay espacios disponibles. En general, el comportamiento de más del 50% de los conductores es el esperado de acuerdo con las normas de seguridad vial.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

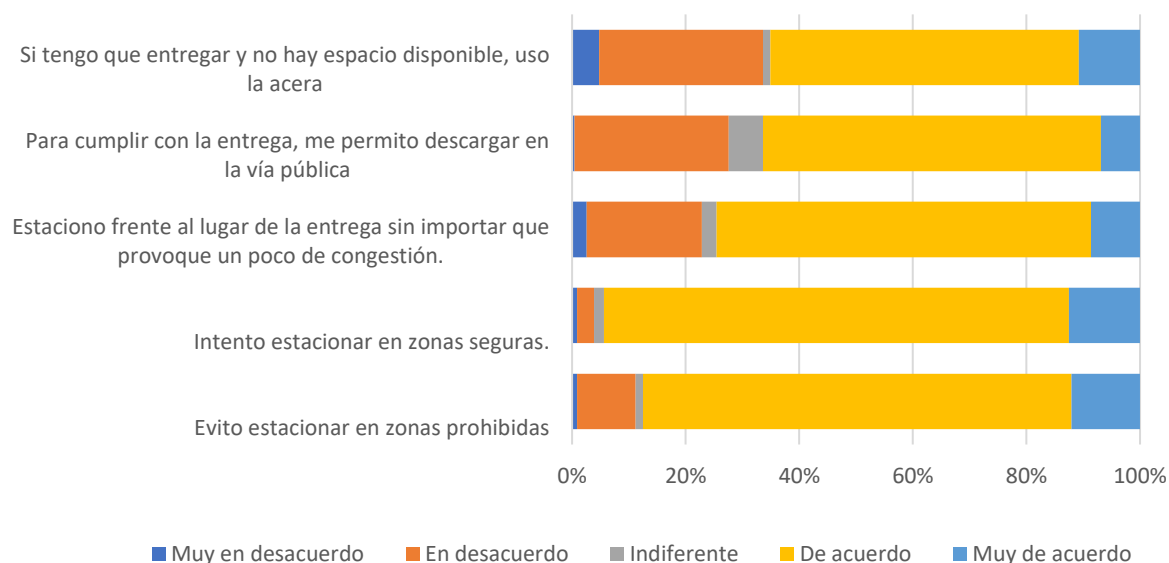


Figura 10. Respuestas por indicadores- Conductores de vehículo de carga.

4.2.2 Conductores de vehículos de pasajeros

De las encuestas aplicadas a los conductores de vehículos de pasajeros, 132 fueron en Manga y 136 en Bocagrande. La Tabla 9 reúne la información socioeconómica de la cuarta sección de la encuesta para estos usuarios. El 53% de la muestra tiene menos de 41 años, y el 10% tiene más de 60 años. La distribución según el nivel de ingresos es la siguiente: nivel de ingresos bajos 34%; nivel de ingresos medios 52%; y nivel de ingresos altos 14%. Además, el 82% de los encuestados eran hombres, el 14% de los conductores tiene menos de 5 años de experiencia conduciendo, y el 33% tiene más de 15 años conduciendo. Según los datos, el 4% tiene un nivel de educación elemental, el 28% tiene un nivel de educación hasta secundaria y el 68% realizó algún tipo de estudio técnico o universitario. También se tomaron datos sobre el tipo de vehículo utilizado, el 54% eran automóviles, el 36% eran camionetas o furgonetas y el 10% tenían otro tipo de vehículo. Cuando se preguntó la frecuencia con la que los conductores visitaban la zona de estudio, se encontró que el 3% la visita menos de una vez a la semana, el 46% la visita 1 o 2 días a la semana, el 23% la visita 3 o 4 veces a la semana y el 28% visita la zona más de 5 días a la semana. Por último, se preguntó a los conductores si suelen estacionar donde hay cuidadores informales a los que normalmente se les da una propina voluntaria, el 68% dijo que sí frente al 32% que dijo que no.

Tabla 9. Características socioeconómicas de la muestra- Vehículo de pasajeros.

Atributo	Total (%)	Atributo	Total (%)
Edad		Nivel educativo	
menos de 30 años	20	Primaria	4
30 y 40 años	33	Secundaria	28
41 y 50 años	15	Técnico	34

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Atributo	Total (%)	Atributo	Total (%)
51 y 60 años	22	Pregrado	32
más de 60 años	10	Postgrado	2
Nivel de ingresos		Tipo de vehículo	
Bajo	34	Automóvil	54
Medio	52	Camioneta	36
Alto	14	Otros	10
Experiencia del conductor		Frecuencia (días por semana)	
Menos de 5 años	14	Menos de 1 día	3
5 y 15 años	53	1 y 2 días	43
16 y 30 años	26	3 y 4 días	26
más de 30 años	7	Más 5 días	28
Género		¿Estacionamiento informal?	
Hombre	82	Sí	68
Mujer	18	No	32

Fuente: Elaboración propia.

En la primera sección de la encuesta se pedía a los conductores información sobre su visita más reciente a la zona de estudio (visita anterior al día en que se realizó la encuesta). La Tabla 10 resume esta información desglosada por cada una de las zonas de estudio. La primera pregunta se refería al propósito del viaje. En general, los principales propósitos del viaje fueron el trabajo (39%) y los asuntos personales (38%). Le siguen el ocio (21%) y la educación (2%). La ocupación del vehículo reportada por los conductores muestra un comportamiento diferenciado en las dos zonas de estudio. En Bocagrande, en el 25% de los viajes sólo se movilizó al conductor, en el 52% de los viajes reportados el vehículo fue ocupado por 2 o 3 personas y en el 23% restante, en el vehículo se movilizaron más de tres personas. Por otro lado, en Manga, el 42% de los viajes fueron ocupados sólo por el conductor, el 45% de las veces la ocupación fue de 2 o 3 personas y el 13% restante la ocupación fue mayor a 3 personas. Estos porcentajes muestran una mayor tendencia en Manga a hacer uso personal del vehículo privado.

Los datos recogidos proporcionan información sobre el uso de los estacionamientos. Por ejemplo, en la zona de Bocagrande, el 74% de los conductores estacionó en lugares legales tales como: en estacionamientos gratuitos fuera de vía (60%), estacionamientos pagos fuera de vía (7%) o estacionamientos en la vía (7%). En contraste, el 26% estacionó en zonas prohibidas: en las aceras (18%) y en la calle (8%). Además, el 51% de los conductores estacionaron frente a su destino y solo 20% estacionó a más de un bloque de distancia. Los tiempos de búsqueda reportados en el 65% de los casos fueron inferiores a 5 minutos y los tiempos de permanencia en el estacionamiento en el 75% de los casos fueron menores a una hora.

En Manga, el 62% de los conductores estacionaron en lugares legales y el 38% que estacionó en zonas prohibidas. Comparando las dos áreas de estudio, Manga reportó un 12% más de estacionamiento en zonas prohibidas. En cuanto a la distancia al destino, el 47% de los conductores estacionó frente a su

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

destino, y el 19% estacionó a más de un bloque. Porcentajes similares a los reportados en Bocagrande. Por otro lado, los tiempos de búsqueda reportados por los conductores en Manga son menores que los reportados en Bocagrande. El 86% de los conductores reportaron tiempos de búsqueda menores a 5 minutos y el 1% mayores a 30 minutos. Por último, el tiempo de permanencia en el estacionamiento es similar en ambas zonas, el 75% de los conductores permaneció estacionado menos de una hora.

Tabla 10. Resumen información de la primera sección de la encuesta- Vehículo de pasajeros.

	Bocagrande	Manga	Total		Bocagrande	Manga	Total
Propósito del viaje (%)				Distancia al destino (%)			
Trabajo	43	36	39	Al frente	51	47	49
Educación	2	1	2	Cruzando la calle	17	23	20
Asuntos personales	38	39	38	En el mismo bloque	12	11	11
Recreo	17	23	21	A un bloque o más	20	19	20
Otros	0	1	0	Tiempo de búsqueda (%)			
Ocupación del vehículo (%)				Menos de 5 minutos	65	86	75
1 persona	25	42	33	6 y 18 minutos	18	7	13
2 o 3 personas	52	45	49	19 y 30 minutos	9	6	7
Más de 3 personas	23	13	18	Más de 30 minutos	8	1	5
Lugar de estacionamiento (%)				Duración (%)			
Gratis fuera de la vía	60	43	52	Menos 10 minutos	15	19	17
Pago fuera de la vía	7	3	5	11 y 30 minutos	34	36	35
En la Acera	18	21	19	31 y 60 minutos	26	20	23
Estacionamiento en la vía	7	16	11	61 y 180 minutos	19	20	19
En la vía	8	17	13	Más 180 minutos	6	5	6

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 11 muestra las elecciones de los encuestados en los escenarios presentados en la segunda sección de la encuesta. En general, el 30% de las elecciones fueron para la alternativa de estacionamiento en vía, el 35% para el estacionamiento informal, el 31% para la alternativa fuera de vía y el 4% para seguir buscando. El porcentaje de elecciones para la alternativa en vía es similar en ambas zonas. Sin embargo, los conductores de Bocagrande prefieren estacionar más en lugares informales que los conductores de Manga. Asimismo, los conductores de Manga eligieron la alternativa de estacionamiento fuera de vía más veces que los conductores de Bocagrande. En ambas zonas, el porcentaje de elección de la alternativa de seguir buscando es bajo.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

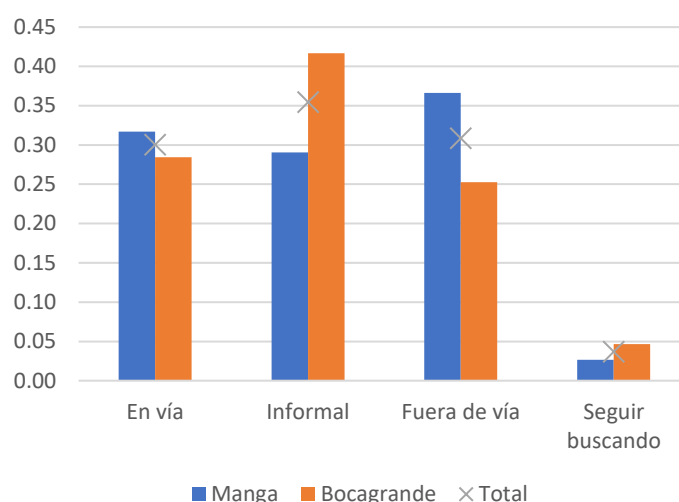


Figura 11. Elecciones del experimento PD por zona de estudio - Conductores de vehículo de pasajero.

La Figura 12 muestra la evaluación de los indicadores actitudinales presentados en la tercera sección de la encuesta. El 95% de los encuestados afirma que evita estacionar en zonas prohibidas. El 84% dice que prefiere estacionar en zonas con vigilancia, aunque sea más costoso. El 21% se permite estacionar en la vía pública si tiene que llegar a tiempo. El 42% utiliza la acera para estacionar si tiene que hacerlo rápidamente y no hay espacio disponible. Y el 85% dice que no le importa que el estacionamiento no esté en el mismo bloque que su destino.

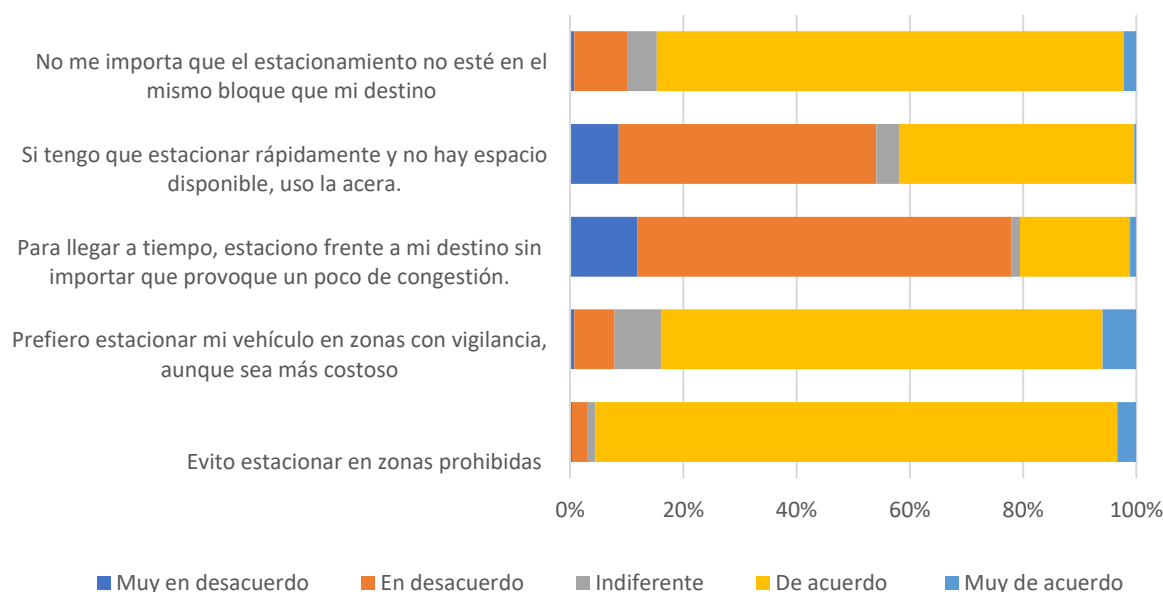


Figura 12. Respuestas por indicadores - Conductores de vehículo de pasajero.

4.3 Resultados y discusión

El enfoque de modelación propuesto en el capítulo 0, fue aplicado a los datos de conductores de vehículos de carga y pasajeros recolectados en la ciudad de Cartagena. El propósito es calibrar un modelo que nos permita identificar los factores que influyen las elecciones de los diferentes usuarios al momento de estacionar, observar la influencia de la conducta al estacionar en las elecciones, y establecer las diferencias en la valoración de los factores entre los tipos de usuarios. Las estimaciones de los modelos de elección tipo Logit Multinomial (MNL) y HDC se obtuvieron a través del paquete APOLLO (Hess & Palma, 2019) del software R. Los resultados de la modelación se presentan en este capítulo. La Tabla 11 resume el nombre, la notación y la descripción de las variables y parámetros en los modelos.

Tabla 11 Variables y parámetros en los modelos de elección

Variable	Notación	Descripción	
		Pasajero	Carga
Constante Especifica de la alternativa	ASC_j	ASC_{EnVia} : En vía $ASC_{informal}$: Informal $ASC_{FueraVia}$: Fuera de vía ASC_{Seguir} : Seguir buscando. Fijada en Cero	ASC_{EnVia1} : En vía1 ASC_{EnVia2} : En vía2 ASC_{ilegal} : Ilegal ASC_{Seguir} : Seguir buscando. Fijada en Cero
Edad	EdadMenos30	1: menos de 30 años 0: en otro caso	NA
Género	Mujer	1: Mujer 0: en otro caso	NA
Nivel de ingresos	IngresoBajo	1: ingresos bajos 0: otro caso	1: ingresos bajos 0: otro caso
Experiencia del conductor	ExpMenos11	NA	1: Menos de 11 años 0: en otro caso
	ExpMenos16	1: Menos de 16 años 0: en otro caso	NA
	ExpMay30	1: Más de 30 años 0: en otro caso	NA
Zona	Bocagrande	1: Bocagrande 0: en otro caso	1: Bocagrande 0: en otro caso
Capacidad del vehículo	Menos1Ton	NA	1: Menos de 1 Ton 0: en otro caso
Pagador de la multa	EmpleadorPaga	NA	1: Empleador 0: en otro caso
Distancia al destino	Distancia	Niveles en la Tabla 5	Niveles en la Tabla 3
Tarifa	Tarifa	Niveles en la Tabla 5	Niveles en la Tabla 3
Duración	Duración	Minutos estacionados	Minutos estacionados
Tiempo de búsqueda	Búsqueda	Niveles en la Tabla 5	Niveles en la Tabla 3
Clima	Lluvia	1: Lluvia 0: en otro caso	NA
Hora del día	Noche	1: Noche 0: en otro caso	NA

Variable	Notación	Descripción	
		Pasajero	Carga
Hora de llegada	Retrasado	1: 15 minutos de retraso 0: en otro caso	NA
Probabilidad de multa	ProbMulta	NA	Niveles en la Tabla 3
Coste de la multa	CostoMulta	NA	400.000 COP
Tiempo restante	Restante	NA	Niveles en la Tabla 3
Entregas realizadas	Realizadas	NA	Niveles en la Tabla 3

Fuente: Elaboración propia.

Las funciones de utilidad para los modelos MNL y HDC se presentan a continuación en las ecuaciones de la 42 a la 57.

MNL Conductores de vehículo de carga

$$V_{EnVia1} = ASC_{EnVia1} + \beta_{Distancia} * Distancia + \beta_{Costo} * Tarifa + \beta_{Búsqueda} * Búsqueda + \xi_1 \quad \text{Ec. 42}$$

$$V_{EnVia2} = ASC_{EnVia2} + (\beta_{Distancia} * Distancia + \beta_{Costo} * Tarifa + \beta_{Búsqueda} * Búsqueda + \xi_2 \quad \text{Ec. 43}$$

$$V_{Ilegal} = ASC_{Ilegal} + \beta_{Multa} * CostoMulta * ProbMulta + \xi_3 \quad \text{Ec. 44}$$

$$V_{Seguir} = ASC_{Seguir} + \xi_4 \quad \text{Ec. 45}$$

MNL Conductores de vehículo de pasajeros

$$V_{EnVia} = ASC_{EnVia} + \beta_{Distancia} * Distancia + \beta_{Costo} * Tarifa + \xi_1 \quad \text{Ec. 46}$$

$$V_{Informal} = ASC_{Informal} + \beta_{Distancia} * Distancia + \xi_2 \quad \text{Ec. 47}$$

$$V_{FueraVia} = ASC_{OffStreet} + \beta_{Distancia} * Distancia + \beta_{Costo} * Tarifa + \beta_{Lluvia} * Lluvia + \xi_3 \quad \text{Ec. 48}$$

$$V_{Seguir} = ASC_{Seguir} + \beta_{Búsqueda} * Búsqueda + \xi_4 \quad \text{Ec. 49}$$

HDC Conductores de vehículo de carga

$$V_{EnVia1} = ASC_{EnVia1} + (\beta_{Distancia} + \varphi_{Menos1Ton} * Menos1Ton) * Distancia + (\beta_{Costo} + \varphi_{Bocagrande} * Bocagrande) * Tarifa + \beta_{Búsqueda} * Búsqueda + \xi_1 + \varepsilon_1 \quad \text{Ec. 50}$$

$$V_{EnVia2} = ASC_{EnVia2} + (\beta_{Distancia} + \varphi_{Menos1Ton} * Menos1Ton) * Distancia + (\beta_{Costo} + \varphi_{Bocagrande} * Bocagrande) * Tarifa + \beta_{Búsqueda} * Búsqueda + \xi_2 + \varepsilon_2 \quad \text{Ec. 51}$$

$$V_{Illegal} = ASC_{illegal} + (\beta_{Multa} * \varphi_{IngresoBajo} * IngresoBajo) * CostoMulta * ProbMulta + \alpha_{ConductaalEstacionar} * ConductaalEstacionar + \xi_3 + \varepsilon_3 \quad \text{Ec. 52}$$

$$V_{Seguir} = ASC_{Seguir} + \beta_{Realizadas} * Realizadas + \beta_{Restante} * Restante + \xi_4 + \varepsilon_4 \quad \text{Ec. 53}$$

HDC Conductores de vehículo de pasajeros

$$V_{EnVia} = ASC_{EnVia} + (\beta_{Distancia} + \varphi_{Mujer} * Mujer + \varphi_{ExpMenos16} * ExpMenos16 + \varphi_{Bocagrande} * Bocagrande) * Distancia + \beta_{Costo} * Tarifa + \xi_1 + \varepsilon_1 \quad \text{Ec. 54}$$

$$V_{Informal} = ASC_{Informal} + (\beta_{Distancia} + \varphi_{Mujer} * Mujer + \varphi_{ExpMenos16} * ExpMenos16 + \varphi_{Bocagrande} * Bocagrande) * Distancia + \alpha_{ConductaalEstacionar} * ConductaalEstacionar + \xi_2 + \varepsilon_2 \quad \text{Ec. 55}$$

$$V_{FueraVia} = ASC_{OffStreet} + (\beta_{Distancia} + \varphi_{Mujer} * Mujer + \varphi_{ExpMenos16} * ExpMenos16 + \varphi_{Bocagrande} * Bocagrande) * Distancia + \beta_{Costo} * Tarifa + \beta_{Lluvia} * Lluvia + \xi_3 + \varepsilon_3 \quad \text{Ec. 56}$$

$$V_{Seguir} = ASC_{Seguir} + (\beta_{Búsqueda} + \varphi_{EdadMenos30} * EdadMenos30) * Búsqueda + \beta_{Retrasado} * Retrasado + \xi_4 + \varepsilon_4 \quad \text{Ec. 57}$$

En la Tabla 12 se muestra la estimación de las ecuaciones estructurales y de medida de la variable latente *Conducta al estacionar* incluida en el modelo HDC. En el caso de los usuarios de vehículos de pasajeros, la variable latente se asoció a los indicadores: Causo congestión, Utilizo la acera y camino para acceder. Por otro lado, la variable latente para los vehículos de carga se asoció a: Causo congestión, Utilizo la acera, Evito estacionar en zonas prohibidas, Descargo en la calle y Busco zonas seguras. Los signos negativos de los indicadores Causo congestión, Utilizo la acera y Descargo en la calle son los adecuados ya que están asociados a violaciones a las normas de tránsito y tienen un efecto negativo en la variable conducta al estacionar. Por el contrario, los indicadores camino para acceder, Evito estacionar en zonas prohibidas y Busco zonas seguras están relacionados con una conducta deseable y tienen un efecto positivo en la variable *Conducta al estacionar*.

Asimismo, se encontró heterogeneidad asociada al valor de la variable latente para conductores de automóvil respecto a las variables *IngresoBajo* y *ExpMayor30*. Es decir, los conductores de automóvil de ingreso bajo tienden a tener una peor Conducta al estacionar. Por el contrario, ser un conductor de automóvil con una experiencia mayor a 30 años está asociada a una mejor conducta al estacionar. En el caso de los usuarios de vehículo de carga, los resultados de los modelos sugieren que la experiencia como

transportador tiene una influencia en la variable latente *Conducta al estacionar*. Particularmente, tener una experiencia menor de 11 años está asociado a una peor conducta al estacionar. En todos los casos, los niveles de confianza de las estimaciones de los parámetros son superiores al 80%.

Tabla 12 Ecuaciones estructurales y de medición

	Pasajeros		Carga	
Parámetros de las ecuaciones estructurales	Estimación	t-test rob.	Estimación	t-test rob.
$\gamma_{\text{IngresoBajo}}$	-0.29*	-1.50	-	-
$\gamma_{\text{ExpMayor30}}$	0.87***	2.99	-	-
$\gamma_{\text{ExpMenor11}}$	-	-	-0.37***	2.05
Parámetros de las ecuaciones de medida (efecto en VL)				
$\zeta_{\text{Causo Congestión}}$	-0.67***	-2.93	-2.28***	-3.85
$\zeta_{\text{Utilizo la acera}}$	-2.15***	-1.79	-1.07**	-4.21
$\zeta_{\text{Camino para acceder}}$	0.38	1.33	-	-
$\zeta_{\text{Evito zonas prohibidas}}$	-	-	0.62***	2.33
$\zeta_{\text{Descargo en la calle}}$	-	-	-1.37***	-4.01
$\zeta_{\text{Busco zonas seguras}}$	-	-	1.20**	2.93

***, **, * indican el nivel de confianza de la estimación al 95%, 90% y 85% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de modelación se probaron diferentes especificaciones involucrando las variables disponibles en la información recolectada. En la Tabla 13 y en la Tabla 16 se presentan los mejores modelos MNL y HDC para ambos tipos de usuarios. En general, los parámetros de los modelos estimados presentan niveles de confianza por encima de 85%. Los modelos MNL de la Tabla 13 nos permiten comparar de manera general las preferencias de ambos usuarios y la valoración de los principales atributos. Al observar las constantes específicas de los modelos, estas sugieren que *ceteris paribus*, ambos tipos de usuarios prefieren usar el estacionamiento que encuentren disponible antes que seguir buscando una mejor opción. Sin embargo, los valores de las constantes en el modelo sugieren que no existen diferencias marcadas entre las tres alternativas de estacionamiento (EnVía, Informal, FueraVía) para los vehículos de pasajeros. En contraste, los usuarios de vehículos de carga muestran una preferencia por el estacionamiento en vía, lo más cercano a su destino (EnVía1). Además, los usuarios de vehículos de carga, *ceteris paribus*, muestran una preferencia marcada entre estacionarse de manera ilegal frente a su destino (ilegal) y el estacionamiento más económico y alejado (EnVía2).

En el modelo de conductores de vehículos de pasajeros los atributos significativos son la distancia, el costo, el tiempo de búsqueda y el clima. Lo anterior en línea con lo reportado en la literatura (ver Tabla 1), excepto para el atributo relacionado con el clima, que es una de las novedades de este estudio. A pesar

de que los atributos propósito de viaje, hora de llegada, hora del día y duración fueron incluidos en distintas formulaciones, estos no resultaron ser significativos.

Tabla 13 Resultados modelos MNL.

	Pasajeros		Carga	
LL Final (Elección)	-1434		-976	
	Estimación	t-test rob.	Estimación	t-test rob.
$ASC_{EnVía}$	2.10***	7.28	-	-
$ASC_{Informal}$	2.01***	7.73	-	-
$ASC_{FueraVía}$	2.30***	7.48	-	-
$ASC_{EnVía1}$	-	-	2.22***	8.38
$ASC_{EnVía2}$	-	-	0.49**	1.84
$ASC_{Illegal}$	-	-	1.30***	6.03
$\beta_{Distancia}$	-0.21***	-6.66	-0.20***	-3.78
β_{Costo}	-1.21**	-1.87	-0.26***	-4.97
$\beta_{Búsqueda}$	-0.03***	-3.38	0.01***	2.86
β_{Lluvia}	0.39***	4.36	-	-
β_{Multa}	-	-	-0.003***	-7.60

***, **, * indican el nivel de confianza de la estimación al 95%, 90% y 85% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Todos los signos de los parámetros estimados son los esperados de acuerdo con los supuestos de la teoría microeconómica. El signo negativo en los atributos distancia y costo representan una disminución de la utilidad de las alternativas EnVía, Informal y FueraVía cuando los valores de estas variables aumentan. Asimismo, el signo negativo en el atributo tiempo de búsqueda, implica una disminución de la utilidad de la alternativa Seguir. Esto es, entre más tiempo los usuarios lleven buscando donde estacionar, menos probable es que decidan seguir buscando una nueva alternativa. Finalmente, el signo positivo en el atributo Lluvia sugiere un aumento en la utilidad de la alternativa estacionar fuera de vía. Es decir, cuando llueve es más probable que los usuarios busquen alternativas que eviten que tanto ellos como sus vehículos se mojen.

Para el caso del modelo de conductores de vehículo de carga, los atributos significativos fueron la distancia, el costo, el tiempo de búsqueda y el valor esperado de la multa. A pesar de que la duración, el tiempo restante para completar la entrega, el número de entregas realizadas y la hora del día fueron probadas en algunas especificaciones del modelo, estas no resultaron ser significativas. Tal como se reportó en el capítulo 0, la literatura referente a la elección de estacionamiento de vehículo de carga es

limitada. Sin embargo, se han reportado la significancia de las variables costo, valor esperado de la multa y distancia al destino para los usuarios de camiones en contextos urbanos (Dalla Chiara et al., 2020; Gopalakrishnan et al., 2020; Nourinejad et al., 2014).

Los signos negativos de los atributos distancia y costo implican una disminución de la utilidad de las alternativas EnVía1 y EnVía2 cuando estas variables aumentan. Es decir, entre más costoso y distante se encuentren los estacionamientos en vía, menos probable es que los usuarios de vehículos de carga decidan estacionarse allí. Igualmente, el signo negativo del valor esperado de la multa hace que la utilidad de la alternativa ilegal disminuya. En otras palabras, entre más certeza haya de la aplicación de la multa y mayor sea su valor, el conductor tendrá menos posibilidad de estacionarse ilegalmente. Por el contrario, el signo positivo del atributo tiempo de búsqueda aumenta la utilidad de las alternativas EnVía1 y EnVía2. Lo anterior puede interpretarse como que entre más tiempo lleven buscando un estacionamiento, más probable es que los conductores prefieran los estacionamientos en la vía.

Adicionalmente, los modelos permiten comparar la valoración de los principales atributos entre ambos tipos de usuarios. Para ello se estimó la disposición a pagar (DAP), con sus intervalos de confianza al 95%, por reducir la distancia de caminata desde el estacionamiento hasta el destino y el tiempo de búsqueda (Figura 13 y Figura 14). En el caso de la distancia de caminata para los conductores de vehículo de pasajeros, la DAP se encuentra en un rango entre 0 y 3594 COP por cada bloque con un valor medio de 1767 COP por bloque, mientras que para los conductores de vehículos de carga su valoración es menor con un rango entre 0 y 1116 COP por bloque con un valor medio de 759 COP por bloque. Es decir, la diferencia de la DAP entre ambos usuarios es aproximadamente el doble. Por otra parte, la DAP por reducir el tiempo de búsqueda para los conductores de vehículo de pasajero está en el rango entre 0 y 9.2 COP por minuto con un valor medio de 4.5 COP por minuto, mientras que para los conductores de vehículo de carga la DAP es mucho menor con una valoración entre 0.12 y 0.80 COP por minuto y un valor medio de 0.46 COP por minuto.

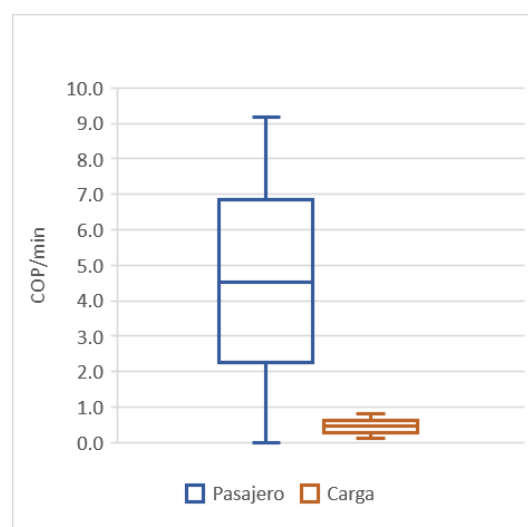
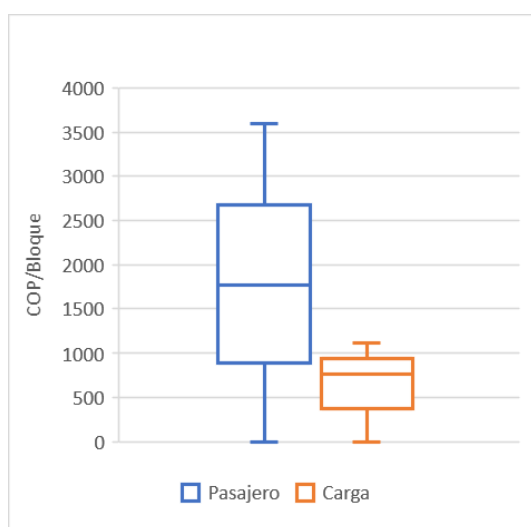


Figura 13. DAP por reducir la distancia al destino **Figura 14. DAP por reducir el tiempo de búsqueda.**

Finalmente, se calcularon las elasticidades directas y cruzadas de la demanda con respecto al costo, la distancia y el tiempo de búsqueda para ambos tipos de usuarios las cuales resultaron en el rango inelástico. La Tabla 14 y la Tabla 15 presentan las elasticidades para los atributos que describen las elecciones de los usuarios de vehículos de carga y los usuarios de vehículos de pasajeros respectivamente. En las tablas las cifras subrayadas representan las elasticidades directas y las no subrayadas las elasticidades cruzadas.

Tabla 14 Elasticidades para usuarios de vehículo de carga.

Atributo (Alternativa)	Alternativa		
	En vía	Ilegal	Seguir
Costo (En vía)	<u>-0.27</u>	0.20	0.20
Distancia (En vía)	<u>-0.26</u>	0.05	0.09
Búsqueda (En vía)	<u>0.05</u>	-0.10	-0.11
Multa (Ilegal)	0.16	<u>-0.56</u>	0.16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15 Elasticidades para usuarios de vehículo de pasajeros.

Atributo (Alternativa)	Alternativa			
	En vía	Informal	Fuera vía	Seguir
Costo (En vía1)	<u>-0.20</u>	0.09	0.09	0.09
Costo (Fuera vía)	0.11	0.11	<u>-0.24</u>	0.11
Distancia (En vía1)	<u>-0.14</u>	0.06	0.06	0.06
Distancia (Informal)	0.08	<u>-0.15</u>	0.08	0.09
Distancia (Fuera vía2)	0.13	0.14	<u>-0.31</u>	0.13
Búsqueda (Seguir)	0.02	0.02	0.02	<u>-0.44</u>

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se estimaron modelos HDC para cada tipo de usuarios (Tabla 16). Los modelos HDC permiten tener información de la influencia de la variable latente *Conducta al estacionar* en la elección de estacionamiento, lo cual no hubiera sido posible sin adoptar este tipo de modelación. Adicionalmente, en los modelos HDC, se incorporaron variaciones sistemáticas en los gustos y el efecto panel. En el proceso de modelación de los modelos HDC para ambos usuarios se probaron nuevamente todas las variables disponibles de las encuestas, resultando significativas algunos atributos adicionales respecto a los modelos MNL. Para el caso de los conductores de vehículos de pasajeros el atributo hora de llegada resultó significativo en la alternativa seguir buscando. Esto es, si los usuarios tienen un retraso de 15 minutos en su hora de llegada, es menos probable que decidan seguir buscando una nueva alternativa. Para el caso de los conductores de vehículo de carga, los atributos tiempo restante para completar la entrega y el

número de entregas realizadas resultaron significativas cuando se incluyeron en la alternativa seguir buscando. Es decir, entre más entregas de su ruta lleven realizadas y el tiempo restante para cumplir con la entrega se mayor, la probabilidad de la alternativa seguir buscando aumentará.

En ambos modelos, el parámetro que captura el efecto panel resultó ser significativo, lo cual indica que existe correlación entre las observaciones de un mismo encuestado. Adicionalmente, las variaciones sistemáticas en los gustos que se incluyeron en el modelo para usuarios de vehículos de pasajeros sugieren que la valoración del atributo de la distancia depende del género, la experiencia conduciendo y la zona donde se encuentren los conductores. Es decir, las mujeres y aquellos que buscan estacionar en la zona de Bocagrande valoran más la distancia de caminata al destino. Por el contrario, las personas con una experiencia conduciendo menor a 16 años tienen una valoración menor de este atributo. Es decir, están dispuestas a estacionar más alejadas de su destino y caminar distancias mayores. Asimismo, las personas con menos de 30 años tienen una valoración mayor del tiempo de búsqueda, respecto a personas de mayor edad.

Al igual que en el modelo de conductores de vehículo de pasajeros, la inclusión de variaciones sistemáticas en los gustos permite capturar la heterogeneidad en la preferencia hacia ciertos atributos por parte de los conductores de los vehículos de carga. Es así como los conductores con vehículos con capacidad menor a una tonelada presentan una mayor desutilidad del atributo distancia que los conductores de vehículos de mayor capacidad. Es decir, los conductores de vehículos de carga más livianos prefieren alternativas de estacionamiento mucho más cercanas a su destino que los conductores con vehículos de mayor capacidad, tal vez porque los tiempos de descarga asociados son menores en los vehículos livianos. Además, los conductores cuando se encuentran en Bocagrande tienen una valoración más desfavorable de las tarifas de estacionamiento que en Manga. Se intuye que este resultado puede ser explicado debido a las características de la zona de Bocagrande, donde las calles son más amplias y podrían optar por el estacionamiento ilegal sin ocasionar tanta congestión como en la zona de Manga. Finalmente, los conductores de ingresos bajos presentan una valoración negativa más alta para el valor esperado de la multa que los conductores de mayor ingreso. Considerando que el 89% de los conductores encuestados reportó que ellos mismos deben pagar sus multas (Tabla 7), a menor capacidad económica, el impacto de una multa será mayor en su economía familiar.

Como se mencionó anteriormente, la estimación de modelos HDC permite verificar si existe influencia de la conducta al estacionar en los contextos estudiados. En ambos casos, la variable latente *Conducta al estacionar* resultó ser significativa. En el caso de los conductores de vehículos de pasajeros, la variable latente influencia negativamente la alternativa de estacionar en estacionamientos con cuidadores informales. Este resultado sugiere que los conductores que tienen una buena conducta al estacionar son menos propensos a elegir la alternativa informal. En la misma línea, pero para los conductores de vehículos de carga, la variable latente influencia negativamente la alternativa estacionar ilegalmente. Lo anterior sugiere que es menos probable que los conductores de vehículos de carga que tienen mejor conducta al estacionar elijan la alternativa de estacionamiento ilegal. Estos resultados sugieren que, si existiera un cambio en la conducta al estacionar de los conductores, por ejemplo, a través de campañas de educación

vial, los conductores disminuirán su preferencia por los estacionamientos con cuidadores informales y por estacionarse ilegalmente según sea el caso.

Tabla 16 Resultados modelos HDC.

Pasajero			Carga		
Observations	1608		Observations	1392	
Respondents	268		Respondents	232	
LL Final (Elección)	-1434		LL Final (Elección)	-974	
Atributos	Estimación	t-test rob.	Atributos	Estimación	t-test rob.
$ASC_{EnVía}$	3.34***	5.83	$ASC_{EnVía1}$	6.47***	8.11
$ASC_{Informal}$	3.28***	6.50	$ASC_{EnVía2}$	2.65***	3.61
$ASC_{FueraVía}$	3.62***	5.76	ASC_{Ilegal}	2.44***	3.88
$\beta_{Distancia}$	-0.32***	-2.84	$\beta_{Distancia}$	-0.71***	-4.39
φ_{Mujer}	-0.28**	-1.88	$\varphi_{Menos1Ton}$	-1.17	-1.40
$\varphi_{ExpMenos16}$	0.24***	1.97	β_{Costo}	-0.41***	-2.28
$\varphi_{Bocagrande}$	-0.51***	-4.32	$\varphi_{Bocagrande}$	-0.50***	-2.83
β_{Costo}	-1.81*	-1.44	$\beta_{Búsqueda}$	0.02***	2.85
$\beta_{Búsqueda}$	-0.06***	-3.49	β_{Multa}	-0.05***	-2.96
$\varphi_{EdadMenos30}$	-0.10***	-2.09	$\varphi_{IngresoBajo}$	-0.05***	-2.80
β_{Lluvia}	0.83***	4.46	$\beta_{Realizadas}$	0.03**	1.75
$\beta_{Retrasado}$	-0.90***	-2.04	$\beta_{Restante}$	0.02***	3.15
$Efecto Panel$	-2.26***	-14.57	$Efecto Panel$	2.96***	11.65
$\alpha_{ActitudalEstacionar}$	-0.55***	-2.28	$\alpha_{ActitudalEstacionar}$	-2.99***	-4.49

***, **, * indican el nivel de confianza de la estimación al 95%, 90% y 85% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, de los modelos HDC también se pueden estimar las DAP por reducir la distancia de caminata desde el estacionamiento hasta el destino y el tiempo de búsqueda. En la Tabla 17 y la Tabla 18 se presentan las estimaciones de la DAP con sus respectivos intervalos de confianza al 95%, considerando las variaciones sistemáticas de los individuos. Debido a que las variaciones sistemáticas no son iguales entre ambos usuarios no se realiza la comparación entre ellos.

En general, para los conductores de vehículos de pasajeros se encontró que, de acuerdo con el género, las mujeres tienen mayor DAP por reducir la distancia a la que se encuentra el estacionamiento del destino.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Es decir, están dispuestas a pagar más por obtener un estacionamiento más cercano a su destino final. Lo anterior va en línea con lo encontrado por Soto et al (2018). Además, según la experiencia conduciendo y la zona donde se encuentren los usuarios, las personas con experiencia mayor a 15 años y que se encuentren en Bocagrande tienen mayor DAP por reducir la distancia de caminata. Finalmente, la DAP por reducir el tiempo de búsqueda para estos usuarios es mayor si son menores de 30 años.

Por otra parte, se observa que para los conductores de vehículos de carga cuyos vehículos tienen capacidad menor a 1 tonelada y se encuentran en la zona de Manga la DAP por reducir la distancia de caminata es mayor. Asimismo, para estos usuarios su DAP por reducir el tiempo de búsqueda varía según la zona donde se encuentren, siendo menor cuando sus entregas las realizan en Manga.

Tabla 17 DAP por reducir la distancia (COP/Bloque).

Pasajero					Carga			
Zona	Género	Experiencia	Media	Intervalo de Confianza	Zona	Capacidad	Media	Intervalo de Confianza
Bocagrande	Mujer	< 16	4755	0-11233	Bocagrande	< 1 Ton	2153.4	7-4300
Bocagrande	Mujer	≥ 16	6016	0-14291	Bocagrande	≥ 1 Ton	755.6	432-1080
Bocagrande	Hombre	< 16	3177	0-7456	Manga	< 1 Ton	4774.9	0-10903
Bocagrande	Hombre	≥ 16	4438	0-10483	Manga	≥ 1 Ton	1675.4	292-3059
Manga	Mujer	< 16	2038	0-5129				
Manga	Mujer	≥ 16	3300	0-8120				
Manga	Hombre	< 16	460	0-1652				
Manga	Hombre	≥ 16	1722	0-4331				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18 DAP por reducir el tiempo de búsqueda (COP/min).

Pasajero			Carga		
Edad	Media	Intervalo de Confianza	Zona	Media	Intervalo de Confianza
< 30	14.33	0-35	Bocagrande	9.26	3-16
≥ 30	5.72	0-13	Manga	0.89	0-2

Fuente: Elaboración propia.

5 Modelo de planificación estratégica.

5.1 Caso de estudio

El caso de estudio consta de 24 estacionamientos, 64 usuarios, de los cuales 9 son camiones y una fase de modelización de una hora y quince minutos que corresponde a 15 períodos (es decir, cada período equivale a cinco minutos). Este caso se inspiró en la zona de Bocagrande de la ciudad de Cartagena descrita en el apartado 4.1. La oferta de estacionamiento se seleccionó de acuerdo con el espacio disponible en la zona que podría usarse como estacionamiento en vía, cuidando aspectos relacionados a la seguridad vial y la accesibilidad a los establecimientos. La información de la demanda de estacionamiento se generó asignando aleatoriamente llegadas y destinos para cada tipo de usuario. Las distancias a cada estacionamiento se calcularon utilizando herramientas SIG y luego fueron almacenadas en la matriz de distancia ($Dist_{ij}$). La Figura 15 muestra un esquema del caso de estudio con la oferta y la demanda simulada.

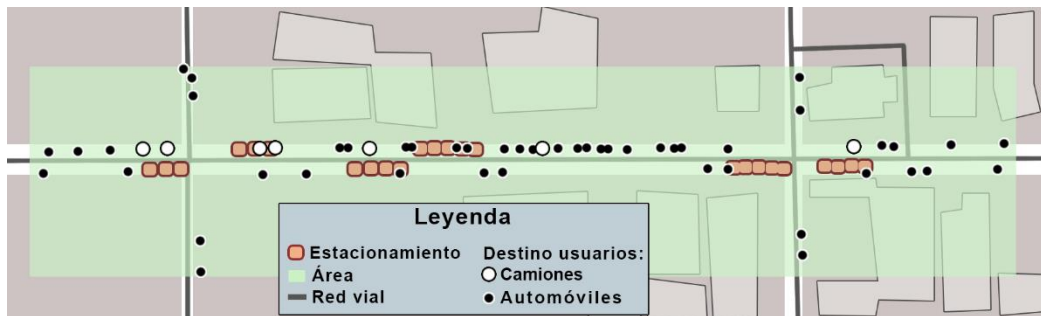


Figura 15 Esquema del área de estudio simulada.

Los parámetros de comportamiento de los usuarios como la duración media, la máxima distancia de caminata hasta el destino y el tiempo máximo de circulación fueron asignados de acuerdo con la información recolectadas en las encuestas (Capítulo 0). La duración en el estacionamiento en el caso de estudio varía entre 2 y 10 periodos para los usuarios de vehículos de pasajeros y entre 1 y 6 periodos para los usuarios de vehículos de carga. El tiempo máximo de circulación para los usuarios de vehículos de pasajeros es de tres periodos, mientras que para usuarios de vehículos de carga es de un periodo. La distancia máxima a pie hasta el destino es de 200 metros para los usuarios de vehículos de pasajeros y de 100 metros para los usuarios de vehículos de carga. Por último, la llegada de los usuarios a la zona comienza en el periodo 1 hasta el periodo 7. La Figura 16 muestra la frecuencia de llegada a la zona según el tipo de usuario.

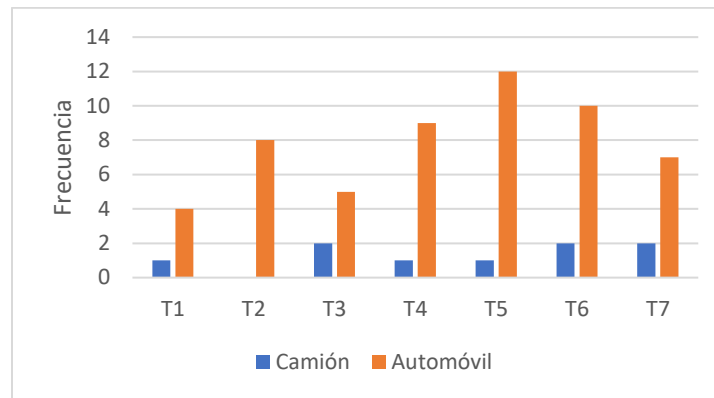


Figura 16 Frecuencia de llegadas por tipo de usuario.

Modelo de elección discreta

En la aplicación de los modelos de planificación estratégica que requieran la integración del modelo de elección discreta se utilizó el modelo MNL presentado en la Tabla 13 del capítulo 0. Para utilizar los parámetros estimados dentro del modelo de optimización se hicieron las respectivas conversiones de unidades considerando que un bloque es aproximadamente 200 metros y un periodo es igual a 5 minutos. En todos los casos se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Además de las diferentes opciones de plazas de estacionamiento, los usuarios de vehículos de pasajeros tienen la alternativa de no estacionar y los usuarios de vehículos de carga tienen las alternativas de no estacionar o de estacionar ilegalmente.
- Las alternativas de estacionamiento que exceden la máxima distancia que los usuarios están dispuestos a caminar no estarán disponibles en el conjunto de alternativas.
- Para los usuarios que no estacionan, el tiempo de circulación asociado a la externalidad es el máximo tiempo de búsqueda. Para los usuarios que estacionan ilegalmente, el tiempo de circulación es cero.
- El valor esperado de la multa, la tarifa y las distancias son variables exógenas del modelo de optimización que sólo afectan la elección y por ende son valores de entrada en el modelo.
- El tiempo de búsqueda es una variable endógena del modelo de optimización. Para calcular los límites superiores e inferiores de la función de utilidad, los límites del atributo tiempo de búsqueda para los usuarios de vehículos de pasajero son: $0 \leq \text{Tiempo de Búsqueda} \leq MCirc_i$ y para los usuarios de vehículos de carga son: $MCirc_i \leq \text{Tiempo de Búsqueda} \leq 0$.

Otras estimaciones: Tarifas y externalidades

Para determinar una aproximación del número de vehículos afectados por la presencia de un camión estacionado ilegalmente, se consideró un modelo lineal de flujo vehicular (Greenshields et al., 1935), la geometría de la infraestructura vial en Bocagrande y los datos de las encuestas. De tal manera que teniendo la capacidad por carril de 1600 veh/hr, asumiendo que la afectación será en 1.3 carriles en una

longitud de 200 metros y la velocidad media de la vía es de 35Km/hr se estimó la curva de flujo capacidad. Adicionalmente, se definieron tres grados de saturación para representar tres niveles del flujo vehicular. Posteriormente, se estimó el número de vehículos afectados multiplicando la capacidad del tramo por la tasa de ocupación promedio en la zona. Finalmente, la Tabla 19 muestra el número de personas afectadas en un tramo de 200 metros por un vehículo de carga estacionado ilegalmente para tres niveles de flujo vehicular. Además, el costo de la externalidad asociado a la congestión generada por un vehículo mal estacionado se estimó asumiendo que el Valor Subjetivo del Tiempo (VST) de búsqueda estimado en las encuestas (Capítulo 0) es igual al VST de viaje y que el VST de espera en congestión es 2.5 más que el VST de viaje. Finalmente, el VST del tiempo en congestión se asumió como 280 COP/ periodo.

Tabla 19 Número de afectados por estacionamiento ilegal según el nivel de flujo vehicular.

Flujo Vehicular	Grado de Saturación (%)	Usuarios afectados
Bajo	20	3
Medio	50	9
Alto	80	17

Fuente: Elaboración propia.

Para estimar los costos por la circulación de los vehículos de carga y pasajero en búsqueda de estacionamiento se tomó como referencias las estimaciones presentadas en el Manual sobre los costes externos del transporte (EC, 2019), un estudio realizado para la Unión Europea que incluye la estimación de costos de externalidad de diversas categorías, para diferentes modos de transporte y para diferentes países. Los datos fueron tomados considerando entornos urbanos, para un vehículo típico de la zona y según la tasa de ocupación obtenida de las encuestas. Luego, de aplicar las conversiones correspondientes, la externalidad por circulación para un vehículo de pasajero se estimó en 7645 COP/periodo y para un vehículo de carga en 8746 COP/periodo. Estos valores incluyen las externalidades por siniestralidad, congestión, polución, ruido y cambio climático.

5.2 Resultados experimentales

Los resultados fueron obtenidos con el solver LINDO GLOBAL (Lin & Schrage, 2009) usando la interfaz de LINGO 19 en un ordenador de 40 nodos a 2 GHz con 64 GB de RAM. Los resultados fueron obtenidos con el optimizador global con todos los parámetros por defecto y utilizando un límite de tiempo de ejecución de 4 horas para funciones NS y 8 horas para las funciones BS.

5.2.1 Maximización del nivel de servicio

Los modelos de optimización con las funciones objetivo NS_1 (ecuación 8) y NS_2 (ecuación 9) fueron ejecutados con las restricciones presentadas en el apartado 3.2.1.2 (ecuación de la 10 a la ecuación 22). La Tabla 20 presenta los resultados de las dos formulaciones propuestas. En la tabla los porcentajes de variación de cada término fueron calculados tomando como base NS_1 como referencia. Para la función NS_2 , se asumió $\theta = 1$. El análisis del efecto de θ será presentado posteriormente.

En general, NS₁ atendió a 51 usuarios, mientras que NS₂ atendió a 50 usuarios. Al analizar los resultados por tipo de usuario, NS₂ atendió un 50 % más de camiones, pero un 9% menos de automóviles que NS₁. Con respecto a la utilización del estacionamiento, NS₁ usó los estacionamientos durante 254 períodos, mientras que NS₂ los utilizó durante 239. La utilización del estacionamiento con la asignación NS₂ aumentó en un 63% para los camiones, pero disminuyó en un 11% para los automóviles. Asimismo, la primera formulación permitió la circulación de 33 usuarios durante 82 periodos. En contraste, el segundo enfoque permitió que 30 usuarios circularan antes de ser atendidos durante 83 períodos. Los resultados anteriores podrían deberse a la asignación de una mayor cantidad de espacio de estacionamiento para camiones en NS₂ que en NS₁ (es decir, 5 frente a 2) pero menos estacionamientos para automóviles (es decir, 19 en NS₂ frente a 22 en NS₁). Entonces, la variación porcentual de los períodos que los vehículos buscan ser atendidos es -75% para camiones, y 5% más para autos en NS₂ en comparación con NS₁.

En consecuencia, bajo el escenario de demanda probado, la función objetivo NS es mayor cuando el modelo considera explícitamente el efecto diferenciado de tener dos tipos de usuarios (es decir, la función NS₂) que cuando se toman en cuenta todos los vehículos como un todo. En particular, en la formulación NS₂ si bien el valor de Búsqueda de Estacionamiento aumenta un 1% en comparación con NS₁, el valor del término Vehículo Servido aumenta un 10% mientras que el valor del término Uso de Estacionamiento disminuye un 6%. En otras palabras, aumentar el número de plazas de estacionamiento de camiones en NS₂ reduce el uso de la infraestructura disponible, pero aumenta ligeramente el tráfico en la zona. Sin embargo, todo el sistema logra un mejor NS neto.

Si bien estos análisis no pretenden demostrar cuál es la mejor formulación, destaca la versatilidad y las implicaciones de considerar explícitamente diferentes usuarios (como lo hace la función NS₂) al planificar el estacionamiento en vía. En la práctica, no desagregar los tipos de usuarios podría llevar a ignorar que los costos externos del camión son más altos que los costos externos de los automóviles

Tabla 20 Resultados del modelo para NS₁ y NS₂.

	Vehículos Servidos		Periodos Servidos		Vehículos Buscando		Periodos Buscando		Estacionamientos Asignados		Función Objetivo			
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	VS ¹	UE ²	BE ³	NS ⁴
NS ₁	6	45	16	238	4	29	4	78	2	22	0.797	0.706	0.471	1.031
NS ₂ *	9	41	26	213	1	29	1	82	5	19	0.873	0.664	0.477	1.060
Variación (%)	50	-9	63	-11	-75	0	-75	5	150	-14	10	-6	1	3

C=Camión, A=Automóvil, Vehículos Servidos¹, Uso del Estacionamiento², Búsqueda de Estacionamiento³, Nivel de Servicio⁴, * $\theta = 1$.

Fuente: Elaboración propia.

Para ilustrar los resultados entregados por el modelo de asignación, la Figura 17 y la Figura 18 presentan el uso de los estacionamientos en el tiempo. En las figuras, los unos (1) representan los estacionamientos que están siendo ocupados por un usuario en ese periodo de tiempo y el cero (0) que el estacionamiento no fue asignado a ningún usuario. Además, los estacionamientos que están resaltados en amarillo son los que han sido asignados para vehículos de carga.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	Total
P0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	14
P3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	9
P4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10
P5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	11
P6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	8
P7	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	12
P9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P10	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	8
P11	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P12	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	8
P13	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11
P14	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10
P15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	11
P16	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	11
P17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	13
P18	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	12
P19	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
P20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	11
P21	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12
P22	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P23	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5
Total	5	12	16	18	22	24	24	24	23	21	21	19	15	10	0	254

Figura 17 Asignación de NS₁ en el tiempo.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	Total
P0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
P1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12
P3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	7
P4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P5	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12
P6	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	12
P7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	6
P8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	14
P9	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	11
P10	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5
P11	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	6
P12	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	14
P13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	6
P14	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	10
P15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
P16	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	12
P17	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	10
P18	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	13
P19	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	6
P20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	8
P21	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	13
P23	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12
Total	5	13	18	19	21	23	23	23	21	18	17	15	14	9	0	239

Figura 18 Asignación de NS₂ en el tiempo.

Los espacios de estacionamiento asignados a los camiones están resaltados en amarillo.

P=Plazas de estacionamiento, T=Periodo

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.1 Evaluación del modelo

En esta sección se analizará la flexibilidad de la función NS₂ como herramienta de planificación para los tomadores de decisión. El análisis incluirá el efecto de la circulación de vehículos, el impacto de la priorización para servir a un tipo de usuario, y el efecto de considerar diferentes objetivos de planificación.

Efecto de la circulación de usuarios

El efecto de un vehículo en circulación puede depender de algunas características como el tamaño, el tipo de combustible y el comportamiento del conductor. Los impactos podrían expresarse en términos de congestión, daños a la infraestructura, contaminación, o una combinación de los anteriores. El valor del parámetro theta (θ) en la función NS₂ permite capturar el efecto diferencial de circulación para diferentes usuarios. En el proceso de planificación, este efecto podría variar de una zona a otra, dependiendo de los tipos de vehículos considerados.

La Tabla 21 muestra los resultados del modelo al variar θ entre 1 y 2.5. En todos los escenarios, el sistema de estacionamiento atiende a los nueve camiones. Sin embargo, existen diferencias tanto en la ubicación como en la cantidad de espacios de estacionamiento asignados en cada escenario. Dependiendo del valor de θ , los vehículos de pasajeros atendidos varían entre 40 y 41. Los resultados muestran que el uso del estacionamiento de automóviles varía de 203 a 217 periodos, los periodos de búsqueda de estacionamiento de automóviles de 82 a 89 y los automóviles que buscan espacios de estacionamiento de 29 a 32.

Cuando $\theta > 1.3$, el modelo asigna más plazas de estacionamiento para camiones que en la situación de referencia ($\theta = 1$). Entonces, para el caso analizado, cuando el efecto diferenciado de la circulación de los dos tipos de usuarios es menor o igual a 1.3, no influye en la asignación de estacionamiento. Sin embargo, cuando theta aumenta encima de este valor, el número de vehículos y los periodos de búsqueda de estacionamiento también aumentan. Se puede observar que no existe un patrón claro en los valores referentes a los vehículos servidos, la utilización y la búsqueda de estacionamiento a medida que theta aumenta en los diferentes escenarios. Parece que, en este caso particular, considerando $\theta=1.3$ se logra la mejor asignación de espacios de estacionamiento para ambos usuarios considerando el valor neto de NS. Sin embargo, a medida que theta aumenta de 1.3, el modelo compensa la mayor externalidad que provoca la circulación de camiones durante la búsqueda de estacionamiento asignando más estacionamientos a estos usuarios. En detrimento, el modelo asigna una menor disponibilidad de estacionamiento de automóviles. Lo anterior da como resultado un tiempo de búsqueda de automóviles más prolongado, pero una leve ganancia neta de NS del sistema a medida que aumenta theta debido a un aumento del número de periodos servidos para auto.

Tabla 21 Resultados del modelo NS – Efecto de la circulación de usuarios

θ	Vehículos Servidos		Periodos Servidos		Vehículos Buscando		Periodos Buscando		Estacionamientos Asignados		Función Objetivo			
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	VS ¹	UE ²	BE ³	NS ⁴
1	9	41	26	213	1	29	1	82	5	19	0.873	0.664	0.477	1.060
1.3	9	41	26	213	1	29	1	82	5	19	0.873	0.664	0.471	1.065
1.5	9	40	26	203	0	30	0	85	6	18	0.864	0.636	0.476	1.024
1.7	9	40	26	207	0	31	0	87	6	18	0.864	0.647	0.483	1.028
2	9	41	26	212	0	31	0	88	6	18	0.873	0.661	0.481	1.053
2.5	9	40	26	217	0	32	0	89	6	18	0.864	0.675	0.475	1.064

C=Camión, A=Automóvil, Vehículos Servidos¹, Uso del Estacionamiento², Búsqueda de Estacionamiento³, Nivel de Servicio⁴

Fuente: Elaboración propia.

Efecto de la priorización en la atención de un tipo de usuario

La priorización de un determinado tipo de usuario en la asignación de estacionamiento puede aplicarse de forma permanente, estacional o por franja horaria, de acuerdo con el comportamiento de uso del suelo y la atracción de viajes en la zona. Este efecto está estrechamente relacionado con políticas como las restricciones de tiempo. La función NS₂ permite priorizar a los usuarios en el proceso de planificación del estacionamiento al incluir un parámetro adicional gamma (γ). Este parámetro en la ecuación 58 puede tomar valores entre 0 y 1. Un menor valor de γ implica una menor importancia de los usuarios de automóviles.

$$NS_2 = \left[\gamma * \frac{\sum_i' \sum_l A_{i'l}}{J} + (1 - \gamma) * \frac{\sum_{i''} \sum_l A_{i''l}}{K} \right] + \left[\frac{\sum_i \sum_l \sum_t X_{ilt}}{L * T} \right] -$$

$$\left[\frac{(\sum_{i'} Inicio_{i'} - Llegada_{i'}) + (J - \sum_{i'} \sum_l A_{i'l}) * MCirc_p + \theta * (\sum_{i''} Inicio_{i''} - Llegada_{i''}) + (K - \sum_{i''} \sum_l A_{i''l}) * MCirc_c}{J * MCirc_p + \theta * K * MCirc_c} \right] \quad \text{Ec. 58}$$

La Tabla 22 muestra los resultados del modelo para valores de γ entre 0,1 y 0,9. Se calcularon todos los escenarios considerando efectos de circulación similares entre los usuarios (es decir, $\theta=1$). La Tabla 23 muestra el porcentaje de variación de los diferentes indicadores frente a un escenario base ($\gamma=0.5$). El número de estacionamientos asignados para autos y camiones es igual si el decisor prioriza a los usuarios de camiones sobre los autos o al menos les da la misma importancia a ambos usuarios ($\gamma \leq 0.5$). El modelo asigna 19 estacionamientos para automóviles y 5 para camiones en los tres escenarios. Como era de esperarse, al aumentar el valor gamma a 0.7 y 0.9, el NS para camiones disminuye a medida que disminuye el número de espacios de estacionamiento asignados a ellos. Simultáneamente aumenta su búsqueda de estacionamiento. Finalmente, es importante resaltar que a medida que los usuarios de camiones se vuelven más importantes (es decir, γ disminuye), el NS neto del sistema aumenta.

Tabla 22 Resultados del modelo NS – Efecto de la priorización de un tipo de usuario.

γ	Vehículos Servidos		Periodos Servidos		Vehículos Buscando		Periodos Buscando		Estacionamientos Asignados		Función Objetivo			
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	VS ¹	UE ²	BE ³	NS ⁴
0.1	9	41	26	219	1	30	1	83	5	19	0.975	0.681	0.483	1.172
0.3	9	41	26	216	1	29	1	82	5	19	0.924	0.672	0.477	1.119
0.5	9	41	26	213	1	29	1	82	5	19	0.873	0.664	0.477	1.060
0.7	8	43	25	229	2	29	2	81	4	20	0.814	0.706	0.477	1.042
0.9	6	44	16	233	4	28	4	77	2	22	0.787	0.692	0.466	1.013

C=Camión, A=Automóvil, Vehículos Servidos¹, Uso del Estacionamiento², Búsqueda de Estacionamiento³, Nivel de Servicio⁴, $\theta = 1$.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23 Porcentaje de variación - Efecto de la priorización de un tipo de usuario. Valor de referencia: $\gamma = 0.5$.

γ	Vehículos Servidos		Periodos Servidos		Vehículos Buscando		Periodos Buscando		Estacionamientos Asignados		Función Objetivo			
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	VS ¹	UE ²	BE ³	NS ⁴
0.1	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	12	3	1	11
0.3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6	1	0	6
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

0.7	-11	5	-4	8	100	0	100	-1	-20	5	-7	6	0	-2
0.9	-33	7	-38	9	300	-3	300	-6	-60	16	-10	4	-2	-4

C=Camión, A=Automóvil, Vehículos Servidos¹, Uso del Estacionamiento², Búsqueda de Estacionamiento³, Nivel de Servicio⁴, $\theta = 1$.

Fuente: Elaboración propia.

Efecto de los objetivos de planificación

Los objetivos de la planificación pueden diferir según las necesidades del área y los intereses del tomador de decisiones. La función NS_2 permite priorizar los objetivos de planificación al agregar tres parámetros, tomando valores entre 0 y 1, asociados con cada término incluido en la función (es decir, *Vehículos Atendidos*, *Uso del Estacionamiento* Y *Búsqueda de Estacionamiento*) y una restricción para garantizar que los tres parámetros suman hasta el valor de uno. Ejemplificamos esta modificación de la función NS_2 incorporando solamente un nuevo parámetro, alfa (α), como se expresa en la ecuación 59. El parámetro α toma un valor entre 0 y 1 y captura la importancia de los beneficios de la asignación de estacionamientos representados en los dos primeros términos de la función objetivo (es decir, *Vehículos Servidos* y *Uso del Estacionamiento*). Teniendo en cuenta la nueva restricción descrita anteriormente, multiplicamos el término restante de la función NS_2 por el complemento del parámetro α (es decir, $1-\alpha$). Esta expresión representa el peso que el tomador de decisiones otorga a las externalidades de estacionamiento relacionadas con el tiempo de búsqueda de estacionamiento por no encontrar espacios de estacionamiento disponibles.

$$NS_2 = \alpha * \left\{ \left[\gamma * \frac{\sum_{i'} \sum_l A_{i'l}}{2 * J} + (1 - \gamma) * \frac{\sum_{i''} \sum_l A_{i''l}}{2 * K} \right] + \left[\frac{\sum_i \sum_l \sum_t X_{ilt}}{2 * L * T} \right] \right\} - (1 - \alpha) * \left\{ \left[\frac{(\sum_{i'} Inicio_{i'} - Llegada_{i'}) + (J - \sum_{i'} \sum_l A_{i'l}) * MCirc_p + \theta * (\sum_{i''} Inicio_{i''} - Llegada_{i''}) + (K - \sum_{i''} \sum_l A_{i''l}) * MCirc_c}{J * MCirc_p + \theta * K * MCirc_c} \right] \right\} \quad Ec. 59$$

La Tabla 24 muestra los resultados del modelo para valores de α entre 0.1 y 0.9. Se calcularon todos los escenarios considerando $\theta=1.3$ y $\gamma = 0.5$. Interesantemente, la asignación más alta de espacios de estacionamiento para camiones ocurre cuando el tomador de decisiones otorga el mismo peso a ambos objetivos de planificación ($\alpha = 0.5$). De los 24 estacionamientos disponibles, seis son para camiones. En este escenario, solo los automóviles experimentan tiempos de búsqueda debido a la falta de disponibilidad de estacionamientos para este tipo de usuarios. Sin embargo, considerar pesos iguales no da como resultado el mejor NS del sistema neto.

El valor de la función NS parece ser proporcional a α . A medida que aumenta α , también lo hace el valor de la función NS. El escenario $\alpha = 0.9$, que prioriza la provisión y utilización de estacionamiento para todos los usuarios (es decir, los *vehículos atendidos* y el *Uso del Estacionamiento*), también logró el tiempo de búsqueda más alto. En cambio, el escenario que otorga mayor peso a la externalidad ($\alpha = 0.1$) es el que destina más plazas de estacionamiento para automóviles, proporciona menos uso a la infraestructura, sirve a un menor número de usuarios y genera menos externalidad. Lo anterior sugiere que enfocarse principalmente en reducir la externalidad no es una buena política.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Tabla 24 Resultado del modelo NS – Efecto de la selección de los objetivos de planificación.

α	Vehículos Servidos		Periodos Servidos		Vehículos Buscando		Periodos Buscando		Estacionamientos Asignados		Función Objetivo		
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	VS ¹ + UE ²	BE ³	NS ⁴
0.1	5	39	16	199	4	29	4	68	2	22	0.615	0.414	-0.311
0.3	6	38	20	208	3	28	3	70	3	21	0.656	0.418	-0.096
0.5	9	38	26	199	0	31	0	81	6	18	0.735	0.458	0.138
0.7	9	42	26	221	1	30	1	84	5	19	0.784	0.483	0.404
0.9	9	41	26	223	2	31	2	88	5	19	0.782	0.513	0.653

C=Camión, A=Automóvil, Vehículos Servidos¹, Uso del Estacionamiento², Búsqueda de Estacionamiento³, Nivel de Servicio⁴,
 $\theta = 1.3, \gamma = 0.5$

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 25 muestra el porcentaje de variación de los diferentes indicadores tomando el escenario cuando $\alpha = 0.5$ como línea de base. Cuando $\alpha > 0.5$ los estacionamientos permiten atender a todos los usuarios de camiones. Sin embargo, en estos escenarios, el número de estacionamientos para camiones disminuyó en una unidad en comparación con la asignación de estacionamiento cuando alfa es igual a 0.5. Estos escenarios implican períodos de búsqueda más largos que el escenario de referencia para todos los usuarios. Sin embargo, como se mencionó anteriormente también implican valores de NS neto mayores.

En cambio, en escenarios donde $\alpha < 0.5$, el número de estacionamientos asignados a los camiones disminuye en 3 o 4 unidades. Lo anterior disminuye hasta en un 38% el número de periodos atendidos a los camiones, lo que corresponde a no atender hasta el 44% de ellos. Si bien la situación de los automóviles mejora al compararla con el escenario base y la externalidad disminuye, el uso total de todos los estacionamientos asignados y el número de usuarios servidos disminuye cuando $\alpha < 0.5$.

Tabla 25 Porcentaje de variación - Efecto de la selección de los objetivos de planificación. Valor de referencia: $\alpha = 0.5$.

α	Vehículos Servidos		Periodos Servidos		Vehículos Buscando		Periodos Buscando		Estacionamientos Asignados		Función Objetivo		
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	VS ¹ + UE ²	BE ³	NS ⁴
0.1	-44	3	-38	0	400	-6	400	-16	-67	22	-16	-10	-325
0.3	-33	0	-23	5	300	-10	300	-14	-50	17	-11	-9	-169
0.7	0	11	0	11	100	-3	100	4	-17	6	7	5	192
0.9	0	8	0	12	200	0	200	9	-17	6	6	12	372

C=Camión, A=Automóvil, Vehículos Servidos¹, Uso del Estacionamiento², Búsqueda de Estacionamiento³, Nivel de Servicio⁴,
 $\theta = 1.3, \gamma = 0.5$

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Maximización del bienestar social

Los modelos de optimización con la función objetivo BS fueron ejecutados con las restricciones de las ecuaciones 25 a la 41 presentados en el apartado 3.2.2.2. Para mostrar los resultados de la optimización a lo largo del capítulo, se presentarán tablas que muestran las elecciones de los usuarios, la asignación del modelo y los resultados de la función objetivo. En las elecciones se muestran los usuarios de camión y automóvil que utilizan los estacionamientos asignados (E), los usuarios de camión que eligen estacionar ilegalmente (I) y los usuarios que deciden no estacionar en la zona (NE). En la asignación se mostrarán los periodos servidos, los periodos de circulación y el número de estacionamiento asignados para cada tipo de usuario. Finalmente, para analizar los resultados de la función objetivos se mostrarán los términos del *Excedente del Productor (EP)*, el *Excedente del Consumidor (EC)* y las *Externalidades por circulación (E. Circ)*. Además, se mostrarán las *Externalidades por congestión (E. Cong)* de los usuarios de vehículo de carga que deciden estacionar ilegalmente y el valor neto del *Bienestar Social* del sistema (BS). Tener en cuenta que las unidades de la función objetivo presentadas se expresan en miles de pesos (COP/1000).

Para analizar la función BS, se consideró un escenario base en el que no existen tarifas asociadas al uso del estacionamiento para ninguno de los usuarios. Además, si se estaciona ilegalmente la probabilidad de multa es 1 y el flujo vehicular en la zona es alto. La Tabla 26 muestra los resultados del escenario base. En general, el modelo asignó dos estacionamientos para camiones en los que se atendieron 6 usuarios y 22 estacionamientos para automóvil en los que se atendieron 38 usuarios. Además, 3 usuarios de camión optaron por estacionar ilegalmente y los 17 automóviles restantes no estacionaron en la zona. Con respecto a la utilización de los estacionamientos asignados a camión, en promedio cada uno se utilizó durante 8 periodos, mientras que los estacionamientos asignados a automóviles en promedio la ocupación fue de 8.8 periodos. Además, el número de periodos de circulación de automóviles es 69 comparado con cero periodos de circulación de camiones.

Por otra parte, se observa que la función objetivo BS toma un valor negativo. Lo anterior se debe a que el excedente de productor es cero debido a que no hay ingresos por tarifas y el excedente del consumidor de ambos usuarios es muy bajo al compararlo con los valores de las externalidades.

Al observar los valores de las externalidades, se obtiene que existe una externalidad por congestión mientras que la externalidad por circulación de vehículos de carga es cero. Lo anterior refleja el comportamiento usual de estos usuarios, quienes prefieren estacionar ilegalmente antes que circular o abandonar la zona y no realizar sus entregas. El valor total de la externalidad por circulación de vehículos de pasajeros es mucho mayor que la externalidad por congestión debido al estacionamiento ilegal de vehículos de carga. Lo anterior puede estar asociado a las condiciones de la oferta y la demanda del escenario modelado y las preferencias de los usuarios. En este caso, la demanda es mayor que la oferta, lo que genera un gran número de vehículos no servidos que en el caso de los usuarios de vehículos de pasajero circularan en búsqueda de estacionamiento antes de abandonar la zona. En el caso base, se tienen 69 periodos de circulación de automóviles con un costo de la externalidad de 7.650 COP/periodo y 6 periodos de estacionamiento ilegal de vehículos de carga con un costo de externalidad de 4.760 COP/periodo. Finalmente, hay que recordar que el costo de la externalidad por congestión considera el

retraso a otros usuarios que puede generar un vehículo de carga en la vía al estacionar ilegalmente, mientras que el costo de la externalidad por circulación considera la siniestralidad, la congestión, la polución, el ruido y el cambio climático que genera un vehículo en busca de estacionamientos a todos los usuarios de la zona.

Del escenario base, concluimos que el promedio de utilización de los estacionamientos asignados a camión es más bajo que el promedio de utilización de las plazas asignadas a los automóviles. Además, no existe costo de externalidad por circulación de camiones ya que estos usuarios prefieren estacionar ilegalmente. Por otra parte, el valor de BS es negativo lo que implica que los costos por externalidades son mayores a los beneficios percibidos por los usuarios y por el proveedor del servicio. Finalmente, el costo total de la externalidad por circulación es mucho mayor que el costo total de la externalidad por congestión causada por el estacionamiento ilegal de los camiones.

Tabla 26 Resultados del modelo BS – Escenario base.

<i>Tarifa Camión = 0 COP; Tarifa Automóvil =0 COP; Prob. Multa =1; Flujo Vehicular =Alto.</i>																
Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo						
E ¹	I ²	NE ³		Periodos Servidos		Periodos Circulando		Estacionamientos Asignados		EP ⁴	EC ⁵		E. Circ ⁶		E. Cong ⁷	BS ⁸
C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	C	Total
6	38	3	17	16	194	0	69	2	22	0.0	4.3	5.3	0.0	527.9	28.6	-546.8

C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, Excedente del Productor⁴, Excedente del Consumidor⁵, Externalidad por circulación⁶, Externalidad por congestión⁷, Bienestar Social⁸.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1 Evaluación del modelo

En esta sección se analizarán diferentes escenarios con el fin de conocer el comportamiento de la función BS como herramienta de planificación. El análisis incluirá el efecto del flujo vehicular, el efecto de las tarifas, el efecto del cambio en la demanda, y el efecto del valor esperado de la multa.

Efecto del flujo vehicular

El impacto de la actividad de estacionar puede variar según el nivel de flujo vehicular en el periodo de planificación, en especial por las demoras que experimentan los usuarios que son afectados por la presencia de un vehículo de carga estacionado ilegalmente. En el proceso de planificación de estacionamientos es útil evaluar el BS al asignar determinadas plazas de estacionamiento considerando variaciones de flujo, que pueden darse en horas del día, entre días de la semana, o entre estaciones del año.

La Tabla 27 muestra los resultados del modelo para tres niveles de flujo vehicular: alto, medio y bajo conservando los demás parámetros en las condiciones del escenario base (es decir, Tarifa Camión = 0 COP; Tarifa Automóvil =0 COP; Prob. Multa =1). Al comparar los escenarios de flujo alto y medio se observa que,

en ambos escenarios, se asignan dos estacionamientos para camión que se utilizaron por 16 periodos. Sin embargo, existen diferencias en la ubicación de los estacionamientos y el número de usuarios que se atendieron. En el primer escenario, con flujo vehicular alto se atendieron 6 camiones y 38 automóviles en los estacionamientos asignados y tres usuarios de camión optaron por estacionar ilegalmente. Por otra parte, en el segundo escenario con flujo vehicular medio, se atendieron 5 camiones y 39 automóviles y 4 camiones optaron por estacionar ilegalmente. Es decir, cuando el nivel de flujo es medio se atendió un usuario más de automóvil aumentando en 5 el número de periodos de servicio y se atendió un usuario menos de camión que optó por estacionarse ilegalmente.

Las implicaciones de ese cambio en la asignación entre ambos escenarios se analizarán considerando el efecto en los términos que conforman la función BS que en general es mejor para el escenario con flujo vehicular medio. Primeramente, debido a que no existe un cobro por el servicio, el excedente del productor es cero. Segundo, el cambio en la asignación implicó una disminución del excedente del consumidor para camión y un aumento para automóvil cuando el nivel de flujo vehicular es medio. Sin embargo, el efecto en BS de esta variación entre ambos escenarios es bajo comparado con el aporte de las externalidades. Tercero, el cambio en la asignación implicó una disminución de 3 periodos en la circulación de automóviles, lo que representó una disminución en la externalidad por circulación aportando una reducción en el valor neto de BS de 23.000 COP. Finalmente, cuando el flujo vehicular es medio, en la asignación hay un usuario más que decide estacionar ilegalmente. Este usuario adicional implica un aumento de 4 periodos adicionales de congestión. No obstante, la externalidad por congestión disminuyó en \$3.400 COP en el escenario con flujo vehicular medio debido a que el número de usuarios afectados por el camión adicional estacionado ilegalmente es menor que en el escenario con flujo vehicular alto.

En el caso del flujo vehicular bajo, la asignación corresponde a cero estacionamientos para camión. Aquí todos los camiones deciden estacionar ilegalmente. Es decir, se atiende 40 automóviles en las plazas asignadas y 15 dejaron de ser atendidos. Comparado con las otras condiciones de flujo se atiende a un mayor número de usuarios de automóviles aumentando el número de periodos de servicio. También, existe una reducción en el excedente del consumidor de los camiones y un leve aumento en el excedente del consumidor de los automóviles. En cuanto a las externalidades tanto por circulación como por congestión es mucho menor y el valor neto del BS es el mejor.

Cabe resaltar que, aunque el efecto del flujo vehicular en los costos de externalidad por congestión es intuitivo debido a la diferencia en el número de usuarios afectados, los resultados muestran que cuando el modelo cambia la ubicación de las plazas asignadas, se reduce la externalidad por circulación de automóviles y es lo que aporta la mejora en el valor neto de BS.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Tabla 27 Resultados del modelo BS – Efecto del flujo vehicular.

Tarifa Camión = 0 COP; Tarifa Automóvil =0 COP; Prob. Multa =1																		
Flujo Vehicular	Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo							
	E ¹		I ²	NE ³	Periodos Servidos		Periodos Circulando		Estacionamientos Asignados		EP ⁴	EC ⁵		E. Circ ⁶		E. Cong ⁷	BS ⁸	
	C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	C	Total	
Alto	6	38	3	17	16	194	0	69	2	22	0.0	4.3	5.3	0.0	527.9	28.6	-546.8	
Medio	5	39	4	16	16	199	0	66	2	22	0.0	3.6	5.5	0.0	504.9	25.2	-521.0	
Bajo	0	40	9	15	0	204	0	65	0	24	0.0	0.3	5.7	0.0	497.3	21.8	-513.1	

C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, Excedente del Productor⁴, Excedente del Consumidor⁵, Externalidad por circulación⁶, Externalidad por congestión⁷, Bienestar Social⁸.

Fuente: Elaboración propia.

Efecto de las tarifas

La tarifa es una de las principales formas de gestionar los estacionamientos ya que tienen un efecto directo en la demanda (ver discusión apartado 2.1.2). Aunque el objetivo de este trabajo no estimar el valor óptimo de las tarifas de estacionamiento para cada uno de los usuarios, si se pretende mostrar el efecto de la variación de estas en la asignación de estacionamientos cuando se quiere maximizar el BS. Para ello, se establecieron tres variaciones de la tarifa para cada uno de los usuarios. En el caso de los camiones se consideraron tarifas por periodo de 0, 100 y 200 COP. Asimismo, para los usuarios de automóvil se consideraron tarifas por periodo de 0, 250 y 500 COP. A continuación, se mostrarán dos análisis. El primero mostrará el efecto de variar las tarifas estacionamiento para usuarios de automóvil fijando las tarifas de camión en 0 COP. El segundo análisis, corresponde a variaciones de la tarifa de usuarios de camión fijando las tarifas de automóviles en 500 COP por periodo.

La Tabla 28 muestra el efecto de variar las tarifas estacionamiento para usuarios de automóvil fijando las tarifas de camión en 0 COP. En todos los casos el modelo asignó dos estacionamientos para camiones que se utilizaron por 16 periodos. En general, el mejor valor neto de BS es cuando la tarifa de automóvil es igual a 500 COP cada periodo, esto se debe principalmente por el aumento de los beneficios percibidos por el prestador del servicio (Excedente del productor).

Las asignaciones en los tres escenarios son diferentes. Comparando los escenarios con tarifa por periodo de 250 y 500 COP para automóviles, tenemos que la asignación de estacionamientos de vehículo de carga para el primer escenario son las plazas P8 y P22 y para el segundo escenario son las plazas P6 y P22. En nuestro caso de aplicación, P6 y P8 son estacionamientos que se encuentra a 10 metros aproximadamente de separación entre ellos. En la práctica, es posible que los usuarios no perciban la diferencia entre ambos estacionamientos (el cambio en el excedente del consumidor de todos los individuos es 900 COP) y, por tanto, podríamos considerar que ambas asignaciones son iguales y BS aumenta solo debido al aumento de PS.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Por otro lado, comparando los escenarios con tarifa por periodo de 0 y 250 COP para automóviles, tenemos que la ubicación de los dos estacionamientos asignados a camión conlleva a que cuando la tarifa es 250 COP un vehículo de carga deje de estacionarse y un automóvil más pueda ser atendido. En cuanto a los periodos de servicio tenemos igual número de periodos atendidos para camión, un aumento de 23 periodos atendidos para automóvil y una reducción de 3 periodos de circulación de automóvil. Interesantemente, el excedente del consumidor de ambos usuarios disminuye. Para los usuarios de camión es claro que la disminución de los beneficios percibidos es menor porque hay un usuario que se deja de atender y optará por estacionar ilegalmente. En cambio, a pesar de que se atiende un usuario más de automóvil el valor del excedente del consumidor disminuye. Esto se explica porque el modelo aumenta la utilización de los estacionamientos sirviendo un número mayor de periodos, al tiempo que empeora los beneficios percibidos por los usuarios por ejemplo asignando estacionamientos más alejados. Al final, el modelo logra compensar las pérdidas en el excedente del consumidor y el aumento de la externalidad por congestión disminuyendo la externalidad por circulación y aumentando los beneficios percibidos por el prestador del servicio, logrando una mejora en el BS neto.

En conclusión, los escenarios analizados muestran que al aumentar las tarifas de automóvil (hasta 500 COP por periodo) cuando los usuarios de carga estacionan gratuitamente, el BS neto aumenta debido al aumento en el excedente del productor. Sin embargo, lo anterior no implica que el modelo priorice a los usuarios de automóvil asignando un mayor número de plazas, sino que las ubica de tal manera que pueda aumentar la utilización de las plazas y disminuir la externalidad por congestión, aunque esto implique disminuir el beneficio percibido por los usuarios.

Tabla 28 Resultados del modelo BS – Efecto de la tarifa de automóviles.

<i>Tarifa Camión = 0 COP; Prob. Multa =1; Flujo Vehicular =Alto.</i>																
Tarifa	Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo					
	E ¹	I ²	NE ³		Periodos Servidos	Periodos Circulando	Estacionamientos Asignados				EP ⁴	EC ⁵	E. Circ ⁶	E. Cong ⁷	BS ⁸	
A	C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	Total
0	6	38	3	17	16	194	0	69	2	22	0.0	4.3	5.3	0.0	527.9	28.6
250	5	39	4	16	16	217	0	66	2	22	54.3	3.6	4.5	0.0	504.9	47.6
500	5	39	4	16	16	214	0	66	2	22	107.0	3.6	3.6	0.0	504.9	47.6

C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, Excedente del Productor⁴, Excedente del Consumidor⁵, Externalidad por circulación⁶, Externalidad por congestión⁷, Bienestar Social⁸.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 29 muestra el efecto de variar la tarifa de usuarios de camión fijando la tarifa de automóvil en 500 COP por periodo. El modelo asignó 2 estacionamientos para camión con una utilización total de 16 periodos cuando la tarifa por periodo para camión es 0 y 100 COP y cero estacionamientos a camión cuando la tarifa es 200 COP por periodo. Contrario a lo que se podría esperar, a medida que aumenta la tarifa de camión disminuye el valor neto de BS, de tal manera que, el mejor valor del BS es cuando la tarifa

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

de camión es 0 COP. De manera específica al comparar los escenarios de Tarifa 0 y 100 COP por periodo se observa que en el escenario base (tarifa = 0 COP) el valor de la externalidad por congestión es igual, el valor de la externalidad por circulación es menor, el excedente del productor es mayor, y hay un mayor beneficio percibido para ambos usuarios. Asimismo, al comparar los escenarios de tarifa 0 y 200 COP por periodo se observa que en el escenario base, el valor de la externalidad por congestión es menor, el valor de la externalidad por circulación aumenta, la suma del excedente del consumidor de ambos usuarios es mayor y el excedente del productor es menor. Los resultados sugieren que aumentar la tarifa de camión disminuye el valor neto de BS cuando los usuarios de automóvil tienen una tarifa por periodo asignada por encima de 500 COP (también se comprobó el mismo resultado para el caso de tarifa de 250 COP por periodo). Lo anterior puede deberse a que la asignación logra costos totales de externalidad (por circulación y congestión) más bajos y excedentes del consumidor de ambos usuarios más altos.

Tabla 29 Resultados del modelo BS – Efecto de la tarifa de camión.

<i>Tarifa Automóvil = 500 COP; Prob. Multa =1; Flujo Vehicular =Alto.</i>																
Tarifa	Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo					
	E ¹	I ²	NE ³		Periodos Servidos	Periodos Circulando	Estacionamientos Asignados				EP ⁴	EC ⁵	E. Circ ⁶	E. Cong ⁷	BS ⁸	
C	C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	Total
0	5	39	4	16	16	214	0	66	2	22	107.0	3.6	3.6	0.0	504.9	-438.3
100	5	37	4	18	16	203	0	68	2	22	101.5	1.3	3.4	0.0	520.2	-460.1
200	0	41	9	14	0	222	0	62	0	24	111.0	0.3	3.7	0.0	474.3	-483.0

C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, Excedente del Productor⁴, Excedente del Consumidor⁵, Externalidad por circulación⁶, Externalidad por congestión⁷, Bienestar Social⁸.

Fuente: Elaboración propia.

Efecto del cambio en la demanda - Aumento de vehículos de carga

La demanda de usuarios que llegan a una zona puede variar a lo largo del día, de acuerdo con el día de la semana o por temporadas en el año. Cuando esas variaciones son identificadas es posible ofrecer una mejor planificación de las plazas de estacionamiento ofertadas. Con el fin de conocer el comportamiento del modelo propuesto ante una variación de la demanda, se realizó una modificación del caso de aplicación. Para ello, se seleccionó aleatoriamente 11 de los usuarios de automóvil para ser reemplazados por vehículos de carga, conservando su periodo de llegada a la zona y modificando los parámetros como duración, distancia máxima de caminata y periodo máximo de circulación. En resumen, el nuevo escenario son 64 usuarios de los cuales 20 son camiones, 15 periodos y 24 plazas de estacionamiento.

La Tabla 30 muestra los resultados del escenario base y el nuevo escenario propuesto. La asignación del nuevo escenario es 7 plazas para camión, utilizada por 16 usuarios durante 48 periodos y 17 plazas asignadas a automóvil, utilizadas por 33 usuarios durante 163 periodos. Un total de 4 usuarios de camión decidieron estacionar ilegalmente y 11 usuarios de automóvil quedaron sin ser atendidos.

Al comparar los escenarios se observa que debido al aumento del número de usuarios de camión el modelo asigna un mayor número de plazas a estos usuarios y disminuye las disponibles para los usuarios de automóvil. En la asignación del nuevo escenario, la tasa de utilización promedio de las plazas de camión es menor, pasando de 8 periodos de uso en el escenario base a 6.8 en el nuevo escenario. Al mismo tiempo, la tasa de utilización de las plazas de automóvil aumenta en el nuevo escenario pasando de 8.8 a 9.6 periodos. Por otra parte, el valor neto de BS es mejor cuando hay una mayor demanda de camiones debido a que los beneficios totales percibido por los usuarios aumentan y las externalidades totales disminuyen. En este punto es importante mencionar que las externalidades siguen predominando en el valor del BS, en especial la externalidad por circulación. En los escenarios mostrados, el número de periodos de circulación de automóviles se reducen en 20 periodos para el caso con mayor número de camiones, de tal manera que, aunque hay un aumento en la externalidad por congestión del doble del valor que en el caso base, el total de la externalidad sigue siendo mucho menor.

Tabla 30 Resultados del modelo BS – Efecto de aumentar los vehículos de carga.

Prob. Multa =1; Flujo Vehicular =Alto																		
		Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo						
		E ¹		I ²	NE ³	Periodos Servidos		Periodos Circulando		Estacionamientos Asignados		EP ⁴	EC ⁵		E. Circ ⁶		E. Cong ⁷	BS ⁸
Demanda		C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	C	Total
A	C	C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	C	Total
55	9	6	38	3	17	16	194	0	69	2	22	0.0	4.3	5.3	0.0	527.9	28.6	-546.8
44	20	16	33	4	11	48	163	0	49	7	17	0.0	11.3	4.7	0.0	374.9	47.6	-406.5

C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, Excedente del Productor⁴, Excedente del Consumidor⁵, Externalidad por circulación⁶, Externalidad por congestión⁷, Bienestar Social⁸.

Fuente: Elaboración propia.

Efecto del valor esperado de la multa

El valor esperado de la multa para los usuarios de camión es uno de los atributos de importancia al momento de elegir su lugar de estacionamiento, de tal manera que a medida que aumenta su valor, es menos probable decidan estacionar ilegalmente (apartado 2.1.4). Además, el tema de las multas ha sido crítico en el ámbito del transporte de mercancía tanto que en ocasiones estos valores hacen parte de los costos asociados a esta labor (Figliozzi & Tipagornwong, 2017; Haider et al., 2009; Nourinejad et al., 2014). Disponer de políticas que ayuden a mejorar las condiciones de su entorno, tal como establecer los costos de la multa y establecer el control de las áreas de estacionamiento para evitar el estacionamiento ilegal está dentro de las funciones de los tomadores de decisión. Por tanto, se debe analizar su efecto en el proceso de planificación con la función BS.

Para analizar el efecto del valor esperado de la multa en la asignación de plazas de estacionamiento se hace una comparación entre el escenario base y dos escenarios adicionales. El primero, reduciendo la

probabilidad de multa al 50% y el segundo aumentando el costo de la multa en un 20%. La Tabla 31 muestra los resultados del modelo ante variaciones en el valor esperado de la multa.

En el primer caso, cuando la probabilidad de multa es del 50%, el número de usuarios que eligen estacionarse en una plaza, los que deciden no estacionar y los que deciden estacionar ilegalmente, son iguales que en el escenario base. Además, el valor neto de BS es muy similar al caso base. Sin embargo, los usuarios servidos, el número de plazas y la ubicación de las plazas asignadas son diferentes. En particular, cuando la probabilidad de multa se reduce al 50%, el número de plazas asignadas a camión aumenta en una unidad. La asignación adicional de una plaza de camión aumenta el número de periodos servidos y reduce la tasa de utilización promedio de todas las plazas. Por otra parte, el beneficio percibido por ambos usuarios es ligeramente mayor para ambos usuarios y los costos de externalidad son iguales.

Este escenario nos muestra que, al reducir la probabilidad de multa, el modelo cambia la asignación adicionando una plaza para camión, manteniendo los costos de las externalidades. El cambio en la asignación conlleva a que los beneficios percibidos por las elecciones de los usuarios aumenten ligeramente. Es decir que, para el caso de aplicación, disminuir el control del estacionamiento ilegal no tiene mayor efecto en el valor neto de BS.

En el segundo caso, cuando se aumenta un 20% el costo de la multa, la asignación reduce en una unidad el número de estacionamiento asignados a camión, reduciendo a su vez el número de usuarios de camión atendidos y aumentando el número de usuarios de automóvil atendidos. A diferencia de los casos discutidos hasta el momento, los usuarios de camión que no son atendidos, no se estacionan ilegalmente, sino que abandonan la zona luego de intentar buscar una alternativa de estacionamiento. Lo anterior aumenta el costo de externalidad por circulación de camiones y elimina el costo por congestión. Tal como se ha mencionado anteriormente, el costo de circulación tiene un gran impacto en el valor neto de BS. En esta ocasión, dado que la asignación elimina el costo de externalidad por congestión y reduce el número de periodos de búsqueda de los usuarios de automóviles el valor total de las externalidades es menor al compararlo con el escenario base. De tal manera que, aumentar en un 20% el valor de la multa genera un mejor valor neto de BS al reducir el costo total de la externalidad.

Lo interesante de este caso analizado es que demuestra que con un aumento del 20% del valor de la multa, estacionar ilegalmente ya no es una alternativa para los usuarios de camión, eliminando los costos de externalidad por congestión del sistema. Si las alternativas de plazas de estacionamiento no son lo suficientemente atractivas para los usuarios de camión, estos van a preferir buscar otras opciones generando externalidad por circulación y en ultimas abandonar la zona sin ser servidos. Los resultados muestran que este comportamiento en los usuarios de camión mejora el valor de BS neto ya que las externalidades totales del sistema se reducen. Sin embargo, esta decisión de los usuarios de camión perjudica las operaciones de la logística de carga de la zona que en ultimas no están siendo considerados en el modelo de asignación. Una alternativa para evitar esta situación es creando políticas que obliguen a los camiones a realizar sus operaciones en horarios de baja demanda.

Tabla 31 Resultados del modelo BS – Efecto del valor esperado de la multa.

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Prob. Multa =1; Flujo Vehicular =Alto																				
Valor esperado de multa		Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo								
		E ¹		I ²		NE ³		Periodos Servidos		Periodos Circulando		Estacionam ientos Asignados		EP ⁴		EC ⁵		E. Circ ⁶		E. Cong 7
Prb	Inc	C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A	Total	C	A	C	A	C	A	C	Total
1	0	6	38	3	17	16	194	0	69	2	22	0.0	4.3	5.3	0.0	527.9	28.6			-546.8
0.5	0	6	38	3	17	20	192	0	69	3	21	0.0	4.9	5.4	0.0	527.9	28.6			-546.2
1	20	3	40	0	21	7	212	6	63	1	23	0.0	2.1	5.6	52.5	482.0	0.0			-526.8

Prb= Probabilidad de ser multado, Inc= Incremento del costo de la multa, C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, Excedente del Productor⁴, Excedente del Consumidor⁵, Externalidad por circulación⁶, Externalidad por congestión⁷, Bienestar Social⁸.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Comparación de enfoques NS y BS

Con el propósito de comparar los dos enfoques propuestos NS y BS, se planteó el modelo NS-ED que integra el concepto de la función NS₂ (ecuación 9) y las restricciones del modelo BS (ecuaciones de la 25 a la 41). De tal manera que NS-ED tendrá como objetivo maximizar el nivel de servicio involucrando el modelo de elección discreta en el proceso de optimización. La función NS, fue modificada para incluir un término relacionado a la congestión por el estacionamiento ilegal de los camiones, de tal manera que se pudiera comparar con el modelo BS. Este término no pudo ser incluido en la función NS₂ debido a que no se consideraban las elecciones de los usuarios. El concepto de NS quedó definido como se muestra a continuación:

Maximizar:

$$\text{Nivel de Servicio (NS)} = \left[\begin{array}{c} \text{Vehiculos} \\ \text{Servidos} \\ \text{(VS)} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Uso del} \\ \text{Estacionamientos} \\ \text{(UE)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Búsqueda de} \\ \text{Estacionamiento} \\ \text{(BE)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Estacionamiento} \\ \text{Ilegal} \\ \text{(EI)} \end{array} \right] \quad \text{Ec. 60}$$

El nuevo término *Estacionamiento Ilegal (EI)* está definido como el porcentaje de periodos de vehículos de carga mal estacionados. La notación utilizada en la formulación corresponde a la presentada en el apartado 3.2.2.1 de tal manera que la función NS-ED se define como:

$$NS - ED = \left[\frac{\sum_{i'} \sum_l W_{i'l}}{2 * J} + \frac{\sum_{i''} \sum_l W_{i''l}}{2 * K} \right] + \left[\frac{\sum_i \sum_l \sum_t Y_{ilt}}{L * T} \right] - \left[\frac{(\sum_{i'} Inicio_{i'} - Llegada_{i'}) + (J - \sum_{i'} \sum_l W_{i'l}) * MCirc_p + \theta * (\sum_{i''} Inicio_{i''} - Llegada_{i''}) + (K - \sum_{i''} \sum_l W_{i''l}) * MCirc_c}{J * MCirc_p + \theta * K * MCirc_c} \right] \quad \text{Ec. 61}$$

$$- \left[\frac{\sum_{i''} W_{i''l=E_{J+2}} * Duracion_{i''}}{\sum_{i''} Duracion_{i''}} \right]$$

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE ESTACIONAMIENTOS EN VÍA CONSIDERANDO COMPETENCIA ENTRE
VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.

Para mostrar los resultados de la comparación de ambos modelos se calcularon los indicadores utilizados en los apartados 5.2.1 y 5.2.2. El modelo NS-ED fue ejecutado considerando el parámetro $\theta=1.14$ que corresponde a la relación entre los costos de la externalidad por circulación considerados en el modelo BS. Además, la comparación se realizará con el escenario base presentado anteriormente en la Tabla 26.

La Tabla 32 presenta los resultados del modelo BS base y el modelo NS-ED. Los resultados muestran una asignación diferente entre ambos modelos. Tal como se reportó anteriormente, en el caso del modelo BS la asignación corresponde a 2 plazas para camiones utilizadas por un total de 16 periodos y 22 plazas asignadas a automóvil utilizadas 194 periodos. En promedio la tasa de utilización de las plazas de camión es 8 periodos y para la plaza de automóvil es de 8.8 periodos. En este modelo, 6 usuarios de camión y 38 usuarios de automóvil fueron servidos, 3 camiones optaron por el estacionamiento ilegal y 17 automóviles no fueron servidos. Además, la asignación provocó un total de 69 periodos de circulación de automóviles.

En el caso del modelo NS-ED la asignación corresponde a 6 plazas para camión utilizadas por un total de 26 periodos y 18 plazas para automóvil utilizadas 203 periodos. La tasa de utilización promedio de las plazas de camión es 4.3 mientras que la tasa de utilización de las plazas asignadas para automóvil es 11.3. En la asignación un total de 9 camiones y 40 automóviles fueron atendidos en los estacionamientos, 15 automóviles se quedaron sin ser servidos y ningún usuario de camión optó por el estacionamiento ilegal. Adicionalmente, en la asignación se obtuvo un periodo de circulación para camión y 85 periodos de circulación para automóviles.

Al comparar ambos modelos, NS-ED tiene un índice de vehículos servidos (VS), uso de estacionamiento (UE) y estacionamiento ilegal (EI) mejor que el modelo BS. Mientras que el modelo BS tiene un mejor índice de Búsqueda de estacionamiento (BE) que NS-ED. Lo anterior, conlleva a que el modelo NS-ED tenga un mejor índice neto de NS. Sin embargo, al comparar los modelos en relación con los indicadores de la función objetivo BS, tenemos que NS-ED tiene un peor valor neto de BS. Esto se debe principalmente a que NS-ED tiene un costo mayor de Externalidades por circulación (E. Circ) que BS. Pese a lo anterior, NS-ED tiene un mejor valor de excedente del consumidor (EC) pero menor costo por Externalidades por congestión (E. Cong) que el modelo BS.

Tabla 32 Resultados del modelo BS y modelo NS-ED

	Elección de los usuarios				Asignación						Función Objetivo NS					Función Objetivo BS				
Enfoque	E ¹		I ²	NE ³	Periodos Servidos		Periodos Circulando		Estacionamientos Asignados		VS ⁴	UE ⁵	BE ⁶	EI ⁷	NS ⁸	EP ⁹	EC ¹⁰	E. Circ ¹¹	E. Cong ¹²	BS ¹³
	C	A	C	Total	C	A	C	A	C	A										
BS	6	38	3	17	16	194	0	69	2	22	0.68	0.58	0.39	0.23	0.52	0.0	9.7	527.9	28.6	-546.8
NS-ED	9	40	0	15	26	203	1	85	6	18	0.86	0.64	0.49	0.00	1.01	0.0	11.8	659.0	0.0	-647.2

C=Camión, A= Automóvil, En Estacionamiento¹, Ilegal², No Estacionan³, vehículos Servidos⁴, Uso de Estacionamientos⁵, Búsqueda Estacionamiento⁶, Estacionamiento Ilegal⁷, Nivel de Servicio⁸, Excedente del Productor⁹, Excedente del Consumidor¹⁰, Externalidad por circulación¹¹, Externalidad por congestión¹², Bienestar Social¹³.

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados muestran que NS-ED asigna las plazas de estacionamiento que inducen a la prestación de un mejor servicio viéndolo desde la perspectiva del proveedor del servicio al maximizar la utilización de las plazas disponibles y de los usuarios que utilizan los estacionamientos al maximizar el número de usuarios servidos e incluso evitando el estacionamiento ilegal.

Sin embargo, el enfoque NS (modelo NS y NS-ED) deja de lado la reducción de la principal externalidad del sistema, que tal como se ha demostrado en los resultados del modelo BS (apartado 5.2.2) es la circulación de vehículos que buscan un lugar para estacionar. Además, el enfoque NS, no tiene en cuenta las condiciones de flujo vehicular en el proceso de asignación. Aunque en el caso de aplicación no tendría influencia directa ya que ningún vehículo de carga optó por el estacionamiento ilegal, en el capítulo anterior se demostró que el nivel de flujo vehicular puede tener un efecto en la asignación que conlleva a mejorar indirectamente el costo de externalidad por circulación y mejorar el BS neto.

Escoger el enfoque de planificación estratégica de estacionamiento dependerá de los objetivos del tomador de decisión. Por ejemplo, para periodos de hora punta, se podría pensar en utilizar el modelo NS-ED si se quiere maximizar el servicio a los usuarios y sacar el máximo provecho de la infraestructura disponible, penalizando la pérdida de bienestar del sistema. O se podría utilizar el enfoque BS, que tendrá en cuenta el efecto del flujo vehicular y la asignación dependerá de la influencia de las externalidades.

Por otra parte, la ventaja de los modelos NS-ED y BS comparado con el modelo NS es que consideran las preferencias de los usuarios en la asignación entregada por el modelo. Lo anterior, permite tener una asignación que reduzca o por lo menos que tenga en cuenta el estacionamiento ilegal de los usuarios de camión. Esto implica que los modelos NS-ED y BS serán recomendados en los casos donde los usuarios tengan otras alternativas diferentes a estacionar y no estacionar, ya que, el modelo podrá evaluar el efecto de todas las alternativas de los usuarios en el sistema. Adicionalmente, el enfoque BS permite obtener la tarifa óptima del sistema y la evaluación económica de diversas políticas de estacionamiento.

En conclusión, si el nivel de flujo vehicular es bajo y los costos por congestión y otras externalidades pueden no ser significativos, quizás los modelos NS y NS-ED sea adecuado. Además, se podría utilizar el modelo NS si se quiere una herramienta efectiva cuando la información de las preferencias de los usuarios no está disponible. En los casos en que los usuarios del sistema tienen múltiples alternativas, se quiera involucrar a todos los actores del sistema, se tenga un nivel de flujo vehicular alto, un mayor nivel de congestión y externalidades, el enfoque BS ofrecerá mayores ventajas. Finalmente, si se tiene información de las preferencias de los usuarios se recomienda usar el modelo BS sobre el NS-ED, ya que el modelo BS permite obtener las tarifas óptimas y evaluar políticas de estacionamiento. Independientemente de lo anterior, escoger el enfoque de planificación estratégica de estacionamiento dependerá de los objetivos del tomador de decisión y de los recursos disponibles para hacerlo.

6 Recomendaciones en la planificación de estacionamiento en vía.

De los resultados de la presente investigación se pueden identificar las siguientes recomendaciones para la planificación estratégica de plazas de estacionamientos en vía cuando existe competencia por el espacio entre usuarios de vehículos de carga y pasajeros en ciudades de países en vía de desarrollo.

- En el proceso de planificación de estacionamientos en vía se debe tener en cuenta mínimamente los tres factores principales que definen las elecciones de ambos usuarios: la distancia, el costo y el tiempo de búsqueda. En general, ambos usuarios prefieren estacionamientos cercanos, bajos tiempos de búsqueda y costos reducidos.
- El comportamiento de los usuarios al estacionar influye en la elección del estacionamiento ilegal de los vehículos de carga y en el estacionamiento informal de los vehículos de pasajeros. Por tanto, para reducir la probabilidad de elección de estas alternativas se recomienda implementar campañas de educación vial que conlleven a mejorar el comportamiento de los usuarios. Además, en el caso de los vehículos de carga esta iniciativa se puede complementar con un aumento del valor esperado de la multa.
- Al implementar políticas se debe considerar que el efecto sobre todos los usuarios no es igual ya que la valoración de los atributos varía según el tipo de usuario y según algunas variables socioeconómicas que en cada caso deben ser exploradas.
- Se recomienda considerar a todos los usuarios del espacio urbano, teniendo en cuenta sus requerimientos y preferencias al planificar la oferta de estacionamiento de las ciudades, ya que permite ofrecer un mejor nivel de servicio y cuantifica el verdadero impacto de cada uno de los usuarios.
- El enfoque de planificación estratégica de estacionamiento dependerá de los objetivos del tomador de decisión y de los recursos disponibles para hacerlo. El enfoque NS es recomendado cuando se busque maximizar el servicio a los usuarios y sacar el máximo provecho de la infraestructura disponible, penalizando la pérdida de bienestar del sistema. Por el contrario, el enfoque BS es recomendado cuando se quiera considerar las condiciones de flujo vehicular, el impacto económico de las externalidades, cuantificar económicamente los beneficios del sistema o evaluar económicamente diversas políticas de estacionamientos.
- En escenarios donde los usuarios tienen varias alternativas de estacionamiento se recomienda utilizar el modelo NS-ED o el modelo BS que permitan evaluar los efectos de las preferencias de los usuarios en la asignación. Sin embargo, si se tiene información de las preferencias se recomienda utilizar el modelo BS sobre NS-ED ya que BS aporta muchas más ventajas. En caso de no contar con información de las preferencias el modelo NS es una buena alternativa.
- Si se utiliza el enfoque NS, se debe cuantificar la relación del impacto de la circulación entre ambos usuarios, tomar decisión si se requiere priorizar a un tipo de usuario y seleccionar los objetivos de planificación.

- Para obtener un mayor valor neto de NS es recomendable priorizar la atención de los usuarios y la utilización de la infraestructura sobre la externalidad ocasionada por la búsqueda de estacionamiento.
- Si se desea utilizar el enfoque BS, se deben cuantificar las funciones de utilidad que describen las alternativas disponibles para cada uno de los usuarios, se deben cuantificar los costos de externalidad por congestión y por circulación según corresponda y se deben establecer las tarifas de estacionamiento.
- En la función BS, se debe tener en cuenta que el efecto del flujo vehicular es directo en la externalidad de congestión. Sin embargo, cuando el flujo vehicular disminuye la asignación cambia priorizando la reducción de la externalidad por circulación.
- En escenarios donde la oferta de estacionamientos y la demanda de camiones es baja el modelo BS resultará en costo total de la externalidad por circulación mucho mayor que el coste total de la externalidad por congestión debido al estacionamiento ilegal de los camiones. En estos escenarios, el modelo prioriza la atención de los automóviles sobre los camiones con el fin de maximizar BS. La recomendación en estos casos es implementar políticas que induzcan a los camiones a realizar sus entregas cuando la demanda de estacionamiento de automóvil se menor, por ejemplo, en horarios fuera de punta.
- Si se aumentan las tarifas de estacionamiento para los automóviles cuando los usuarios de vehículos de carga estacionan gratuitamente, no implica que el modelo BS priorice a los automóviles asignando un mayor número de plazas, sino que las ubica de tal manera que pueda aumentar la utilización de las plazas y disminuir la externalidad por congestión, aunque esto implique disminuir el beneficio percibido por los usuarios.
- A medida que aumenta la tarifa de camión disminuye el valor neto de BS, de tal manera que, el mejor valor del BS es cuando la tarifa de camión es 0 COP esto debido principalmente a que los costos totales de externalidad del sistema son más bajos. Lo anterior sucede solo cuando los usuarios de automóvil tienen una tarifa asignada que compensen el efecto de la circulación de los automóviles que no se han servido.
- Al aumentar el valor de la multa por estacionamiento ilegal, de tal manera que ya no es una alternativa para los usuarios de camión, se eliminan los costos de externalidad. Si las alternativas de plazas de estacionamiento no son lo suficientemente atractivas para los usuarios de camión, estos prefieren buscar otras opciones generando externalidad por circulación y en ultimas abandonar la zona sin ser servidos. Al final, este comportamiento en los usuarios de camión mejora el valor de BS neto ya que las externalidades totales del sistema se reducen. Sin embargo, se afectan las operaciones de logística de carga en la zona. En este escenario, se recomienda ofrecer alternativas de estacionamiento lo suficientemente atractivas para los conductores de camión o inducir políticas que obliguen a hacer sus operaciones en horarios de baja demanda.

7 Conclusiones

En esta tesis se han desarrollado modelos matemáticos que permiten la planificación estratégica de estacionamiento en vía para asignar espacios preestablecidos en áreas urbanas, considerando competencia entre dos tipos de usuarios (usuarios de vehículo de carga y pasajeros). Para lograrlo primero se identificaron los principales factores que tienen influencia en el comportamiento de los estacionamientos en vía para ambos usuarios. Para ello, se diseñaron y aplicaron encuestas tomando como caso de aplicación la ciudad de Cartagena, Colombia, que permitieron la estimación de modelos de elección discreta. Específicamente, se estimó un modelo Logit Multinomial (MNL) y un modelo Híbrido de Elección Discreta (HDC) para cada tipo de usuario. A través del modelo MNL se conocieron los principales atributos que rigen la elección de cada uno de los usuarios y se compararon las valoraciones de estos atributos entre ambos usuarios. Por otra parte, a través del modelo HDC se conocieron las variaciones sistemáticas que influyen en la valoración de los atributos que describen las elecciones y se evaluó la influencia de la variable latente *conducta al estacionar* en la probabilidad de elección del estacionamiento informal para el caso de conductores de automóviles y del estacionamiento ilegal en el caso de los conductores de vehículos de carga.

Luego se propusieron dos enfoques de planificación estratégica de plazas de estacionamiento en vía, integrando los principales factores identificados previamente. Ambos enfoques, fueron analizados con datos simulados en un caso de estudio inspirado en la ciudad de Cartagena. Los modelos de optimización matemática del tipo MINLP ofrecieron soluciones factibles de cuáles y cuantos espacios de estacionamiento se deben asignar a cada tipo de usuario.

El primer enfoque propuesto es maximizar el Nivel de Servicio (NS) del sistema, definido por el número de usuarios servidos, el uso de la infraestructura disponible y el efecto de la búsqueda de estacionamiento de los usuarios. Dentro del primer enfoque se compararon dos especificaciones (NS_1 y NS_2) para la función NS. El objetivo de las dos formulaciones fue comparar el efecto en la asignación al diferenciar por tipo de usuario. Luego, se analizó la flexibilidad de la función NS_2 como herramienta de planificación para los tomares de decisión. El análisis incluyó el efecto de la circulación de vehículos, el impacto de la priorización para servir a un tipo de usuario y el efecto de diferentes objetivos de planificación.

El segundo enfoque propuesto es la maximización del Bienestar Social (BS), definido por el excedente del productor, el excedente del consumidor y las externalidades por circulación de vehículos en búsqueda de estacionamientos y la congestión por el estacionamiento ilegal de los vehículos de carga. Con la función BS se analizaron diferentes escenarios para conocer el efecto del flujo vehicular, las tarifas, la demanda y el valor esperado de la multa.

Seguidamente, para comparar los dos enfoques propuestos se planteó el modelo NS-ED que integra el concepto de NS y las restricciones del modelo BS. Por tanto, NS-ED tuvo como objetivo maximizar el nivel de servicio involucrando el modelo de elección discreta en el proceso de optimización. La función NS utilizada dentro de NS-ED, fue modificada para incluir un término relacionado a la congestión por el estacionamiento ilegal de los camiones de modo que se pudiera comparar con el modelo BS. Finalmente,

se establecen recomendaciones para la planificación estratégica de estacionamiento en vía en base a los resultados obtenidos de la metodología planteada.

Las principales conclusiones de los resultados del caso de estudio son:

- De la información proporcionada por los conductores de camión acerca de su última visita a la zona, se encontró que en promedio los conductores hacen en el día 8 entregas, el 42% se estacionaron ilegalmente, 89% estacionó frente a su destino, el 46% hizo la entrega en menos de 25 minutos y el 78% buscó estacionamiento por menos de 5 minutos. Por otra parte, para los conductores de vehículos de pasajero se encontró que el 32% se estacionaron ilegalmente, 49% estacionaron frente a su destino, 75% demoró menos de 5 minutos buscando y el 52% tuvo tiempos de permanencia menor a 30 minutos.
- De las estimaciones de los MNL, se encontró que, *ceteris paribus*, los conductores de ambos tipos de usuarios prefieren usar los estacionamientos disponibles antes que seguir buscando una mejor opción. Sin embargo, los resultados sugieren que para los vehículos de pasajeros no existen diferencias marcadas entre las tres alternativas de estacionamiento (EnVía, Informal, FueraVía). En contraste, los usuarios de vehículos de carga muestran una preferencia marcada por el estacionamiento en vía lo más cercano a su destino (EnVía1). Seguido por una preferencia por estacionarse de manera ilegal frente a su destino (ilegal) y el estacionamiento más económico y alejado (EnVía2).
- Hay tres variables principales que describen las elecciones de estacionamiento de ambos usuarios: el costo, el tiempo de búsqueda y la distancia entre el estacionamiento y el destino. Sin embargo, su valoración es diferente entre los usuarios y de acuerdo con algunas variaciones sistemáticas. Por ejemplo, en promedio la DAP por reducir la distancia de caminata es mayor para los conductores de vehículos de pasajero comparado con los conductores de vehículos de carga. No obstante, esta valoración es diferente de acuerdo con algunas características como el género y los años de experiencia conduciendo para los conductores de vehículos de pasajero, la capacidad del vehículo para los conductores de vehículos de carga y la zona donde se encuentran los conductores para ambos casos. Asimismo, la DAP para reducir el tiempo de búsqueda es mayor para los conductores de vehículos de pasajero comparado con los conductores de vehículos de carga. Aquí la valoración diferenciada está en función de la edad para los conductores de vehículos de pasajero y la zona para los conductores de vehículos de carga.
- Existen otras variables que describen las elecciones y son particulares a cada tipo de usuario. En el caso de los conductores de vehículos de pasajero el clima y la hora de llegada tienen una influencia al elegir donde estacionar, asimismo en el caso de los conductores de vehículos de carga el valor esperado de la multa, el tiempo restante para completar la entrega y el número de entregas realizadas influye en su elección.
- La variable latente *conducta al estacionar* está explicada por el nivel de ingresos y la experiencia conduciendo para los usuarios de vehículos de pasajero y por la experiencia como transportador para usuarios de vehículos de carga. Se probó que *conducta al estacionar* tiene influencia en la elección de estacionamiento. En el caso de los conductores de vehículos de pasajero tener una

buena conducta al estacionar disminuye la probabilidad de estacionar en estacionamientos con cuidadores informales. En contraste, para los conductores de vehículos de carga una buena conducta disminuye la probabilidad de estacionar ilegalmente.

- Después de comparar las dos especificaciones propuestas NS_1 y NS_2 para el enfoque NS, el principal resultado es la necesidad de considerar por separado los requerimientos específicos de los usuarios y sus impactos en el medio ambiente al resolver el problema de asignación de estacionamiento. Los resultados del caso de estudio permitieron observar la posibilidad de obtener un mejor valor neto de la función NS cuando el modelo incluía el impacto diferenciado de camiones y automóviles.
- La evaluación del desempeño de la función NS mostró que los impactos de la circulación por tipo de usuario y cómo los tomadores de decisiones priorizan a los usuarios en la planificación del espacio de estacionamiento conducen a diferentes asignaciones, lo que resulta en valores netos variables de la función NS. Sin embargo, priorizar la provisión y el uso del estacionamiento para todos los usuarios resultó en un mejor nivel de servicio que centrarse en minimizar las externalidades del estacionamiento. Además, la cantidad de estacionamientos asignados, el uso de los espacios y el NS experimentado por todos los usuarios están en función de los objetivos de planificación de los tomadores de decisiones.
- Del escenario base de la función BS (es decir, Tarifa = 0 COP; Prob. Multa =1; Flujo Vehicular =Alto), se sabe que el promedio de utilización de los estacionamientos asignados a camión es más bajo que el promedio de utilización de las plazas asignadas a los automóviles. Además, el costo total de la externalidad por circulación es mucho mayor que el coste total de la externalidad por congestión debida a el estacionamiento ilegal de los camiones.
- En la función BS, el efecto del flujo vehicular es directo en la externalidad de congestión, sin embargo, cuando el flujo vehicular disminuye la asignación cambia priorizando la reducción de la externalidad por circulación.
- En la función BS, el aumento de las tarifas de automóvil (hasta 500 COP) cuando los usuarios de carga estacionan gratuitamente no implica que el modelo priorice a los usuarios de automóviles asignando un mayor número de plazas, sino que las ubica de tal manera que pueda aumentar la utilización de las plazas y disminuir la externalidad por congestión, aunque esto implique disminuir el beneficio percibido por los usuarios.
- A medida que aumenta la tarifa de camión disminuye el valor neto de BS, de tal manera que, el mejor valor del BS es cuando la tarifa de camión es 0 COP. Esto cuando los usuarios de automóvil tienen una tarifa asignada (comprobado para tarifas mayores a 250 COP) y es debido principalmente a que en esta asignación los costos totales de externalidad (por circulación y congestión) son más bajos. Además, la suma de los excedentes del consumidor de ambos usuarios es la más alta.
- Cuando se aumenta un 20% el valor de la multa, estacionar ilegalmente ya no es una alternativa para los usuarios de camión, eliminando los costos de externalidad por congestión del sistema. Si las alternativas de plazas de estacionamiento no son lo suficientemente atractivas para los usuarios de camión, estos prefieren buscar otras opciones generando externalidad por circulación

y en ultimas abandonar la zona sin ser servidos. Los resultados muestran que este comportamiento en los usuarios de camión mejora el valor de BS neto ya que las externalidades totales del sistema se reducen.

- El modelo NS-ED asigna los estacionamientos favoreciendo la prestación de un mejor servicio viéndolo desde la perspectiva del proveedor del servicio al maximizar la utilización de las plazas disponibles y de los usuarios que utilizan los estacionamientos, ya que, maximiza el número de usuarios servidos y evita el estacionamiento ilegal. Sin embargo, induce una mayor circulación de automóvil. Además, NS-ED no tiene en cuenta las condiciones de flujo vehicular en el proceso de asignación.
- La ventaja del modelo NS-ED comparado con el modelo NS es que permitan evaluar los efectos de las preferencias de los usuarios en la asignación. Además, permite tener una asignación que reduzca o por lo menos que tenga en cuenta el estacionamiento ilegal de los usuarios de camión.
- Las ventajas del enfoque BS comparado con el enfoque NS, es que cuantifica económicamente los beneficios del sistema y puede ser utilizado para la evaluación económica de políticas de estacionamientos. Además, tiene en cuenta las condiciones de flujo vehicular.

Finalmente, las principales contribuciones de esta tesis son:

- Se modelizó la elección de estacionamiento de usuarios de carga en un caso real en la ciudad de Cartagena, Colombia. Teniendo presente los principales factores y la influencia de la conducta al estacionar de los conductores en su elección.
- Se comparó y cuantificó la valoración de los principales atributos de la elección de estacionamiento para usuarios de vehículos de carga y pasajero.
- Se proponen dos enfoques de optimización para la planificación estratégica de los espacios de estacionamiento en vía para usuarios de carga y pasajeros:
 - Maximización del nivel de servicio
 - Maximización del bienestar social
- Se aplicaron ambos modelos a un caso de aplicación simulado, inspirados en la ciudad de Cartagena, que permite plantear recomendaciones para planificar estacionamientos considerando diferentes tipos de usuarios.

7 Conclusions

In this thesis, mathematical models have been developed to enable strategic parking planning to allocate pre-established on-street parking spaces in urban areas, considering competition between two types of users (freight and passenger vehicle users). To achieve this, we first identified the main factors that influence on-street parking behavior for both users. For this purpose, surveys were designed and applied using the city of Cartagena, Colombia, as a case study, which allowed the estimation of discrete choice models. Specifically, a Multinomial Logit model (MNL) and a Hybrid Discrete Choice model (HDC) were estimated for each type of user. Through the MNL model, the main attributes that govern the choice of each of the users were known and the assessments of these attributes were compared between both users. On the other hand, through the HDC model, the systematic variations that influence the valuation of the attributes that describe the choices were determined and the influence of the latent variable *parking behavior* on the probability of choosing informal parking in the case of passenger vehicle drivers and illegal parking in the case of drivers of freight vehicles was evaluated.

Two approaches to strategic planning of on-street parking spaces were then proposed, integrating the main factors previously identified. Both approaches were analyzed with simulated data in a case study inspired by the city of Cartagena. MINLP-type mathematical optimization models provided feasible solutions of which and how many parking spaces should be allocated to each type of user.

The first proposed approach is to maximize the Level of Service (NS) of the system, defined by the number of users served, the use of the available infrastructure and the effect of parking search of the users. Within the first approach, two specifications (NS_1 and NS_2) for the NS function were compared. The objective of the two formulations was to compare the effect on the allocation when differentiating by user type. Then, the flexibility of the NS_2 function as a planning tool for decision makers was analyzed. The analysis included the effect of vehicle circulation, the impact of prioritization to serve a user type, and the effect of different planning objectives.

The second approach proposed is the maximization of Social Welfare (BS), defined by producer surplus, consumer surplus and externalities due to vehicle circulation in search of parking spaces and congestion due to illegal parking of freight vehicles. With the BS function, different scenarios were analyzed to determine the effect of vehicle flow, rates, demand, and the expected value of the fine.

Then, to compare the two proposed approaches, the NS-ED model was introduced, which integrates the concept of NS and the constraints of the BS model. Therefore, NS-ED aimed at maximizing the level of service by involving the discrete choice model in the optimization process. The NS function used within NS-ED was modified to include a term related to congestion due to illegal truck parking so that it could be compared with the BS model. Finally, recommendations for on-street parking strategic planning are established based on the results obtained from the proposed methodology.

The main conclusions of the case study results are:

- From the MNL estimates, it was found that, *ceteris paribus*, drivers of both types of users prefer to use the available parking facilities rather than keep looking for a better option. However, the results suggest that for passenger vehicles there are no noticeable differences between the three parking alternatives (On-street, Informal, Off-street). In contrast, users of freight vehicles show a noticeable preference for on-street parking as close to their destination as possible (On-street1). This is followed by a preference for parking illegally in front of their destination (Illegal) and the most economical and farthest away parking (On-street 2).
- There are three main variables that describe the parking choices of both users: cost, search time and distance between parking and destination. However, their valuation is different among users and according to some systematic variations. For example, on average the WTP for reducing walking distance is higher for drivers of passenger vehicles compared to drivers of freight vehicles. However, this valuation is different according to some characteristics such as gender and years of driving experience for passenger vehicle drivers, vehicle capacity for freight vehicle drivers, and the area where the drivers are located for both cases. Also, the WTP for reducing search time is higher for drivers of passenger vehicles compared to drivers of freight vehicles. Here the differential assessment is a function of age for passenger vehicle drivers and area for freight vehicle drivers.
- There are other variables that describe the choices and are particular to each type of user. In the case of drivers of passenger vehicles, the weather and the time of arrival have an influence in choosing where to park; likewise, in the case of drivers of freight vehicles, the expected value of the fine, the time remaining to complete the delivery and the number of deliveries made influence their choice.
- The latent variable parking behavior is explained by income level and driving experience for passenger vehicle users and by experience for freight vehicle users. Parking behavior was found to influence parking choice. In the case of passenger car drivers, having a good parking behavior decreases the probability of parking in parking lots with informal attendants. In contrast, for drivers of freight vehicles, better parking behavior decreases the probability of parking illegally.
- After comparing the two proposed specifications NS1 and NS2 for the NS approach, the main result is the need to consider separately the specific requirements of the users and their impacts on the environment when solving the parking allocation problem. The results of the case study allowed observing the possibility of obtaining a better net value of the NS function when the model included the differentiated impact of trucks and cars.
- The performance evaluation of the NS function showed that the impacts of circulation by user type and how decision makers prioritize users in parking space planning lead to different allocations, resulting in varying net values of the NS function. However, prioritizing the provision and use of parking for all users resulted in a better level of service than focusing on minimizing parking externalities. Furthermore, the amount of allocated parking, space usage, and NS experienced by all users are a function of the planning objectives of the decision makers.
- From the baseline scenario of the BS function (i.e., Tariff = 0 COP; Prob. Fine =1; Vehicle Flow =High), it is known that the average utilization of parking spaces allocated to trucks is lower than

the average utilization of parking spaces allocated to cars. Moreover, the total cost of the traffic externality is much higher than the total cost of the congestion externality due to illegal truck parking.

- In the BS function, the effect of vehicle flow is direct on the congestion externality, however, when vehicle flow decreases the allocation changes prioritizing the reduction of the traffic externality.
- In the BS function, the increase in car tariffs (up to 500 COP) when freight users park for free does not imply that the model prioritizes car users by allocating a greater number of spaces, but rather it places them in such a way as to increase the use of the spaces and decrease the congestion externality, even if this implies decreasing the benefit perceived by users.
- As the truck tariff increases, the net value of BS decreases, so that the best value of BS is when the truck tariff is 0 COP. This is when car users have an assigned fare (also tested for tariffs higher than 250 COP) and is mainly due to the fact that in this assignment the total externality costs (traffic and congestion) are lower. In addition, the sum of the consumer surplus of both users is the highest.
- When the value of the fine is increased by 20%, illegal parking is no longer an alternative for truck users, removing congestion externality costs from the system. If the parking alternatives are not sufficiently attractive to truck users, they prefer to look for other options, generating a traffic externality and ultimately leaving the zone without being served. The results show that this behavior by truck users improves the net BS value as the total system externalities are reduced.
- The NS-ED model allocates parking spaces in a way that enhances service provision from the perspective of the service provider by maximizing the utilization of available parking spaces and the users who use the parking lots, since it maximizes the number of users served and avoids illegal parking. However, it induces more circulation of cars. In addition, NS-ED does not take into account vehicular flow conditions in the allocation process.
- The advantage of the NS-ED model compared to the NS model is that it allows to evaluate the effects of user preferences on the allocation. In addition, it allows to have an assignment that reduces or at least considers the illegal parking of truck users.
- The advantages of the BS approach compared to the NS approach is that it economically quantifies the benefits of the system and can be used for the economic evaluation of parking policies. In addition, it considers vehicular flow conditions
- Finally, the main contributions of this thesis are:
 - The parking choice of freight users was modeled in a real case in the city of Cartagena, Colombia. Considering the main factors and the influence of the parking behavior of drivers in their choice.
 - The valuation of the main attributes of parking choice for freight and passenger vehicle users was compared and quantified.
 - Two optimization approaches are proposed for the strategic planning of on-street parking spaces for freight and passenger users:
 - Maximization of level of service
 - Maximization of social welfare

- Both models were applied to a simulated application case, inspired by the city of Cartagena, which allows recommendations to plan parking spaces considering different types of users.

8 Líneas de investigación futuras

A partir de los alcances, la metodología y los resultados de la presente tesis y reconociendo sus limitaciones, se establecen las siguientes líneas de investigación futuras:

- Validar los resultados obtenidos con los modelos NS y BS considerando datos de diferentes ciudades con otras características de demanda y condiciones de estacionamiento.
- Ampliar el tamaño del caso de estudio lo que requerirá proponer una metaheurística para resolver problemas a gran escala ya que la optimización dejará de ser una opción.
- Evaluar el efecto de la implantación de políticas de estacionamiento con los modelos propuestos: restricciones horarias, limitación de duraciones, tarifas variables, control de ilegalidad, entre otros.
- Estimar con mayor precisión el efecto y costos de las externalidades por circulación y congestión de los diferentes usuarios.
- Considerar otros tipos de usuarios del espacio urbano tal como vehículos de servicio, vehículos autónomos, vehículos eléctricos, autobuses y usuarios de micro movilidad.
- Utilizar un enfoque de simulación para incluir dentro del modelo de optimización, modelos de elección discreta avanzados. Por ejemplo, el modelo HDC propuesto para cada uno de los usuarios.
- Calcular la tarifa óptima del sistema de estacionamiento que permita internalizar los efectos de las externalidades del sistema.
- Plantear un modelo de gestión de estacionamiento involucrando los conceptos de BS y NS.

9 Bibliografía

- Aiura, N., & Taniguchi, E. (2006). Planning On-Street Loading-Unloading Spaces Considering the Behaviour of Pickup-Delivery Vehicles and Parking Enforcement. *Recent Advances in City Logistics*, 6, 107–116. <https://doi.org/10.1016/b978-008044799-5/50093-0>
- Alho, A. R., de Abreu e Silva, J., de Sousa, J. P., & Blanco, E. (2018). Improving mobility by optimizing the number, location and usage of loading/unloading bays for urban freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.014>
- Alinia, K., Yarahmadi, A., Zarin, J. Z., Yarahmadi, H., & Lak, S. B. (2015). Parking Lot Site Selection: An Opening Gate Towards Sustainable GIS-based Urban Traffic Management. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(4), 801–813. <https://doi.org/10.1007/s12524-014-0415-3>
- Amaya, J., Arellana, J., & Delgado-Lindeman, M. (2020). Stakeholders perceptions to sustainable urban freight policies in emerging markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132(November 2019), 329–348. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.11.017>
- Amer, A., & Chow, J. Y. J. (2017). A downtown on-street parking model with urban truck delivery behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 102, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.013>
- Arnott, R., Inci, E., & Rowse, J. (2015). Downtown curbside parking capacity. *Journal of Urban Economics*, 86, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2014.12.005>
- Arnott, R., & Rowse, J. (2009). Downtown parking in auto city. *Regional Science and Urban Economics*, 39(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.08.001>
- Aros-Vera, F., Marianov, V., & Mitchell, J. E. (2013). P-Hub approach for the optimal park-and-ride facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.006>
- Aydin, N. (2022). Decision-Dependent Multiobjective Multiperiod Stochastic Model for Parking Location Analysis in Sustainable Cities: Evidence from a Real Case. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(1), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000796](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000796)
- Aydinoglu, A. C., & Iqbal, A. S. (2021). Determining Parking Demand and Locating Parking Areas Using Geographic Analytics Methods. *Journal of Urban Planning and Development*, 147(1), 05020035. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000650](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000650)
- Belloche, S. (2015). On-street parking search time modelling and validation with survey- based data. *Transportation Research Procedia*, 6(June 2014), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.03.024>
- Ben Hassine, S., Mraïhi, R., Lachiheb, A., & Kooli, E. (2022). Modelling parking type choice behavior. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(3), 653–664. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.09.002>
- Bischoff, J., & Nagel, K. (2017). ScienceDirect Integrating explicit parking search into a transport simulation. *Procedia Computer Science*, 109C, 881–886. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.414>

- Brooke, S., Ison, S., & Quddus, M. (2014). On-street parking search: Review and future research direction. *Transportation Research Record*, 2469(2469), 65–75. <https://doi.org/10.3141/2469-08>
- Browne, M., Woodburn, A., & Allen, J. (2007). Evaluating the potential for urban consolidation centres. *European Transport - Trasporti Europei*, 35, 46–63.
- CEPAL. (2022). Informe Portuario 2021 : las primeras señales de recuperación en el transporte marítimo internacional vía contenedores de América Latina y el Caribe. *Boletín FAL* 391, 1–20.
- Chaniotakis, E., & Pel, A. J. (2015). Drivers' parking location choice under uncertain parking availability and search times: A stated preference experiment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 82, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.10.004>
- Chong, E. K. ., & Zak, S. H. (2001). *An introduction to optimization* (Second edi). John Wiley & Sons.
- Chrest, A. P., Smith, M. S., Sam, B., Mohammad, I., & Monahan, D. R. (2012). *Parking Structures: Planning, Design, Construction, Maintenance and Repair* (Third edit). Springer Science & Business Media.
- Comi, A., Buttarazzi, B., Schiraldi, M. M., Innarella, R., Varisco, M., & Rosati, L. (2017). DynaLOAD: A simulation framework for planning, managing and controlling urban delivery bays. *Transportation Research Procedia*, 22, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.049>
- Comi, A., Schiraldi, M. M., & Buttarazzi, B. (2018). Smart urban freight transport: tools for planning and optimising delivery operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 88(August), 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.08.006>
- Dablanc, L. (2007). Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(3), 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.05.005>
- Dalla Chiara, G., Cheah, L., Azevedo, C. L., & Ben-Akiva, M. E. (2020). A Policy-Sensitive Model of Parking Choice for Commercial Vehicles in Urban Areas. *Transportation Science*, 54(3), 606–630. <https://doi.org/10.1287/trsc.2019.0970>
- DANE. (2018). *Mapa Interactivo Digital de Asuntos de Suelo*. <https://midas.cartagena.gov.co/Content/Switcher>
- Das, D., & Ahmed, M. A. (2018). Level of service for on-street parking. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 330–340. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1538-1>
- Das, P., Parmar, J., & Azad, F. (2021). A methodology of evaluating urban parking system: Case study of Delhi. *European Transport - Trasporti Europei*, 81(March). <https://doi.org/10.48295/ET.2021.81.9>
- Delaître, L. (2009). A new approach to diagnose urban delivery areas plans. *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009*, 991–998. <https://doi.org/10.1109/iccie.2009.5223953>
- Delaître, L., & Routhier, J. (2010). Mixing two French tools for delivery areas scheme decision making. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2, 6274–6285. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.037>
- Dezi, G., Dondi, G., & Sangiorgi, C. (2010). Urban freight transport in Bologna : Planning commercial vehicle

- loading / unloading zones. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5990–6001. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.013>
- EC. (2019). Handbook on the External Costs of Transport. In *European Commission*. <https://www.cedelft.eu/en/publications/2311/handbook-on-the-external-costs-of-transport-version-2019>
- Errouso, H., El Ouadi, J., Abdellaoui Alaoui, E. A., & Benhadou, S. (2021). Dynamic parking space allocation at urban scale: Problem formulation and resolution. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.11.011>
- Errouso, H., Ouadi, J. El, Alaoui, E. A. A., Benhadou, S., & Medromi, H. (2020). A hybrid modeling approach for parking assignment in urban areas. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.11.006>
- Ezquerro, S., Moura, J. L., & Alonso, B. (2020). Illegal use of loading bays and its impact on the use of public space. *Sustainability (Switzerland)*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/SU12155915>
- Fernandez Pozo, R., Rodriguez Gonzalez, A. B., Richard Wilby, M., Vinagre Diaz, J. J., & Viana Matesanz, M. (2021). Prediction of On-Street Parking Level of Service Based on Random Undersampling Decision Trees. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3077985>
- Figliozzi, M., & Tipagornwong, C. (2017). Impact of last mile parking availability on commercial vehicle costs and operations. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 18(2), 60–68. <https://doi.org/10.1080/16258312.2017.1333386>
- Freire, A. S., Moreno, E., & Yushimito, W. F. (2016). A branch-and-bound algorithm for the maximum capture problem with random utilities. *European Journal of Operational Research*, 252(1), 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.026>
- Fuentes, R., Cantillo, V., & López-Ospina, H. (2022). A road pricing model involving social costs and infrastructure financing policies. *Applied Mathematical Modelling*, 105, 729–750. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.01.013>
- Gallo, M., D’Acierno, L., & Montella, B. (2011). A multilayer model to simulate cruising for parking in urban areas. *Transport Policy*, 18(5), 735–744. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.01.009>
- Gantelet, E., & Lefauconnier, A. (2006). The time looking for a parking space: Strategies, associated nuisances and stakes of parking management in France. *European Transport Conference (ETC) Association for European Transport (AET)*, 1–7.
- Gillen, D. W. (1978). *PARKING POLICY , PARKING LOCATION DECISIONS AND THE DISTRIBUTION OF CONGESTION*. 7, 69–85.
- Glazer, A., & Niskanen, E. (1992). Parking fees and congestion. *Regional Science and Urban Economics*, 22(1), 123–132. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(92\)90028-Y](https://doi.org/10.1016/0166-0462(92)90028-Y)
- Golias, J., Yannis, G., & Harvatis, M. (2002). Off-street parking choice sensitivity. *Transportation Planning and Technology*, 25(4), 333–348. <https://doi.org/10.1080/0308106022000019620>

- Gopalakrishnan, R., Alho, A. R., Sakai, T., Hara, Y., Cheah, L., & Ben-Akiva, M. (2020). Assessing overnight parking infrastructure policies for commercial vehicles in cities using agent-based simulation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/su12072673>
- Greenshields, B. D., Bibbins, J. R., Channing, W. S., & Miller, H. H. (1935). A study of traffic capacity. *Highway Research Board Proceedings*, 1935.
- Guo, M., Jiang, Z., Bu, Y., & Cheng, J. (2019). Supporting sustainable development of water resources: A social welfare maximization game model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph16162896>
- Guo, Z., & Ren, S. (2013). From Minimum to Maximum: Impact of the London Parking Reform on Residential Parking Supply from 2004 to 2010? *Urban Studies*, 50(6), 1183–1200. <https://doi.org/10.1177/0042098012460735>
- Haider, M., Lalonde, L., Mehboubi, M., Livett, C., & Spenard, D. (2009). Challenges Facing Express Delivery Services in Canada's Urban Centres. In *Institute of Housing & Mobility, Ryerson University*.
- He, Y., Sun, X., Du, L., Jinmei, R., & Das, S. (2012). Level of service for parking facilities. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1161–1165. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338914>
- Hess, S., & Palma, D. (2019). Apollo: A flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application. *Journal of Choice Modelling*, 32(June), 100170. <https://doi.org/10.1016/j.jocm.2019.100170>
- Holguín-Veras, Jose, Amaya-Leal, J., Wojtowicz, J., Jaller, M., González-Calderón, C., Sánchez-Díaz, I., Wang, X., Haake, D. G., Rhodes, S. S., & Hodge, S. D. (2015). *Improving freight system performance in metropolitan areas: a planning guide* (Issue Project NCFRP-38).
- Holguín-Veras, José, Amaya, J., Encarnacion, T., Kyle, S., & Wojtowicz, J. (2016). Impacts of Freight Parking Policies in Urban Areas: The Case of New York City. U. T. R Center. *Rensselaer Polytechnic Institute, University Transportation Research Center*.
- Holguín-Veras, José, Amaya Leal, J., Sánchez-Díaz, I., Browne, M., & Wojtowicz, J. (2020). State of the art and practice of urban freight management: Part I: Infrastructure, vehicle-related, and traffic operations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137(November 2018), 360–382. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.037>
- Holguín-Veras, José, & Cetin, M. (2009). Optimal tolls for multi-class traffic: Analytical formulations and policy implications. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), 445–467. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.11.012>
- Holguín-Veras, José, Pérez, N., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., & Aros-Vera, F. (2013). On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *Journal of Operations Management*, 31(5), 262–280. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2013.06.002>
- Inci, E., van Ommeren, J., & Kobus, M. (2017). The external cruising costs of parking. *Journal of Economic Geography*, 17(6), 1301–1323. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbx004>
- Ishida, T. (2006). TRANSPORTATION AND SAFETY IN JAPAN Enforcement of Illegal Parking Under the New

- Parking Legislation. *International Association of Traffic and Safety Sciences*, 30(2), 120–125. [http://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60177-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60177-1)
- Jaller, M., Rodie, C., Zhang, M., Lin, H., & Lewis, K. (2021). *Fighting for Curb Space: Parking, Ride-Hailing, Urban Freight Deliveries, and Other Users*. <https://escholarship.org/uc/item/3jn371hw%0Ahttps://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/final-reports/ca21-3397-final-report-a11y.pdf%0Ahttps://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/56903%0Ahttps://doi.org/10.25338/>
- Jelokhani-Niaraki, M., & Malczewski, J. (2015). A group multicriteria spatial decision support system for parking site selection problem: A case study. *Land Use Policy*, 42, 492–508. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.09.003>
- Jones, E., Chatterjee, A., & Marsili, R. L. (2009). A collaborative plan for curbside freight delivery in Washington, DC, USA. *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers)*, 79(5), 22–25.
- Khaliq, A., van der Waerden, P., & Janssens, D. (2018). Modeling Car Drivers' On-Street Parking Decisions using the Integrated Hierarchical Information Integration Approach. *Transportation Research Record*, 2672(49), 23–33. <https://doi.org/10.1177/0361198118776524>
- Kim, W., & Wang, X. (2021). Double parking in New York city: a comparison between commercial vehicles and passenger vehicles. *Transportation*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10212-5>
- Kladeftiras, M., & Antoniou, C. (2013). Simulation-based assessment of double-parking impacts on traffic and environmental conditions. *Transportation Research Record*, 2390, 121–130. <https://doi.org/10.3141/2390-13>
- Kobus, M. B. W., Gutiérrez-i-Puigarnau, E., Rietveld, P., & Van Ommeren, J. N. (2013). The on-street parking premium and car drivers' choice between street and garage parking. *Regional Science and Urban Economics*, 43(2), 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2012.10.001>
- Letnik, T., Farina, A., Mencinger, M., Lupi, M., & Božičnik, S. (2018). Dynamic management of loading bays for energy efficient urban freight deliveries. *Energy*, 159, 916–928. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.125>
- Li, J., Wu, S., & Feng, X. (2021). Optimization of on-street parking charges based on price elasticity of the expected perceived parking cost. *Sustainability (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105735>
- Li, X. H., Wang, L. X., Sun, X. H., & Zuo, Z. (2019). A study on the decision-making heterogeneity of parking mode choice. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 127(April), 74–83. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7542-2_7
- Lin, Y., & Schrage, L. (2009). The global solver in the LINDO API. *Optimization Methods and Software*, 24(4–5), 657–668. <https://doi.org/10.1080/10556780902753221>
- Litman, T. (2006). *by Motorists often complain about parking problems and demand that somebody add more*.
- Macea, L. F., Amaya, J., Cantillo, V., & Holguín-Veras, J. (2018). Evaluating economic impacts of water deprivation in humanitarian relief distribution using stated choice experiments. *International Journal*

- of Disaster Risk Reduction*, 28, 427–438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.029>
- Mahmud, A., Gayah, V. V., & Paleti, R. (2022). A latent choice model to analyze the role of preliminary preferences in shaping observed choices. *Transportation Research Part B: Methodological*, 161(April), 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.05.008>
- Marsden, G., Docherty, I., & Dowling, R. (2020). Parking futures: Curbside management in the era of ‘new mobility’ services in British and Australian cities. *Land Use Policy*, 91(May 2019), 104012. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.031>
- Maternini, G., Ferrari, F., & Guga, A. (2017). Application of variable parking pricing techniques to innovate parking strategies. The case study of Brescia. *Case Studies on Transport Policy*, 5(2), 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.03.010>
- McLeod, F., & Cherrett, T. (2011). Loading bay booking and control for urban freight. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 14(6), 385–397. <https://doi.org/10.1080/13675567.2011.641525>
- Moeinaddini, M., Asadi-Shekari, Z., Ismail, C. R., & Zaly Shah, M. (2013). A practical method for evaluating parking area level of service. *Land Use Policy*, 33, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.11.014>
- Morichi, S. (2009). Sustainable transport development in East Asian megacities. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 8(3–4), 229–246. <https://doi.org/10.1504/ijesd.2009.024629>
- Morillo, C., & Campos, J. M. (2014). On-street Illegal Parking Costs in Urban Areas. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 160(Cit), 342–351. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.146>
- Muñuzuri, J., Racero, J., & Larrañeta, J. (2002). Parking search modelling in freight transport and private traffic simulation. *Urban Transport VIII*. WIT Press.
- Muñuzuri, Jesús, Cortés, P., Grosso, R., & Guadix, J. (2012). Selecting the location of minihubs for freight delivery in congested downtown areas. *Journal of Computational Science*, 3(4), 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2011.12.002>
- Muñuzuri, Jesús, Cuberos, M., Abaurrea, F., & Escudero, A. (2017). Improving the design of urban loading zone systems. *Journal of Transport Geography*, 59, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.01.004>
- My Thanh, T. T., & Friedrich, H. (2017). Legalizing the illegal parking, a solution for parking scarcity in developing countries. *Transportation Research Procedia*, 25, 4950–4965. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.374>
- Ni, X., Ma, X., & Xia, X. (2013). Location model of public parking facilities basing on the optimal total social cost. *Applied Mechanics and Materials*, 253–255(PART 1), 175–178. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.253-255.175>
- Nourinejad, M., Wenneman, A., Habib, K. N., & Roorda, M. J. (2014). Truck parking in urban areas : Application of choice modelling within traffic microsimulation. *Transportation Research Part A*, 64, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.03.006>

- Ortúzar, J., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport* (John Wiley & Sons (ed.); 4ta ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119993308>
- Pacheco Paneque, M., Bierlaire, M., Gendron, B., & Sharif Azadeh, S. (2021). Integrating advanced discrete choice models in mixed integer linear optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 26–49. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.02.003>
- Peng, G. C. A., Nunes, M. B., & Zheng, L. (2017). Impacts of low citizen awareness and usage in smart city services: the case of London's smart parking system. *Information Systems and E-Business Management*, 15(4), 845–876. <https://doi.org/10.1007/s10257-016-0333-8>
- Pierce, G., Willson, H., & Shoup, D. (2015). Optimizing the use of public garages: Pricing parking by demand. *Transport Policy*, 44, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.07.003>
- Pinto, R., Golini, R., & Lagorio, A. (2016). Loading/unloading lay-by areas location and sizing: a mixed analytic-Monte Carlo simulation approach. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 961–966. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.900>
- Qian, Z. (Sean), & Rajagopal, R. (2015). Optimal dynamic pricing for morning commute parking. *Transportmetrica A: Transport Science*, 11(4), 291–316. <https://doi.org/10.1080/23249935.2014.986671>
- Qian, Z., & Rajagopal, R. (2014a). Optimal dynamic parking pricing for morning commute considering expected cruising time. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 468–490. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.08.020>
- Qian, Z., & Rajagopal, R. (2014b). Optimal occupancy-driven parking pricing under demand uncertainties and traveler heterogeneity: A stochastic control approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67, 144–165. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.002>
- Qin, H., Yang, X., Wu, Y. J., Guan, H., Wang, P., & Shahinpoor, N. (2020). Analysis of parking cruising behaviour and parking location choice. *Transportation Planning and Technology*, 43(7), 717–734. <https://doi.org/10.1080/03081060.2020.1805545>
- Qin, H., Zheng, F., Yu, B., & Wang, Z. (2022). Analysis of the Effect of Demand-Driven Dynamic Parking Pricing on on-Street Parking Demand. *IEEE Access*, 10(July), 70092–70103. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187534>
- Roca-Riu, M., Cao, J., Dakic, I., & Menendez, M. (2017). Designing dynamic delivery parking spots in urban areas to reduce traffic disruptions. *Journal of Advanced Transportation*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6296720>
- Rodríguez, A., Cordera, R., Alonso, B., dell'Olio, L., & Benavente, J. (2022). Microsimulation parking choice and search model to assess dynamic pricing scenarios. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 156(January), 253–269. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.12.013>
- Russo, F., & Comi, A. (2011). Measures for Sustainable Freight Transportation at Urban Scale: Expected Goals and Tested Results in Europe. *Journal of Urban Planning and Development*, 137(2), 142–152. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000052](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000052)
- Shen, T., Hua, K., & Liu, J. (2019). Optimized Public Parking Location Modelling for Green Intelligent

- Transportation System Using Genetic Algorithms. *IEEE Access*, 7, 176870–176883. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957803>
- Shoup, D. (2011a). *The High Cost of Free Parking*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781351179782>
- Shoup, D. (2011b). Yes, Parking Reform Is Possible: A progress report from the author of “The High Cost of Free Parking”. *UC Berkeley: University of California Transportation Center*, 15(4), 31–35. <https://escholarship.org/uc/item/4p60t8ck>
- Shoup, D. C. (2006). Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.05.005>
- Smith, M. S. (1996). Crime Prevention Through Environmental Design in Parking Facilities. *US Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice*, 12 pages.
- Soto, J. J., Márquez, L., & Macea, L. F. (2018). Accounting for attitudes on parking choice: An integrated choice and latent variable approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 111(March), 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.03.003>
- Spitaels, A. K., & Maerivoet, S. (2008). An empirical agent-based model of parking behaviour An empirical agent-based model of parking behaviour. *Transport*, 1–20.
- Sun, Q., Wu, C., Li, Z., & Ren, S. (2016). Colocation Demand Response: Joint Online Mechanisms for Individual Utility and Social Welfare Maximization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(12), 3978–3992. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2611918>
- Swamy, S., & Baidur, D. (2014). Managing urban freight transport in an expanding city — Case study of Ahmedabad. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.06.010>
- Tamayo, S., Gaudron, A., & de La Fortelle, A. (2017). LOADING/UNLOADING SPACES LOCATION AND EVALUATION: AN APPROACH THROUGH REAL DATA. *10th International Conference on City Logistics, Institute for City Logistics, June*, 1–3.
- Teng, H., Qi, Y., & Yi, P. (2002). Parking Search Time and Information Identification for Off-Street Spaces in New York City. *Transportation Research Record*, 1800(1), 44–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1800-06>
- Train, K. E. (2009). *Discrete Choice Methods with Simulation* (U. of California, Berkeley, & NERA (eds.); Second).
- Van Der Waerden, P., Borgers, A., & Timmermans, H. (2009). Consumer response to introduction of paid parking at a regional shopping center. *Transportation Research Record*, 2118, 16–23. <https://doi.org/10.3141/2118-03>
- Van Ommeren, J., de Groote, J., & Mingardo, G. (2014). Residential parking permits and parking supply. *Regional Science and Urban Economics*, 45(1), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2013.11.003>
- Van Ommeren, J. N., Wentink, D., & Rietveld, P. (2012). Empirical evidence on cruising for parking. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(1), 123–130.

<https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.011>

- Van Ommeren, J., Wentink, D., & Dekkers, J. (2011). The real price of parking policy. *Journal of Urban Economics*, 70(1), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2011.02.001>
- Varian, H. (1992). *Microeconomic Analysis* (Norton & Company (eds.)).
- Wang, P., Guan, H., & Liu, P. (2019). Modeling and solving the optimal allocation-pricing of public parking resources problem in urban-scale network. *Transportation Research Part B*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.003>
- Wang, Y., Peng, Z., & Chen, Q. (2018). Model for Public Car Park Layout Based on Dynamic Multiperiodic Parking Demands. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(4), 04018031. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000474](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000474)
- Wang, Z., Tan, Z., & Xu, H. (2008). Location model and algorithm of public parking facilities. *Proceedings - International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2008*, 1, 598–602. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2008.368>
- Weinberger, R. (2012). Death by a thousand curb-cuts: Evidence on the effect of minimum parking requirements on the choice to drive. *Transport Policy*, 20, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.08.002>
- Wey, W. M. (2003). Dynamic parking facility location with time-dependent demands: The progressive p-median problem. *PROCEEDINGS OF THE EASTERN ASIA SOCIETY FOR TRANSPORTATION STUDIES, Vol 4, Nos 1 AND 2*, 4(1–2), 461–469.
- Williams, H. C. W. L. (1977). On the Formation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 9(3), 285–344. <https://doi.org/10.1068/a090285>
- Ye, X., Chen, J., Wang, T., Zheng, J., & Zhang, H. (2013). Level of service of curbside parking facilities based on parking accessibility. *ICTE 2013 - Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Engineering*, 2182–2187. <https://doi.org/10.1061/9780784413159.318>
- Yu, J. C., & Lincoln, A. R. (1973). Parking Facility Layout: Level-of-Service Approach. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 99(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000319>
- Zhang, R., & Zhu, L. (2016). Curbside parking pricing in a city centre using a threshold. *Transport Policy*, 52, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.06.008>
- Zong, F., Yu, P., Tang, J., & Sun, X. (2019). Understanding parking decisions with structural equation modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 523, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.02.038>