Externalidades en el transporte de carga metropolitano: una visión conceptual y metodológica para su estimación

Ximena Carolina Velandia Villamil

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2020

Externalidades en el transporte de carga metropolitano: Una visión conceptual y metodológica para su estimación

Ximena Carolina Velandia Villamil

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Transporte

Director (a):

Ph.D. César Augusto Ruiz Rojas

Codirector (a):

Ph.D. Adolfo Alarcón Guzmán

Línea de Investigación:

Planeación de la movilidad, economía del transporte

Grupo de Investigación:

Programa de Investigación en Transporte, Movilidad y Territorio (PIT)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2020

“Para que el acontecimiento más trivial se vuelva una aventura basta ponerse a narrarlo. Un hombre es un narrador de historias; vive rodeado de sus historias y de las de otros, y tiende a vivir la vida como si la narrase”.

Jean Paul Sartre, Las palabras

Agradecimientos

A Dios por darme la vida, la sabiduría, el entendimiento y la ciencia a través del espíritu Santo en el desarrollo de esta investigación. A mi familia, Jaime mi padre, Esperanza mi madre y Andrés mi hermano por el apoyo moral y la paciencia en el desarrollo de la tesis.

A la Universidad Nacional de Colombia, por abrirme tantas puertas y darme las herramientas para mi formación profesional.

A cada una de las entidades que facilitaron la información que hizo posible el desarrollo de esta tesis en especial a la Secretaria Distrital de Ambiente, Secretaria de Distrital de Movilidad, la Agencia Nacional de Seguridad Vial y el Ministerio de Transporte.

A mi director César Ruiz, sin su orientación y guía no hubiese logrado un proceso de aprendizaje tan enriquecedor y resultados que reflejan su entusiasmo con el tema metropolitano y su dedicación en cada sesión de trabajo.

A mi codirector Adolfo Alarcón, quien me apoyo desde que empecé mi formación como ingeniera y me transmitió su forma de ser tan metódica y ordenada, elementos fundamentales para el desarrollo de esta tesis y que marcan mi día a día.

A cada uno de mis amigos de la Universidad, Cal y Mayor y de la cotidianidad, por el apoyo técnico y moral desde sus diferentes enfoques, no saben cuánto contribuyeron al cierre de la investigación con el tiempo que dedicaron a darme un consejo, a explicarme un método o debatir conmigo la mejor manera de abordar un tema desde su experiencia.

¡Gracias infinitas a todos!

Resumen

El propósito de esta investigación es formular un modelo metodológico sustentado en un enfoque conceptual y teórico para identificar las expresiones de las externalidades del transporte de carga en regiones o áreas metropolitanas. Específicamente se propone un modelo que diferencie el efecto de otros modos de transporte y flujos provenientes de distintas escalas y ámbitos territoriales, tomando como base en la noción de costo social del transporte. Los resultados evidenciaron que el transporte de carga en el ámbito metropolitano constituye en sí mismo una externalidad del territorio y a su vez es generador de externalidades, dadas las relaciones que se establecen entre la ciudad núcleo y los municipios metropolitanos. Estas relaciones están determinadas fundamentalmente por las economías de aglomeración, de red y de alcance. El modelo propuesto se aplicó a la Región metropolitana de Bogotá y logró estimar y valorar las externalidades. Además, puede replicarse en otros casos metropolitanos como instrumento para la toma de decisiones, la generación de políticas públicas para el seguimiento al desempeño del transporte de carga y la optimización de la logística metropolitana.

Palabras clave: área o región metropolitana, costo social del transporte, externalidades económicas, modelo conceptual, transporte de carga.

Abstract

The purpose of this research is to formulate a methodological model based on a conceptual and theoretical approach to identify expressions of externalities in freight transport in regions or metropolitan areas. Specifically, a model is proposed to differentiate the effect of other modes of transport and economic flows from different scales and territorial areas, based on the notion of the social cost of transport. Results showed that freight transport in the metropolitan area constitutes itself an externality of the territory and in turn is a generator of externalities, given the relationships established between the core city and the municipalities. These relationships are fundamentally determined by the economies of agglomeration, scale and scope. The proposed model was applied to the Bogotá metropolitan region, managing to estimate and value externalities. Additionally, it can be replicated in other metropolitan cases as an instrument for decision-making, the generation of public policies to monitor the performance of freight transport and optimization of metropolitan logistics.

Keywords: metropolitan area or region, social cost of transportation, economics externalities, conceptual model, freight transport.

Contenido

Pág.

Resumen……..... IX

Lista de figuras……..... XIII

Lista de tablas…… XV

Lista de símbolos y abreviaturas XVI

Introducción…….. 1

1. Perspectiva teórica y conceptual de las externalidades 5
1.1 Externalidades económicas 6
1.2 Externalidades económicas del transporte.....10
1.3 Externalidades económicas del transporte de carga metropolitano.....14
1.4 Costo social del transporte de carga.....18
1.4.1 Mercado del transporte de carga.....19
1.4.2 Externalidades en la política pública y sectorial del transporte 25
1.4.3 Externalidades del transporte en el contexto mundial 26
1.5 Modelo conceptual de externalidades en transporte de carga metropolitano .27

2. Propuesta metodológica para la estimación y valoración de externalidades en entornos metropolitanos 31
2.1 Alcance del modelo conceptual y metodológico.....32
2.2 Regiones metropolitanas como subsistemas de ciudades y externalidades ..35
2.3 Expresión metropolitana de las externalidades del transporte de carga.....39
2.4 Métodos para la estimación y valoración de externalidades.....44
2.4.1 Siniestralidad en los corredores metropolitanos 44
2.4.2 Relación núcleo – periferia: el caso de la contaminación ambiental 48
2.4.3 Congestión en los corredores metropolitanos y los pasos urbanos 51
2.4.4 El transporte de carga incidente de la producción económica metropolitana 53
2.4.5 Modelo metodológico propuesto 54

3. Una aproximación a la estimación y valoración de las externalidades en la Región Metropolitana de Bogotá.....57
3.1 Caracterización del movimiento de carga en los ámbitos territoriales 58
3.1.1 Movimiento de carga nacional.....59
3.1.2 Movimiento de carga metropolitana.....63
3.1.3 Caracterización logística e industrial del ámbito metropolitano.....67
3.2 Los corredores de carga en la región metropolitana de Bogotá 71

3.3 Estimación y valoración de las externalidades del modelo propuesto..... 77
3.3.1 Magnitud de las externalidades 78
3.3.2 Representación espacial de la magnitud de las externalidades 89
3.3.3 Valoración de las externalidades 93
3.4 Limitaciones y recomendaciones para la aplicación de la metodología 98

4. Reflexiones y retos de la internalización de las externalidades..... 101
4.1 El debate de quién debe pagar las externalidades 101
4.2 La articulación metropolitana en la toma de decisiones de política sectorial de transporte y movilidad 105
4.3 Reducción de las externalidades del transporte de carga con la optimización de la logística metropolitana 109

5. Conclusiones y recomendaciones 113
5.1 Conclusiones..... 113
5.1.1 Modelo conceptual..... 114
5.1.2 Propuesta metodológica 114
5.1.3 Estimación y valoración de las externalidades en la Región Metropolitana de Bogotá 115
5.1.4 Internalización de las externalidades 116
5.2 Recomendaciones..... 117

Bibliografía…….. 119

A. Anexo: Matriz de carga metropolitana a partir del RNDC 123

B. Anexo: Análisis de imágenes de corredores metropolitanos..... 133

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: Abordaje conceptual de las externalidades 8
Figura 1-2: Externalidades económicas del transporte 11
Figura 1-3: Representación de equilibrio parcial de la externalidad de congestión 13
Figura 1-4: Ámbitos territoriales de las externalidades del transporte 14
Figura 1-5: Externalidades económicas del transporte de carga metropolitano 16
Figura 1-6: Expresiones de las externalidades en el entorno metropolitano 18
Figura 1-7: Actores y agentes en el transporte de carga 20
Figura 1-8: Elementos que componen el costo social del transporte 21
Figura 1-9: Producción de la externalidad negativa 23
Figura 1-10: Fases para dar un valor monetario a las externalidades..... 24
Figura 1-11: Modelo conceptual para identificar las expresiones de las externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos..... 30
Figura 2-1: Conceptos base del modelo metodológico 32
Figura 2-2: Análisis del modelo conceptual 34
Figura 2-3: Retos conceptuales y metodológicos del modelo propuesto 35
Figura 2-4: Región metropolitana como subsistema de ciudades..... 39
Figura 2-5: Análisis para la identificación de las expresiones de las externalidades en el territorio..... 41
Figura 2-6: Metodología para la estimación y valoración de las externalidades..... 56
Figura 3-1: Movimiento de carga en toneladas del país en el año 2019 60
Figura 3-2: Configuración de vehículos utilizados en viajes de carga en el año 2019.... 61
Figura 3-3: Movimiento de carga entre la RMB y el país año 2019..... 62
Figura 3-4: Movimiento de carga la Región Metropolitana de Bogotá D.C. año 2019 63
Figura 3-5: Líneas de deseo entre pares O-D metropolitanos en términos de toneladas movilizadas 64
Figura 3-6: Líneas de deseo entre pares O-D metropolitanos en términos de viajes 65
Figura 3-7: Tipología de camiones en el movimiento de carga metropolitano..... 66
Figura 3-8: Clasificación de los movimientos de carga en la Región Metropolitana de Bogotá..... 66
Figura 3-9: Localización de industria en Bogotá y el ámbito urbano para los años 2000 y 2010..... 68
Figura 3-10: Ejes de desarrollo de la Región Metropolitana de Bogotá 69

Figura 3-11: Área industrial en entorno metropolitano de Bogotá.....70
Figura 3-12: Expresión de las externalidades en el corredor metropolitano de la Calle 13 de Bogotá 73
Figura 3-13: Corredores metropolitanos identificados 75
Figura 3-14: Asignación de flujos de carga 76
Figura 3-15: Cantidad de agentes contaminantes en el total de viajes de carga metropolitanos del 2019.....82
Figura 3-16: Participación de los municipios en el PIB de la Región Metropolitana 201684
Figura 3-17: Relación entre el PIB como indicador de actividad económica y viajes como indicador de movimiento de carga.....87
Figura 3-18: Relación entre el PIB como indicador de actividad económica y toneladas como indicador de movimiento de carga.....88
Figura 3-19: Expresión territorial de la siniestralidad vial como externalidad negativa del transporte de carga para el año 2019 89
Figura 3-20: Expresión territorial del impacto ambiental por contaminación atmosférica como externalidad negativa del transporte de carga para el año 2019.....90
Figura 3-21: Expresión territorial de la congestión como externalidad negativa del transporte de carga para el año 2019 91
Figura 3-22: Expresión territorial de la productividad económica como externalidad positiva del transporte de carga para el año 2019.....92
Figura 3-23: Áreas o regiones metropolitanas de Colombia.....100
Figura 4-1: ¿Por qué es importante analizar los efectos externos generados por el transporte?.....102
Figura 4-2: Escenarios para valuación de políticas públicas para reducción de emisiones del transporte de carga carretero en Colombia 110

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Expresiones de las externalidades del transporte de carga carretero 42
Tabla 2-2: Modelos estadísticos explicativos y predictivos por autor según Al-Haji..... 45
Tabla 3-1: Participación de las escalas territoriales en el movimiento de carga del año 2019 61
Tabla 3-2: Participación del transporte de carga en los siniestros viales con víctimas fatales en los municipios periféricos de la Región Metropolitana de Bogotá 79
Tabla 3-3: Participación del transporte de carga en los siniestros viales de Bogotá..... 79
Tabla 3-4: Tasa de siniestros viales por modo sobre corredores metropolitanos 80
Tabla 3-5: Inventario de emisiones de fuentes móviles para camiones..... 81
Tabla 3-6: Participación de los municipios en el PIB de la Región Metropolitana..... 84
Tabla 3-7: Valores promedio por siniestro al año 2019 93
Tabla 3-8: Valor de los efectos en la salud por variación de la emisión de una tonelada de contaminante (en miles de dólares por tonelada abatida) - estudio realizado en el 2003 94
Tabla 3-9: Indicadores de Emisión de agentes contaminantes y valor de los efectos en la salud por variación de la emisión de una tonelada de contaminante 95
Tabla 3-10: VOT de referencia..... 96
Tabla 3-11: Resultados de la estimación de externalidades del transporte de carga metropolitano 2019..... 97

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
K	Unidades de infraestructura	Unidad	1.1
E	Equipo móvil	Unidad	1.1
L	Personal	Unidad	1.1
F	Consumibles	Unidad	1.1
N	Otros activos	N/A	1.1
t	Tiempo	Minutos, horas	1.1
CMa_P	Costo Marginal de Producción	COP	1.1
CMa_S	Costo Marginal Social	COP	1.1
CG_P	Costo generalizado del productor	COP	1.2
C_{me}	Costo promedio	COP	1.2
C_S	Costo social	COP	1.4.1
C_p	Costo del productor	COP	1.4.1
C_u	Costo del usuario	COP	1.4.1
C_e	Costos externos	COP	1.4.1
W	Beneficio social del transporte	Pesos	1.4.1
Π	Beneficio del productor	Pesos	1.4.1
q	Producción	Ton	1.4.1
F	Fatalidades	Unidad	2.4.1
V	Vehículos	Unidad	2.4.1
P	Población	Unidad	2.4.1
T	Fatalidades/número de vehículos	Unidad/vehículos	2.4.1
T_f	Punto de cruce con el eje T	Unidad/vehículos	2.4.1
M_0	Tasa máxima de motorización	Tasa de vehículos/1000 habitantes	2.4.1
Ces	Costos externos de los siniestros	COP	2.4.1
S_D	Siniestros sólo daños	Unidad	2.4.1
S_H	Siniestros con heridos	Unidad	2.4.1
S_F	Siniestros con fatalidades	Unidad	2.4.1
Ve	Valor estadístico de los siniestros	COP	2.4.1
Ceg	Costo de la contaminación por emisiones	COP	2.4.2
βi	Costo monetario de la polución	COP	2.4.2
Q	Flujo vehicular	Unidad	2.4.2

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
FEi	Factor de emisión	g/km	2.4.2
L	Longitud de arco	km	2.4.2
Cec	Costo de la externalidad de la congestión	COP	2.4.3
ΔT	Diferencias de tiempo	Horas, minutos	2.4.3
C_x	Consumo extra de combustible	gal/km	2.4.3
VOT	Valor del Tiempo	COP/min	2.4.3
Cea	Costo de externalidades la producción	COP	2.4.4

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ANSV	Agencia Nacional de Seguridad Vial
AMVA	Área Metropolitana de Medellín
BAU	Business As Usual
CA	Camiones articulados
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CU	Camiones unitarios
CO_2	Dióxido de Carbono
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DANE	Departamento Nacional de Estadística
ICTCC	Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera
NOX	Óxido Nítrico
O-D	Origen - destino
OMS	Organización Mundial de la Salud
PIB	Producto Interno Bruto
PM 2.5	Materia particulada de diámetro de 2.5 micrómetros
PM10	Materia particulada de diámetro de 10 micrómetros
RMB	Región Metropolitana de Bogotá
RNDC	Registro Nacional de Despachos de Carga
SDM	Secretaria Distrital de Movilidad
SDA	Secretaria Distrital de Ambiente
SICE-TAC	Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga
SOAT	Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito el caso de Colombia
SOX	Óxido de Azufre
VEV	Valor Estadístico de la Vida
VOC	Agente contaminante
VOT	Valor del Tiempo

Introducción

El transporte de carga en particular tiene dos contextos que se traducen en costos del transporte, uno asociado con externalidades positivas en términos de producción económica en la región, el país y el sector privado, y el otro en términos de externalidades negativas sobre el entorno, la movilidad y la sociedad. La decisión sobre cómo y quién debe pagar los costos externos para cubrir el costo social del transporte en su totalidad es una de las decisiones de mayor relevancia dentro de la política económica del transporte. En la actualidad, es común que los costos externos no se internalicen, es decir, que las empresas prestadoras de servicios de transporte que generan externalidades negativas no retribuyan o compensen los perjuicios a la sociedad. Sin embargo, una posición ideal sería lograr realizar una medición y valoración de las externalidades para internalizarlas dentro de los costos del transporte.

Las externalidades del transporte son costos reales que no están incluidos en el precio del mercado de transporte, por lo tanto, no son pagados por el usuario. El no considerar los costos externos constituye una falla del mercado que podría contrarrestarse con la intervención estatal mediante impuestos y regulaciones para facilitar la internalización de estos costos. Sin embargo, dado que es difícil estimar y valorar la magnitud exacta de los costos externos, la mejor política de intervención no es fácil de determinar. Por este motivo, los costos externos han sido centro de diversos debates, que van desde la introducción o no de la fijación de pagos por congestión, por ejemplo, hasta la promoción de vehículos con combustibles alternativos y límites de velocidad en autopistas.

El propósito de esta investigación es **desarrollar un modelo conceptual, metodológico y aplicado para identificar, estimar y valorar las externalidades del transporte de carga en un entorno metropolitano, tomando como referencia el caso de la Región Metropolitana de Bogotá**, con miras a generar un aporte a la política económica del transporte, de manera que este modelo sea una herramienta base para la internalización

de externalidades, el seguimiento al desempeño del transporte de carga, la toma de decisiones y la optimización de la logística metropolitana.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación se centrará en las externalidades económicas de tipo tecnológico, las negativas entre las que se consideran las tres básicas que se abordan típicamente desde ingeniería de transporte (congestión, siniestralidad vial, y contaminación) y otras positivas como la producción económica. Se destaca en este caso que, no existe un referente para la medición y valoración económica de estas externalidades y de manera análoga no se encuentran mecanismos o herramientas para internalizar los costos asociados a las externalidades del transporte de carga puntualmente en entornos metropolitanos.

En consecuencia, los costos de las externalidades en la actualidad los está asumiendo la sociedad, ya que no se incluyen directamente en el cálculo de los costos del transporte bajo la noción de costo social, lo que permite que surjan las siguientes preguntas: ¿Se están pagando en su totalidad los costos sociales del transporte de carga? ¿Quién debe pagarlos? ¿Existen mecanismos de medición de externalidades adecuados a un contexto metropolitano? Estos cuestionamientos llevaron a la formulación de la pregunta de investigación: **¿Cómo generar mecanismos para valorar e internalizar los costos asociados a las externalidades negativas del transporte de carga en entornos metropolitanos?**

El desarrollo de este documento se aborda en 4 capítulos con el fin de dar respuesta a la pregunta que dio origen a la investigación. En el primer capítulo, se desarrolló el planteamiento de un modelo conceptual tomando como base la noción de costo social del transporte para la caracterización del funcionamiento y organización del transporte de carga, que permitió identificar las externalidades en entornos metropolitanos como soporte del modelo.

En el segundo capítulo, se realizó la exploración de las metodologías para la estimación de externalidades, de manera que se seleccionó la más adecuada y se ajustó al caso metropolitano tomando las existentes como referente. Los conceptos base para el planteamiento del modelo son la **transferencia de externalidades** entre las jurisdicciones de las regiones metropolitanas, el **transporte de carga como externalidad** de la

configuración territorial y a su vez como **generador de externalidades con expresión en las diferentes escalas o ámbitos territoriales**.

El tercer capítulo está dedicado a la aplicación de la metodología propuesta en el segundo capítulo, la estimación de las externalidades constituyó el input para el desarrollo de un modelo basado en métodos estadísticos y econométricos que permitieron su valoración. Para realizar esto, se tomaron como referencia datos de los 20 municipios que hacen parte de la Región Metropolitana de Bogotá, de acuerdo con la información disponible para evaluar y validar la propuesta del modelo conceptual y metodológico propuesto.

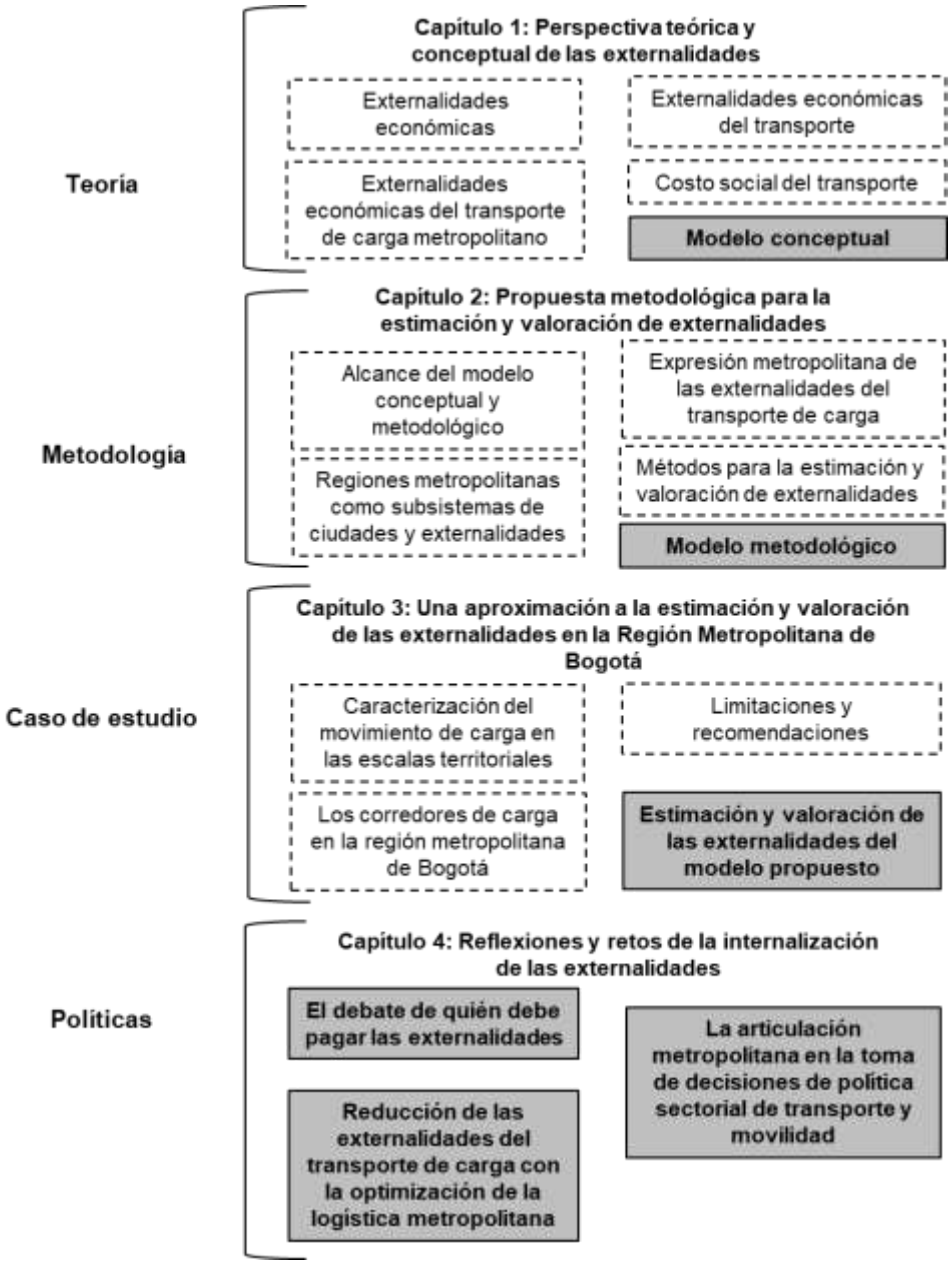
En el cuarto capítulo, se buscó mediante una disertación discutir los resultados del modelo, generando pautas y recomendaciones para desarrollar mecanismos de internalización para los costos asociados a las externalidades bajo la noción de costo social del transporte. Así mismo, se expone la necesidad de considerar las externalidades como factor de seguimiento del desempeño del transporte de carga y para la planificación de proyectos para la optimización de la logística (Arango, 2017). Adicionalmente, se recalca la utilidad del modelo propuesto como herramienta dirigida a los tomadores de decisiones en la formulación de la política pública para evitar los problemas identificados, como la transferencia de externalidades entre las ciudades núcleo de la Región Metropolitana y municipios metropolitanos.

Se cierra el documento con las conclusiones y recomendaciones, en las cuales se presenta una síntesis de los hallazgos y desarrollos propuestos, tanto conceptuales como metodológicos, para la estimación de las externalidades y los lineamientos para la aplicación de la metodología en otros metropolitanos. La disertación y los nuevos conceptos presentados en este documento llevaron a concluir que en la actualidad el costo social del transporte de carga en los entornos metropolitanos no se está pagando en su totalidad, dado que las externalidades negativas del transporte no son compensadas e internalizadas, como sería lo deseable. Esto se presenta porque no existen mecanismos de estimación de la magnitud de las externalidades adecuados, por lo que cuantificar su costo resulta difícil.

La virtud del modelo propuesto es que permite expresar todas externalidades en términos de costos, de manera que hace comparables sus impactos, y permite aislar el efecto de los vehículos asociados al transporte de carga en el ámbito metropolitano. Además, el

modelo metodológico tiene tres componentes fundamentales: permite estimar la magnitud de las externalidades, evaluar su expresión espacial en el territorio y finalmente valorar los efectos de las externalidades, en términos de costos externos que permiten complementar la ecuación ya conocida de costo social del transporte, la cual hasta el momento solo se abordaba incluyendo costos del productor y del usuario.

Estructura de la investigación



1. Perspectiva teórica y conceptual de las externalidades

Los costos del transporte se tienden a expresar desde dos enfoques distintos asociados a la producción y el consumo: uno en términos de los costos internos que incluyen los costos fijos y de operación y otros en términos de costos externos; estos últimos materializados en las externalidades positivas en términos de beneficios por la productividad económica de las regiones y el sector privado, y en las externalidades negativas sobre el entorno, la movilidad y la sociedad. La base de esta expresión de costos parte de reconocer el concepto de que los costos de transporte, en su agregado, son costos sociales. (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

La decisión sobre cómo se distribuye el pago de las externalidades para realizar una compensación social para cubrir el costo social del transporte en su totalidad es una de las decisiones más relevantes dentro de la política económica del transporte. En la actualidad una de las situaciones más comunes que no se internalizan los costos de las externalidades, es decir, que las empresas productoras de transporte que generan externalidades positivas y negativas no retribuyen los impactos que generan a la sociedad (De Rus, Campos, & Nombela, 2003). Es así como lograr realizar una adecuada estimación y valoración de las externalidades es determinante para internalizarlas dentro de los costos del transporte.

Para el caso de Colombia, es claro que el transporte de carga es fundamental en términos de competitividad, por ende, la fijación justa de precios y la sostenibilidad ambiental es un tema de debate, que se ajusta a la visión con la que en la Unión Europea y países de otros continentes perciben como significativo el estudio de las externalidades en miras a la regulación estatal y la optimización de los costos, esto bajo la noción de costo social del transporte. Sin embargo, también es claro que en Colombia el concepto de externalidades

no se ha abordado con la claridad conceptual con la que se debería y esto puede ser precisamente lo que no permite que se consideren estos costos dentro del costo total del transporte.

Particularmente para los municipios que hacen parte de una región o área metropolitana, el transporte de carga se ha convertido en un problema ya que son altos los volúmenes de vehículos pesados que circulan por los principales corredores, esto debido al creciente número de parques industriales y centros logísticos que se ubican en este ámbito territorial. (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

De acuerdo con lo anterior, **el propósito de este capítulo es desarrollar las bases de un modelo a partir de los elementos conceptuales y teóricos para la identificación de las expresiones de las externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos tomando como base la noción de costo social del transporte**. Esto en miras a **generar el soporte para el desarrollo de una metodología para la estimación y valoración de las externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos** que se desarrollará en el siguiente capítulo.

Es así, como este capítulo se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta el desarrollo del concepto de externalidades económicas, seguido a esto se aborda el anterior concepto aterrizado al transporte en general, como tercer elemento se desarrolla el concepto de externalidades económicas particularizado al transporte de carga, abordando posterior a esto la noción de costo social del transporte de carga, para finalmente presentar un modelo conceptual que sintetiza los elementos desarrollados en los numerales anteriores.

1.1 Externalidades económicas

Para empezar, es necesario hacer referencia al concepto de economías externas que se definen como “efectos que resultan de la producción o el consumo de un bien o servicio por un actor económico cuando dicha producción genera beneficios o perjuicios sin que este tenga que compartir o compensar los costos” (Button, 2010, pág. 62), a continuación, se precisa una definición desde otro autor que complementa la anterior:

> Una externalidad se produce cuando un agente lleva a cabo una acción de la cual se derivan unos efectos (positivos o negativos) que tienen un impacto en forma de beneficios o costes sobre otros agentes. La característica básica de una externalidad es que el agente causante de los efectos externos no está obligado a realizar ningún pago en concepto de indemnización a los afectados a quienes ha impuesto costes, o no tiene derecho a recibir una compensación por los beneficios generados. (De Rus, Campos, & Nombela, 2003, pág. 363).

Sin embargo, no existe un acuerdo sobre la naturaleza y forma de las externalidades, así como las razones del desentendimiento general con respecto a estas. Así mismo, se interpreta que las economías externas son una causa de la divergencia entre el beneficio privado y el beneficio social y, por tanto, del fracaso de la competencia perfecta para conducir a una situación óptima en la relación producción/consumo. (Scitovsky, 1959)

La anterior definición permite evidenciar el abordaje que se le puede dar a los costos externos como una expresión de las externalidades negativas y positivas según sea el caso. Adicionalmente, se precisa que el concepto de costo externo tiene un sentido completo de externalidad desde las aproximaciones de los mercados de transporte. Es en el llamado enfoque neoclásico[1], *mainstream*, de mercados de bienes públicos y privados, donde toma la relevancia del uso de funciones de utilidad y funciones de producción aplicadas a bienes privados y bienes públicos en competencia perfecta. (Proost, 2011)

Según De Rus, Campos & Nombela (2003) “una externalidad se produce cuando un agente lleva a cabo una acción de la cual se derivan unos efectos (positivos o negativos) que tienen un impacto en forma de beneficios o costos sobre otros agentes” (pág. 363). Por su parte, en línea con lo anterior Button indica formalmente que las externalidades económicas existen cuando las actividades de un grupo afectan las de otro grupo sin que haya un pago o compensación. (Button, 2010)

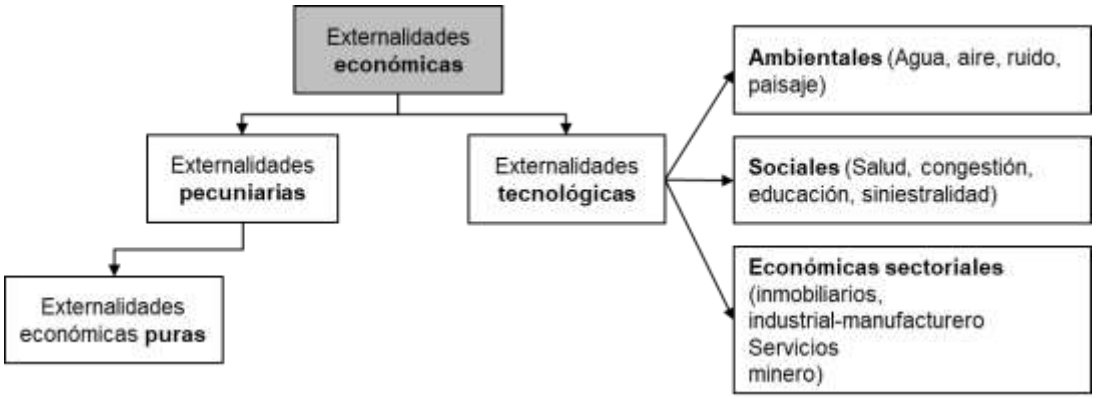
---

[1] La teoría económica neoclásica es un concepto utilizado para referirse a un enfoque económico que intenta integrar en el análisis marginalista (en la última unidad producida o pérdida de un bien) algunas de las percepciones provenientes de la economía clásica.

Estas tentativas incluyen: la consideración tanto de la oferta como la demanda en la determinación de los precios, la importancia del dinero en asuntos económicos, los neoclásicos extendieron el análisis económico a otras situaciones consideradas tanto por los clásicos como los marginalistas, es decir, examinaron situaciones de competencia perfecta y competencia imperfecta (monopolio, duopolio).

En la Figura 1-1 se presenta el abordaje conceptual de las externalidades que se plantea desde la presente investigación (que puede variar frente a otras clasificaciones), de esta manera se reconocen dos tipos de externalidades dentro de la teoría, en primer lugar, las externalidades pecuniarias o externalidades económicas "puras" en las cuales los mecanismos de transmisión son económicos vía precios o costos, y son de gran interés en el análisis de políticas públicas ya que aparecen en aquellas transacciones en las que los precios de los bienes y factores no reflejan los beneficios y costos sociales "directamente", significa entonces que la interacción es causada por medio de los precios de mercado. (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

Figura 1-1: Abordaje conceptual de las externalidades



Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se tienen las externalidades tecnológicas, las cuales no se producen por transacciones voluntarias, sino que la acción de un agente produce el efecto externo sobre otro agente que no participaba en la transacción de mercado. La mayoría de las externalidades son tecnológicas; es decir, los efectos indirectos repercuten en las oportunidades de consumo y producción de terceros, pero el precio del producto no refleja esas externalidades, ni los mecanismos de producción y consumo. (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

Para comprender de manera más específica las externalidades económicas de tipo tecnológico, se precisa que estas se asocian a la función de consumo y en mayor medida a la función de producción de un bien o servicio. De esta manera en la se presenta la Ecuación (1.1) función de consumo planteada por Varian (1994) compuesta por los bienes o servicios que generan utilidad y beneficios para el consumidor.

$$q = (q^1, \ldots., q^H) \quad (1.1)$$

Donde q representa la cantidad que se consume en función de los bienes o servicios que la componen q^1, q^H.

Por otra parte, la función de producción según lo plantean De Rus et al. (2003) se puede expresar de manera general como una función de producción de cualquier industria o actividad económica, tal como se presenta en la Ecuación (1.2), las externalidades tecnológicas se producen o se materializan asociadas al grado de participación y tipología de los factores que componen dicha función de producción:

$$q = f(K, E, L, F, N; t) \quad (1.2)$$

Donde:

- Producción (q): cantidad de servicios de transporte
- Infraestructura (K): unidades de infraestructura
- Equipo móvil (E): tipo de vehículo
- Personal (L): personal de apoyo operativo
- Consumibles que permitan el movimiento de los vehículos (F): Combustibles, repuestos, mantenimiento
- Otros activos (N): recursos naturales
- Consumo tiempo de los usuarios (t) mientras sus mercancías son trasladadas de un lugar a otro.

Es así como la diferencia concreta entre las dos categorías de externalidades planteadas, radica en que las de tipo pecuniario se generan y transmiten a través de mecanismos exclusivamente de mercado precios, costos, utilidad, beneficios, economías de escala, etc., mientras que las externalidades tecnológicas se presentan desde los factores y la tecnología de producción entre agentes, mercados y terceros.

Para ilustrar lo anterior, un ejemplo de externalidad pecuniaria sería un incremento de los precios de los combustibles por el aumento en los costos del petróleo, que se traduce directamente en los costos del transporte percibidos por los actores de dicho mercado, dado que el mecanismo de transmisión es puramente económico. Por otro lado, un ejemplo de externalidad tecnológica podría ser una nueva carretera que hace parte de la función de producción de un servicio de transporte, que podría irrumpir la visión de los residentes de un área como actores no involucrados en el mercando del servicio de transporte, afectando su función de utilidad que puede tener como factor el confort por la vista.

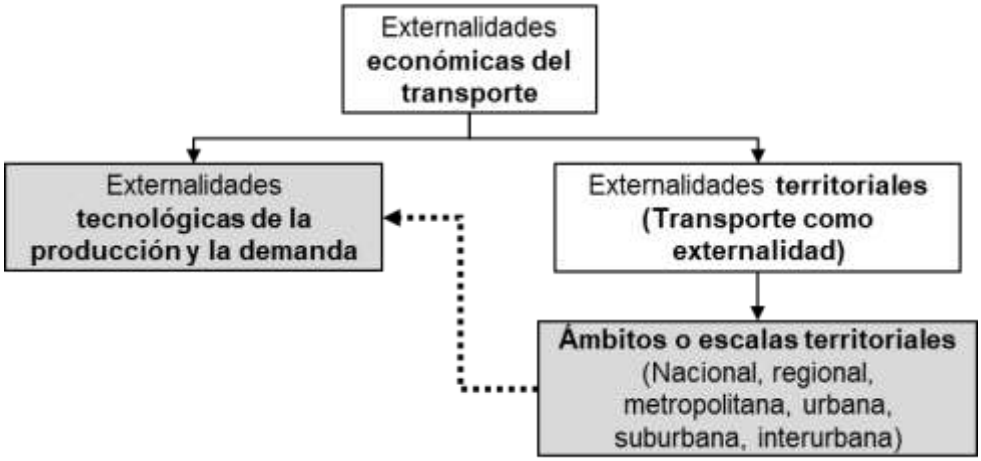
De acuerdo con lo anterior, las estimaciones de las externalidades pueden utilizarse para varios propósitos según lo indica Varian (1994): como un guía para una fijación de precios más eficiente económicamente, dado que el precio óptimo es igual al precio del mercado privado más los costos externos marginales estimados, en la cual el óptimo de producción de externalidades se alcanza cuando el costo marginal social (CMa_S) es igual al costo marginal de producción (CMa_P), como se precisará con un ejemplo más adelante; como una guía para asignar fondos de investigación y desarrollo para mitigar los mayores costos externos; como parte de un análisis costo - beneficio, análisis de inversión óptima en infraestructura; y como parte de análisis históricos o comparativos.

1.2 Externalidades económicas del transporte

De acuerdo con lo anterior, vale la pena resaltar que en la cadena de relaciones interindustriales, los servicios de transporte constituyen un eslabón estratégico para la satisfacción de necesidades sociales y económicas, de forma que cuando éstas se transforman, los servicios de transporte presentan nuevas facetas. Esta consideración estratégica del transporte justifica el interés de su estudio desde un punto de vista económico. (Fernández & Olmedillas Blanco, 2001).

Es así como en la Figura 1-2 se presentan las externalidades económicas particularizando el análisis en las asociadas al transporte, donde se pueden identificar dos tipos, las externalidades tecnológicas de la producción y la demanda, donde el transporte es una fuente de externalidades y por otro lado las externalidades territoriales en las cuáles el transporte se constituye como una externalidad territorial que puede tomar una connotación distinta en función de su ámbito o escala territorial.

Figura 1-2: Externalidades económicas del transporte



Fuente: Elaboración propia

En lo referente a externalidades económicas de tipo tecnológico del transporte Proost (2011) indica que cuando un bien o servicio genera una externalidad, se puede representar con un modelo económico de equilibrio parcial[2], el cual permite una representación explícita de la demanda para la externalidad generada por un bien o servicio y el posible efecto de retroalimentación de la externalidad sobre la demanda del bien o servicio (q).

Lo más apropiado es una representación donde la demanda del bien o servicio es una función del costo generalizado[3] (CG_P) del bien (q). En el caso de la competencia perfecta, el costo generalizado es igual a la suma del costo marginal de producción (CMa_P) más el costo del tiempo del viaje (t). Esta representación de la función de demanda permite incorporar fácilmente la retroalimentación efecto de la expresión y magnitud de la externalidad.

En el marco de lo anterior Proost (2011) utiliza esta técnica para ilustrar la externalidad de la congestión en la Figura 1-3, usando como ejemplo ilustrativo la congestión a través de la función del costo de tiempo lineal planteada para una capacidad de infraestructura dada

[2] El concepto del equilibrio parcial propone que la venta de lo que una cierta empresa o tipo de empresas producen (todos los bienes de cierto tipo disponible en el mercado) es independiente de la situación para otros bienes o en otras empresas o mercados. El paradigma básico es que los precios se ajustan hasta que la oferta iguala a la demanda.

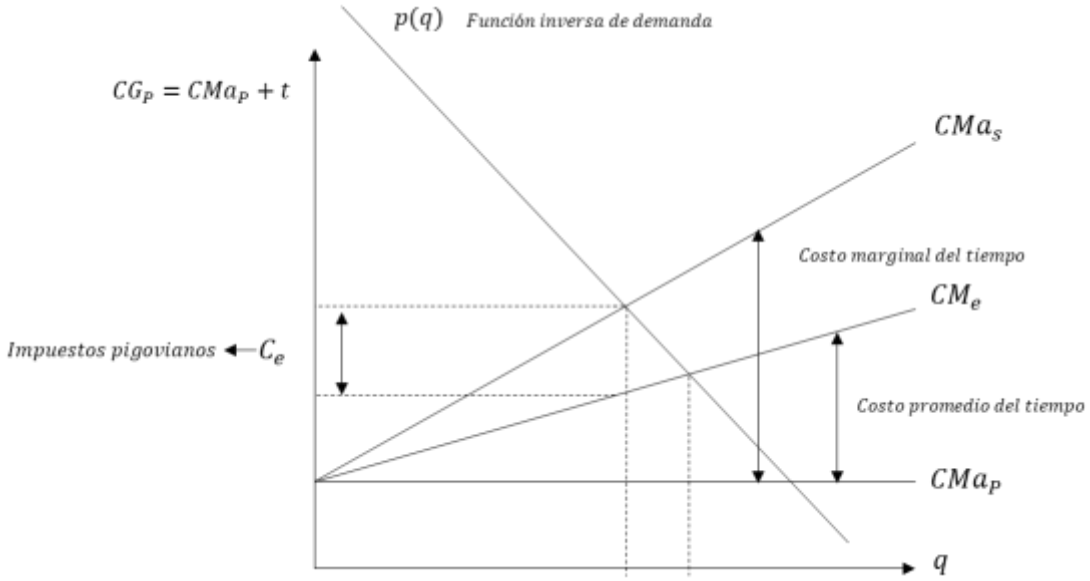
[3] La noción de costo generalizado se usa en transporte, ya sea como costo generalizado de transporte, o como precio generalizado de transporte, cuyo uso dependen del análisis económico que se esté haciendo.

cuando aumenta el uso general, aplicado al caso de una infraestructura carretera utilizada por automóviles. Donde la noción de (CG_P) se adapta mejor a la de precio, tomando la regla neoclásica de que los precios deberían igualar a los costos marginales de producción en competencia perfecta.

Esto genera un nivel de uso q_2 cuando no se internaliza la externalidad, por lo que la disposición a pagar por la última unidad de uso del automóvil es igual a la suma del costo marginal de producción (CMa_P) y el costo promedio del tiempo para un viaje. La externalidad es la pérdida de tiempo adicional impuesta por el usuario de un automóvil a todos los demás usuarios. El costo del tiempo promedio está aumentando y esto significa que un usuario adicional impone este aumento en el costo del tiempo promedio para todos los demás usuarios lo que constituye el costo marginal social (CMa_S). El aumento total de los costos de tiempo para todos los conductores cuando hay un conductor adicional es igual al costo de tiempo marginal.

Es entonces, el costo externo marginal la diferencia entre el costo de tiempo marginal y el costo de tiempo promedio porque el costo de tiempo promedio ya es pagado por el usuario. En términos del modelo de equilibrio general se tiene que, para cada individuo, la disposición a pagar el viaje en automóvil (función de demanda) es igual a su costo de producción marginal + costo de tiempo promedio + costo externo marginal (el aumento en el costo de tiempo promedio impuesto a todos los demás conductores). Esto genera un primer equilibrio en el punto q_1. El mismo modelo simplificado puede usarse para discutir otros tipos de externalidades: contaminación del aire, cambio climático, ruido, siniestros, etc.

Figura 1-3: Representación de equilibrio parcial de la externalidad de congestión

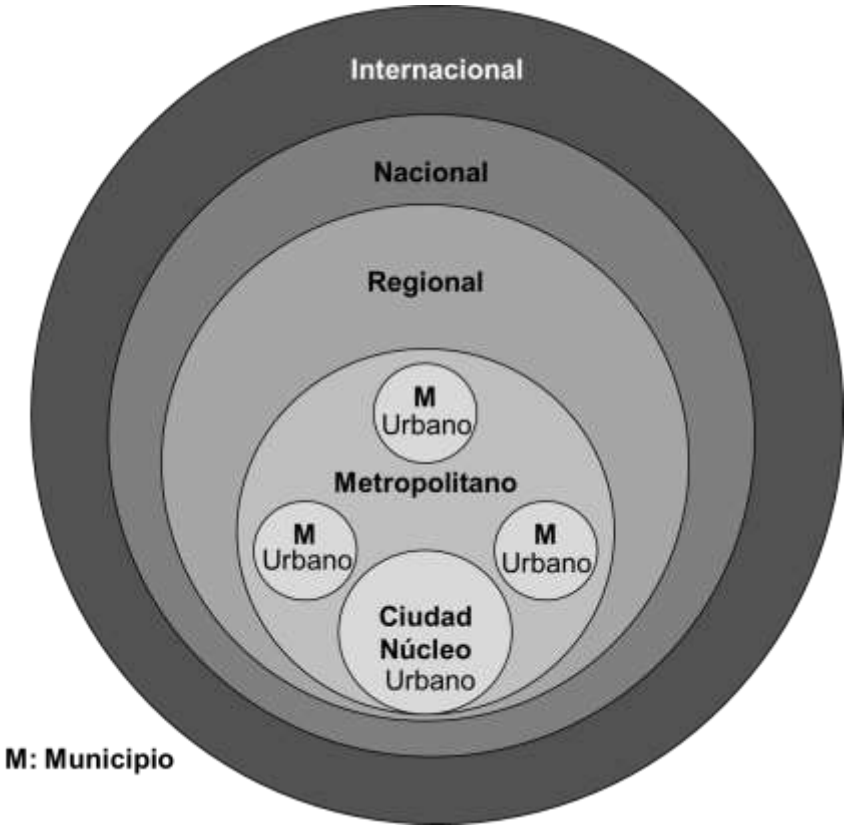


Fuente: Adaptado de (Proost, 2011, pág. 327)

En cuanto al enfoque de las externalidades territoriales se debe reconocer que estas pueden tener magnitudes y expresiones en los distintos ámbitos territoriales como se presenta en la Figura 1-4, incluso podría incluirse una escala internacional, pero para efectos del presente análisis no se incluye.

Un ejemplo de las expresiones de las externalidades en los diferentes ámbitos territoriales se presenta de la siguiente manera aplicado al caso del transporte de carga intermunicipal en Colombia. Existen trayectos de larga distancia como por ejemplo, Cartagena – Bogotá cubiertos por el transporte de carga para los cuales existen diferentes tipos de carga y vehículos específicos que finalizan su trayecto en algunos casos en la zona urbana de Bogotá, pero en su mayoría en los centros logísticos e industriales que se han localizado en el entorno metropolitano de Bogotá, a su vez es en esta escala en la que se realiza todo un cambio de logística y se lleva la carga en vehículos más pequeños para incorporarse a la logística urbana y cambia mucha de la carga que antes era materia prima a productos manufacturados.

Figura 1-4: Ámbitos territoriales de las externalidades del transporte



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, se identifica que las externalidades de transporte de todos los ámbitos territoriales confluyen en entornos metropolitanos, dada la connotación que estos han tomado en función de la configuración del territorio como centros de industria y logística, fenómeno que ocurre en la gran mayoría de regiones o áreas metropolitanas del país.

1.3 Externalidades económicas del transporte de carga metropolitano

Cada ámbito territorial puede generar un análisis distinto de las externalidades del transporte de tipo tecnológico, particularmente, la presente investigación se concentra en el abordaje conceptual y metodológico de la expresión de las externalidades en el ámbito metropolitano, dado que estas son consecuencia de las dinámicas de actividad económica y de movilidad que se presentan entre una Ciudad Núcleo y los municipios aledaños,

resultado de los efectos espaciales asociados a las economías de aglomeración, de red, y de alcance propias de un ámbito metropolitano como se explicará más adelante retomando las ideas de Ruiz (2015).

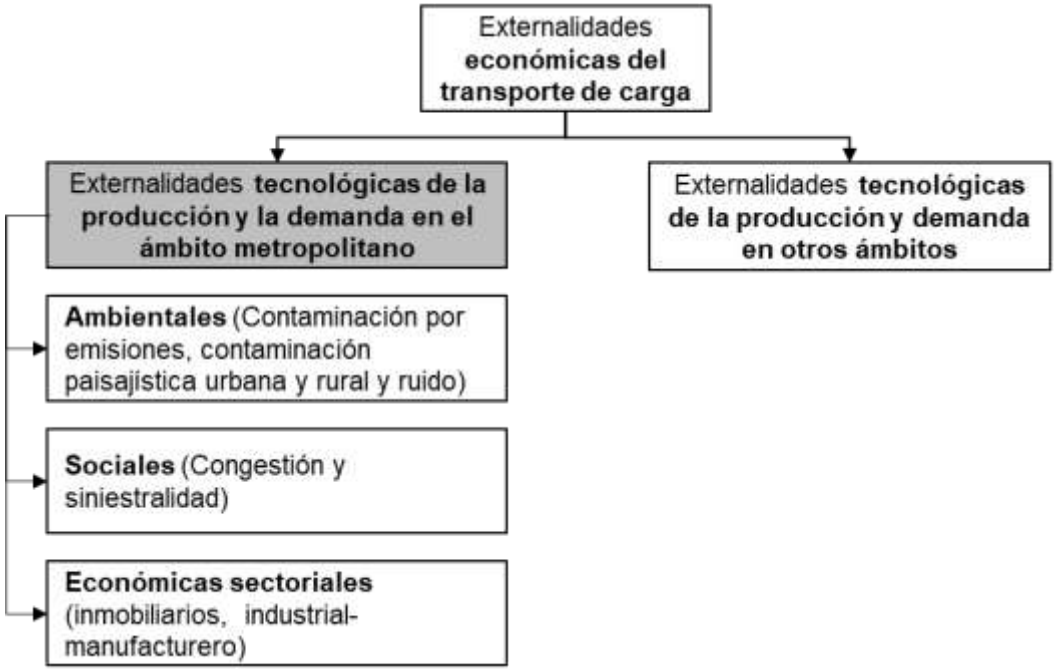
Es así como en la Figura 1-5 se presenta el abordaje conceptual de las externalidades económicas del transporte aterrizando su análisis a las regiones o áreas metropolitanas particularizando el enfoque sobre el transporte de carga. Lo que se evidencia, es que incluir el ámbito territorial en el análisis de las externalidades e identificar las asociadas al transporte de carga carretero en dicho ámbito es un reto, dado que por un lado se deben separar las expresiones de estas según la escala territorial del viaje que las produzca y por otro lado se debe tener en cuenta que en el ámbito metropolitano confluyen de otras tipologías vehiculares como el transporte intermunicipal, bicicletas y vehículos particulares, entre otros.

De manera que al realizar una evaluación de externalidades sobre un corredor que es el espacio físico en el que se expresa directamente el impacto de una externalidad, sea claro quién la produjo, bajo qué condiciones y cuál es la escala territorial del viaje que la origina.

De acuerdo con lo anterior, las externalidades tecnológicas del transporte de carga en el ámbito metropolitano y urbano pueden tener expresión ambiental, social y de economía sectorial, es decir, se aplican en varios sectores como el inmobiliario, el productivo, industrial, y manufacturero, entre otros, las cuales a la larga tienen una valoración económica (Kairuz D., 2014). El enfoque fundamental de la presente investigación son las externalidades tecnológicas desde la ingeniería de transporte, reconociendo que el concepto de escala o ámbito territorial las condiciona.

Es así como se recalca que la externalidad se percibe en función del ámbito territorial, es decir, cómo se expresa en el territorio, por ejemplo, una externalidad como la congestión o la contaminación atmosférica asociada al transporte de carga que se percibe fuertemente en el entorno urbano o metropolitano puede llegar a ser imperceptible en una escala nacional o viceversa, esto asociado a la relación entre la magnitud de la externalidad, la escala territorial en la que se manifiesta y las dinámicas de movilidad que se presentan.

Figura 1-5: Externalidades económicas del transporte de carga metropolitano



Fuente: Elaboración propia

La metropolización como fenómeno de estructuración espacial urbana implica la formación de unas dinámicas económicas que tienden a reconfigurar los territorios que conllevan en la mayoría de los casos a una fragmentación jurisdiccional y funcional, por lo que la capacidad de intervención pública se ve limitada por la competencia y el traslapo entre estas (Ruiz, 2015). Justo este último elemento representa una dificultad adicional a la hora de plantear políticas o estrategias para internalizar los costos de las externalidades del transporte, ya que en una región o área metropolitana se deberán tener en cuenta competencias de jurisdicción a diferencia de las escalas urbanas o nacionales.

De acuerdo con lo anterior, se resalta que el estudio de las externalidades del transporte de carga en el ámbito metropolitano toma relevancia dadas las relaciones logísticas y la concentración de la industria que definen los flujos de generación y atracción del transporte de carga en particular en las periferias de las grandes centralidades.

Para entender esto es necesario evidenciar que hay un incentivo para concentrar la producción de cada variedad en una sola región; debido a los costos de transporte (el resto se mantiene constante), es más rentable producir en la región que proporciona un mayor

mercado y transportar los productos desde allí a la otra región. Esto supone la disponibilidad de incluso más variedades de bienes diferenciados en la región en cuestión. A partir de esto vale la pena incorporar el término de la geografía económica denominado fuerza centrípeta, la cual se genera a través de causalidad circular de conexiones hacia delante (el incentivo de los trabajadores de estar cerca de los productores de bienes de consumo) y conexiones hacia atrás (el incentivo de los productores de concentrarse donde el mercado es mayor) (Fujita & Krugman, 2004).

Las fuerzas centrípetas se pueden relacionar con las externalidades positivas y contribuyen a la aglomeración y al crecimiento. Las fuerzas centrifugas por otra parte, se asocian a las externalidades negativas ya que contrario a las centrípetas favorecen la dispersión (Krugman, 1992). El abordaje de estos hechos se realiza para evidenciar cual es el rol de los costos del transporte en las formaciones metropolitanas, factores de los costos del transporte y la interpretación de las externalidades en el proceso de formación metropolitano.

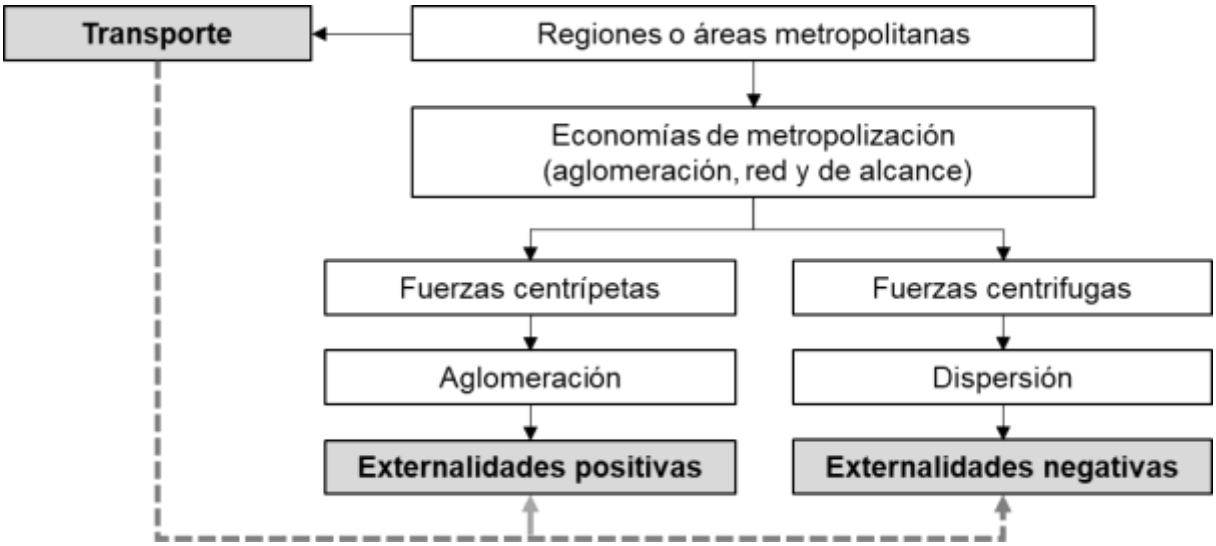
Por lo anterior, se considera la metropolización como un proceso de estructuración espacial en el cual las fronteras no son claramente identificables ni en tiempo ni en espacio, dado que es resultado de las activas dinámicas demográficas y económicas dadas entre una Ciudad Núcleo y las aglomeraciones vecinas (municipios). De manera específica se considera como lo precisó Ruiz (2015):

> Un proceso complejo de ruptura de la estructura geográfica de una aglomeración urbana, la cual converge a una estructura en la que se comparten relaciones funcionales entre varias ciudades que tienden a conformar una unidad geográfica más amplia y compleja. Esta unidad conformada por una Ciudad Núcleo y las ciudades metropolizadas tiende a compartir y presentar espacios rurales o suburbanos sin que necesariamente haya una fusión (conurbación) entre todo el conjunto de ciudades. (págs. 56-57)

Es así como en la Figura 1-6 se presenta la síntesis de la conceptualización de las externalidades realizada hasta el momento, donde se destaca un concepto desarrollado por Ruiz (2015), “Economías metropolitanas” que resultan de la jerarquía entre la Ciudad Núcleo de una región o área metropolitana y los municipios aledaños. Dicha jerarquía expresa la magnitud de las fuerzas que permiten la concentración de la actividad

económica mediante procesos acumulativos, evidenciando la ocurrencia simultanea de economías (deseconomías) de aglomeración - dispersión, de red y de alcance[4], estas se generan al interior de las áreas metropolitanas en forma de externalidades territoriales positivas y negativas inter jurisdiccionales, tanto de producción económica como de la misma actividad fiscal que impulsa el sector público en el cumplimiento de sus funciones de Estado, muchas veces ante la presencia de economías de escala. Por lo tanto, el resultado que se esperaría, es que los gobiernos locales impactados por estos fenómenos metropolitanos pudiesen aprovechar las externalidades positivas y reducir los efectos de las negativas. (Ruiz, 2015)

Figura 1-6: Expresiones de las externalidades en el entorno metropolitano



Fuente: Elaboración propia a partir de (Fujita & Krugman, 2004)

1.4 Costo social del transporte de carga

Para comprender las externalidades económicas de tipo tecnológico del transporte de carga en el ámbito metropolitano, es necesario abordar la noción de costo social del transporte de carga y comprender la estructura del mercado, iniciando por destacar que la producción del transporte de carga se da a partir de empresas que poseen un equipo móvil que se insertan en un mercado de demanda de transporte que, si bien está sometido bajo

[4] Para un revisión detallada y muy ilustrativa de la forma y la expresión de esta triple ocurrencia de economías y deseconomías, en un marco de redes de ciudades, se puede leer el capítulo 4 de (Boix, 2003, págs. 59 - 78).

una regulación pública, se hace entre privados y para privados. En dicho mercado, la demanda de transporte se entiende como la disposición que tienen a pagar los generadores de carga (consumidores) por hacer uso del servicio de transporte público de carga que es ofertado por una empresa transportadora (productores).

En general el transporte de mercancías se puede realizar en modo férreo, marítimo, fluvial, aéreo y carretero, en particular la presente investigación se centra en el último modo dado que es el que predomina en las áreas o regiones metropolitanas. Por lo que a continuación, se presenta el detalle de la estructura del mercado del transporte de carga carretero y como se incorporan los costos de las externalidades en la política nacional y en el contexto internacional.

1.4.1 Mercado del transporte de carga

La estructura de un mercado de transporte puede definirse como el modelo de organización a través del cual se realiza la producción final de los servicios. Es así como en la relación producción - demanda existen actores y agentes que hacen parte de la estructura de mercado del transporte de carga, donde se pueden identificar básicamente dos principales demandantes y oferentes, los cuales se someten ante agentes reguladores y controladores del servicio de transporte de carga[5] como se indica en la Figura 1-7.

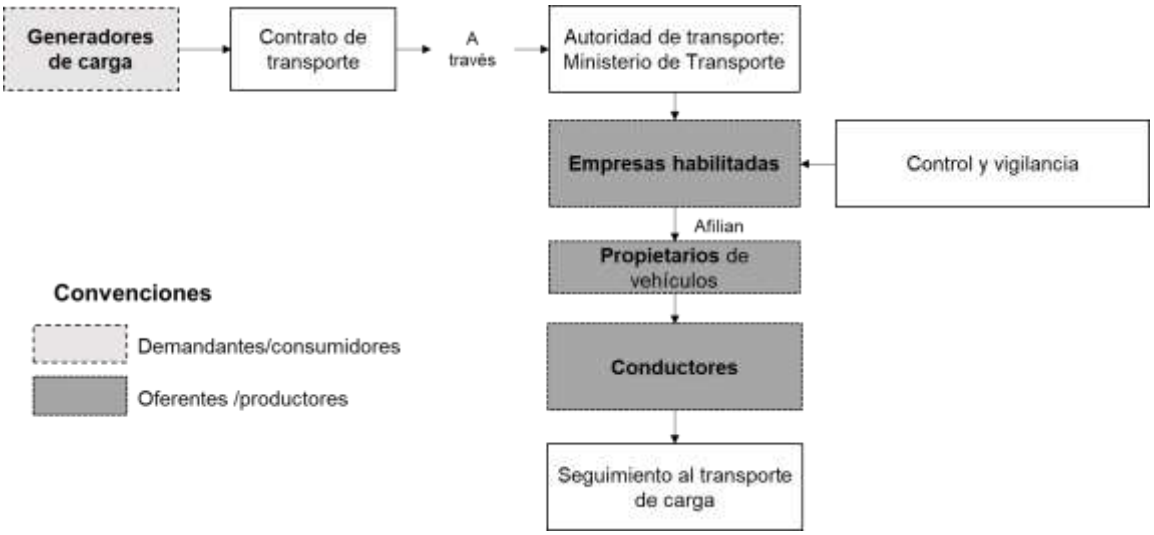
En el mercado de transporte, la demanda se ve condicionada por las facilidades de conexión entre los orígenes y destinos, en donde en la actualidad para el caso particular de Colombia, el principal modo de transporte es el carretero debido a que es el que cuenta con infraestructura completa. El número de viajes que requiere hacer una empresa generadora para mover un número de toneladas (demanda de transporte desagregada), se expresa como la decisión individual, por hacer uso del servicio de transporte público de carga versus el uso de otro modo de transporte.

En este caso la demanda desagregada depende de: el precio de un viaje, los ingresos de

[5] Es importante mencionar que esta estructura de mercado es común en la mayoría de países, en el caso de Colombia el Decreto 173 de 2001 presenta esta estructura como objeto reglamentar la habilitación de las empresas de Transporte Público Terrestre Automotor de Carga y la prestación por parte de estas, de un servicio eficiente, seguro, oportuno y económico, bajo los criterios básicos de cumplimiento de los principios rectores del transporte, como el de la libre competencia y el de la iniciativa privada.

la empresa generadora de carga, así como la experiencia de la empresa en el mercado, el tipo de empresa según su tamaño y la carga generada. A su vez, la demanda individual de transporte público de carga, puede asociarse a la calidad del servicio, como integridad de los productos transportados, frecuencia para tomar el servicio, tiempos de entrega o el tiempo de transporte que se convierte en un elemento fundamental para la decisión de transportar.

Figura 1-7: Actores y agentes en el transporte de carga



Fuente: Elaboración propia

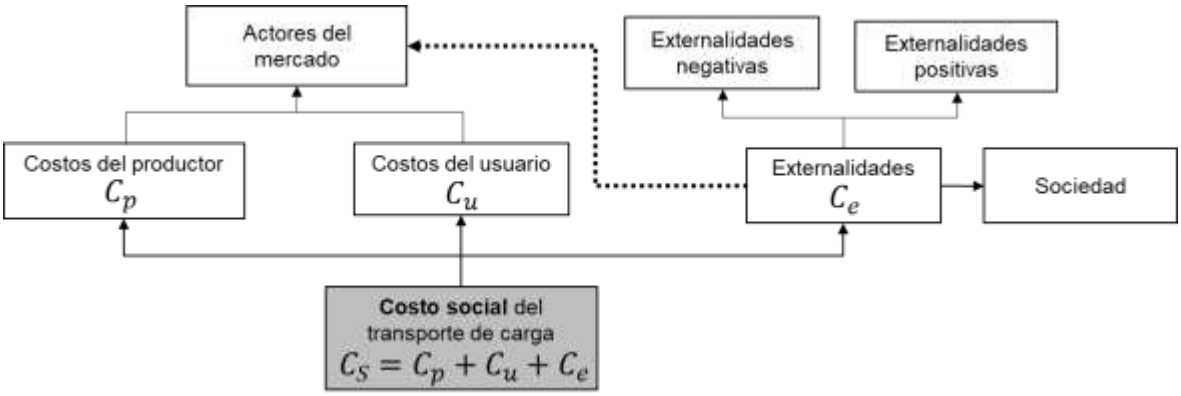
El estudio de la generación de carga, como un número de viajes, permite relacionar las salidas y los costos tomados por las empresas transportadoras considerando las preferencias de los generadores de carga, tanto a nivel agregado (sociedad) o desagregado (individuo), mostrando las diferencias del servicio de transporte respecto a otras actividades económicas.

En el caso del transporte de carga entre distintos lugares no solamente se consumen ciertas cantidades de factores productivos tradicionales (por ejemplo, camiones, conductores y combustible), sino que también forman una parte notable del costo del transporte el tiempo que tarda la carga en llegar en cada viaje y el impacto que dicho transporte impone a otros, en forma de contaminación, alteración del medio ambiente o pérdidas humanas y materiales como consecuencia de los siniestros (De Rus, Campos, & Nombela, 2003). Por lo tanto, resulta fundamental entender el concepto de externalidad,

acotarlo y definirlo con el fin de incluirlo dentro de los costos del transporte para llegar al análisis bajo la noción de costo social del transporte.

De acuerdo con lo anterior, en la producción de servicios de transporte se generan tres tipos de costos (Figura 1-8) teniendo en cuenta sobre quién recaen los mismos: los del productor o transportista (C_P), los de los usuarios al utilizar el servicio (C_u) y los costos externos (C_e) que recaen sobre otros miembros de la sociedad, conceptos que se abordan a continuación. La suma de estos tres tipos de costos, netos de posibles transferencias entre las tres partes, proporciona el costo social total (C_S) al que una sociedad debe hacer frente para disfrutar de cierto nivel de prestación de servicios de transporte (De Rus, Campos, & Nombela, 2003).

Figura 1-8: Elementos que componen el costo social del transporte



Fuente: Elaboración propia a partir de De Rus et al. (2003).

A continuación, a partir de lo planteado por De Rus et al. (2003) se representa a través de la Ecuación (1.3) la noción de costos sociales:

$$C_S = C_p + C_u + C_e \quad (1.3)$$

Esto se puede desarrollar haciendo referencia al beneficio social representado en la Ecuación (1.4):

$$W(q) = \Pi(q) - C_e(q) \quad (1.4)$$

Donde $W(q)$ representa el beneficio social por cada unidad de transporte producida, que resulta de la restar los costos de las externalidades $C_e(q)$ al beneficio del productor $\Pi(q)$. Esta expresión puede generalizarse incluyendo no solo las externalidades negativas

($C_e(q)$) sino también las externalidades positivas, que se expresan como beneficios externos $C_e{}^+(q)$ como se presenta en la Ecuación (1.5):

$$W(q) = \Pi(q) - C_e(q) + C_e{}^+(q) \quad (1.5)$$

Esta ecuación se puede escribir en otros términos desglosando los factores que componen el beneficio neto del productor como se presenta en la Ecuación (1.6), donde el beneficio social se entiende como el excedente del productor, para efectos del análisis desde el beneficio privado.

$$W(q) = \left[p(q) - C_p(q)\right] - C_e(q) + C_e{}^+(q) \quad (1.6)$$

Optimizando la función $W(q) = 0$ se obtiene la cantidad de transporte (q) ideal para garantizar beneficios para los productores y una afectación aceptable en términos de externalidades negativas para la sociedad, llegando a la expresión de la Ecuación (1.7):

$$p + \frac{dp}{dq}q - \frac{dC}{dq} = \frac{dC_e}{dq} - \frac{dC_e{}^+}{dq} \quad (1.7)$$

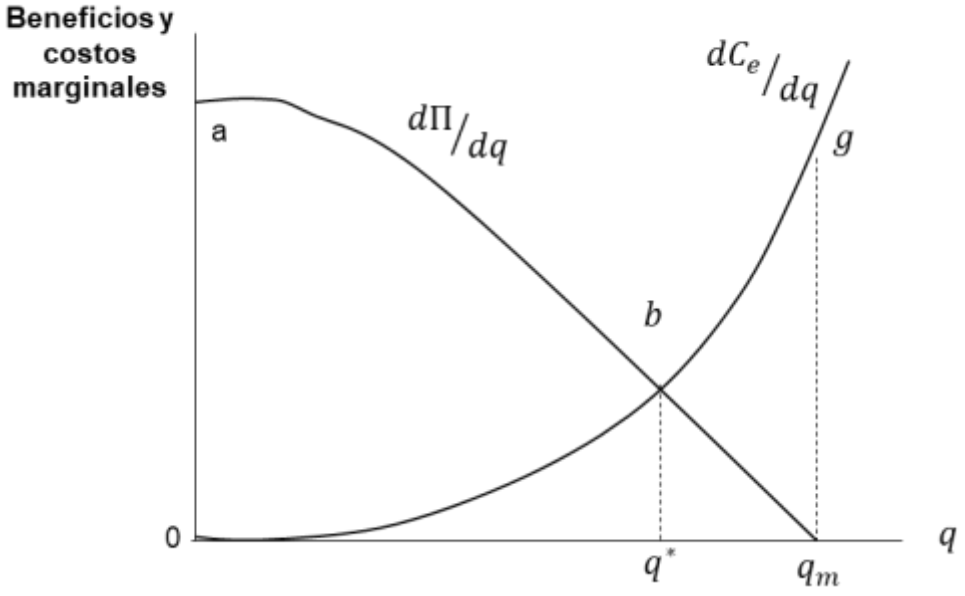
La mejor alternativa para la sociedad sería tomar en consideración los costos externos $C_e(q)$ y determinar un nivel óptimo de actividad, que vendría dado al maximizar el beneficio social (denotado por W), definido en este contexto como la suma del beneficio privado de la empresa y el costo externo Ecuación (1.6). Derivando esta expresión se obtiene que el nivel de producción socialmente óptimo, $q*$ que se presenta en la Figura 1-9, se determina por la regla de igualar el beneficio marginal privado con el coste marginal externo a partir de la Ecuación (1.7) o lo que es lo mismo, igualando el ingreso marginal privado a la suma de todos los costes marginales sociales (privados y externos).

Es así como pueden identificarse gráficamente los equilibrios privado y social obtenidos. Se representan conjuntamente la curva de beneficio marginal para la empresa privada $(d\Pi/dq)$, y la curva de costo marginal externo (dC_e/dq), siendo esta última creciente y convexa de acuerdo con los supuestos realizados.

La empresa privada desearía producir qm, ya que en esa situación obtiene el máximo nivel de beneficio de monopolista. Éste sería igual al área aqm0 de la figura que se presenta a continuación, ya que la curva correspondiente representa el beneficio marginal y el área por debajo de ella expresa el beneficio total obtenido para cada nivel de producción. Cuando se trata de un mercado en competencia como ocurre en el transporte de carga

carretero, el análisis gráfico sería igualmente posible, aunque el nivel de producción privado respondería entonces a la regla precio igual al costo marginal y estaría a la derecha de qm.

Figura 1-9: Producción de la externalidad negativa



Fuente: Adaptado de De Rus et al. (2003, pág. 381)

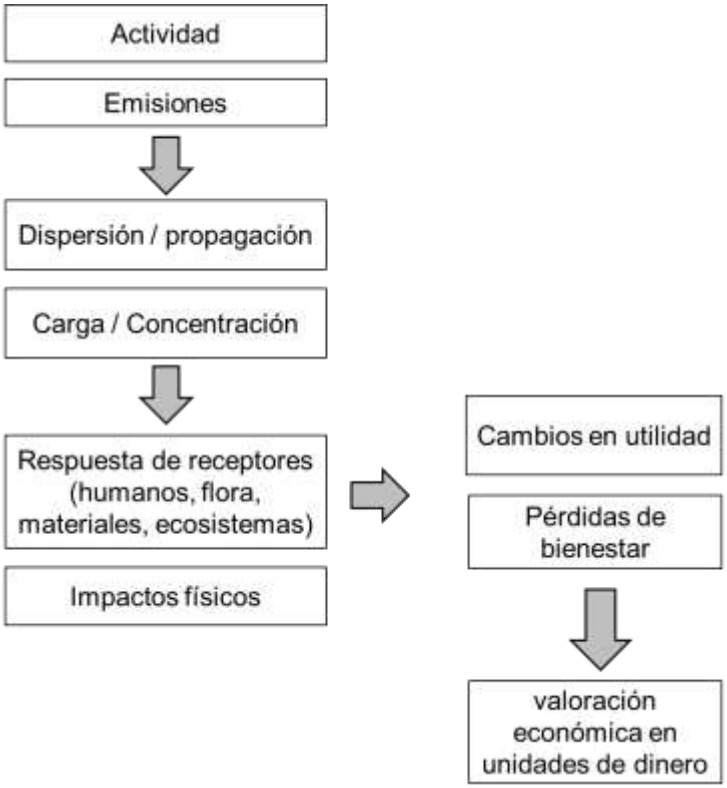
El punto ideal para los individuos que asumen el costo externo (sociedad) sería $q = 0$, y con ello lograr que $C_e(q) = 0$. No obstante, si las empresas no producen, el beneficio social que se obtendría en ese caso $W(q)$ sería nulo.

El punto b de la figura anterior refleja la condición en la que el nivel de actividad que sería óptimo desde un punto de vista social $(q*)$. Para esa cantidad de producción, la empresa obtiene un beneficio privado igual al área ab$q*$0, mientras que el coste social total es igual a 0bq*, proporcionando un beneficio neto social (W) igual al área ab0. Este beneficio es el máximo posible, ya que cualquier nivel de actividad por debajo de $q*$ reduce el costo externo C_e, pero también los beneficios privados, generando un área de beneficio neto social menor que ab0. Por tanto, la solución $q*$ determina el volumen óptimo de producción, una vez que se tienen en cuenta los efectos externos que se están causando a los individuos por la producción. (Button, 2010)

Lo anterior permite evidenciar que si bien es posible encontrar un punto de producción que equilibra las externalidades y el beneficio de las empresas productoras es imposible producir sin externalidades asociadas, por lo que es necesario que se establezca un proceso secuencial como el que se presenta en la Figura 1-10 con las fases para valoración económica en unidades monetarias de las externalidades con el propósito de establecer un punto de compensación entre los costos externos y la pérdida de beneficios del productor, y lograr internalizarlas, en un proceso de compensación (trade-off) que logra un punto de equilibrio entre las partes.

Tal y como se plantea con un caso de externalidades generadas vía emisiones, las cuales están asociadas a una actividad de producción que se precede de un efecto de dispersión o propagación de la externalidad generando una carga o concentración sobre un actor y el territorio (por sus impactos físicos). El resultado se refleja directamente en los cambios en la utilidad que conllevan a pérdidas del bienestar, es así como esa pérdida de bienestar tiene una monetización y por ende se puede reflejar en un costo.

Figura 1-10: Fases para dar un valor monetario a las externalidades



Fuente: Adaptado de (Button, 2010, pág. 168)

Los costos del productor y los costos del usuario son siempre internalizados por los tomadores de decisiones a la hora de estimar la inversión necesaria que se deberá afrontar para poner en funcionamiento un sistema de transporte. Sin embargo, suelen ser frecuente y equivocadamente considerados como costos totales producto de la desatención a los costos externos, sobre los cuales se profundiza en el siguiente numeral. (Danese, 2016)

1.4.2 Externalidades en la política pública y sectorial del transporte

En el contexto colombiano, para remunerar el servicio que prestan los terceros propietarios de vehículos subcontratados por la empresa de transporte, se han venido utilizando en los últimos tiempos dos figuras, la “tabla de fletes”[6] a través de la cual se establecen unos valores mínimos por parte del Ministerio de Transporte, entre cada origen y destino, y actualmente, la libertad de tarifas, pero con la obligación al Ministerio de Transporte para que intervenga cuando se identifiquen fallas de mercado, ante lo cual se publica por parte del DANE, el Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC), con base en ello, el Ministerio de Transporte implementó el Sistema de Información de costos eficientes (SICE - TAC), el cual sirve de referencia para la negociación entre los agentes, donde para el año 2018 se actualizaron los parámetros de la herramienta por medio del SICE-TAC 2 (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Al respecto, al revisar el sistema se evidencia que el costo eficiente del transporte de carga carretero se concibe desde los costos fijos y de operación, sin considerar las externalidades, las cuales afectan a la sociedad y que en la actualidad no se encuentran internalizadas.

Adicionalmente, entre los diferentes documentos consultados sólo se encontraron dos que hacen referencia puntual a externalidades generadas por el transporte de carga, el CONPES 3759 de 2013[7] y el CONPES 3963 del 2019[8], ambos evidencian el interés del

[6] Resolución 888 de 2001, Resolución 2500 de 2002, Resolución 3000 de 2003 del Ministerio de Transporte
[7] Lineamientos de política para la modernización del transporte automotor de carga y declaratoria de importancia estratégica del programa de reposición y renovación del parque automotor de carga
[8] Política para la modernización del sector transporte automotor de carga, ambos documentos hacen referencia a la contaminación como una externalidad que se debe mitigar con la reposición del parque automotor de carga.

Gobierno Nacional por mitigar las externalidades ambientales que genera el transporte de carga, sin embargo aunque usan el término este no se conceptualiza de manera específica y limita la mitigación de la contaminación atmosférica como externalidad generada por el transporte de carga a un proceso de renovación de flota de carga. Sobre otras externalidades no se encontraron documentos.

Un elemento adicional para agregar, es el interés del Ministerio de Transporte por realizar el seguimiento al desempeño de carga teniendo en cuenta externalidades, lo que se evidenció en los tableros[9] disponibles por corredor logístico en el Portal Logístico, en el que se presentan cifras de emisiones de CO_2 y se pretende incluir siniestralida que hasta el momento de la elaboración de la presente investigación se encuentra sin datos.

A nivel de investigaciones después de consultar en repositorios y revistas de investigación, se encontró una de Márquez Díaz & Cantillo Maza (2011) sobre la estimación de parámetros de las funciones de costo de la red estratégica de transporte de carga en Colombia que se realizó con base en la revisión de información secundaria proveniente de varias fuentes. Dada la complejidad de la red carretera en comparación con las redes de los demás modos de transporte, la estimación de los parámetros utilizó la clasificación de 22 tipologías de tramos homogéneos adoptada por la Unión Temporal Modelación del Transporte en una Investigación para desarrollar y poner en funcionamiento los modelos de demanda y de oferta de transporte que permitan proponer opciones en materia de infraestructura para aumentar la competitividad de los productos colombianos contratada por el Ministerio de Transporte en el 2008.

1.4.3 Externalidades del transporte en el contexto mundial

Según lo afirman Delucchi & McCubbin (2011) en el caso de Estados Unidos las estimaciones de las externalidades disponibles no caracterizan completamente todos los costos para todos los modos. Además, las amplias variaciones en los métodos de estimación, datos y supuestos incluso entre las estimaciones "buenas" confunden la comparación de estimaciones entre modos.

[9] Tableros de control del Ministerio de Transporte para Corredores Logísticos https://plc.mintransporte.gov.co/Estad%C3%ADsticas/Modo-terrestre/Tableros-de-control-2019

Por otro lado, muchos países europeos muestran una fuerte tradición de intervención estatal en varios sectores económicos, especialmente agricultura, energía y transporte. Esta tradición implica una atención especial a las externalidades, una de las principales causas de intervención pública en estos sectores. Esta es una de las razones por las que la Comisión de la Unión Europea ha dedicado mucha atención a estudiar las externalidades del transporte con dos motivaciones específicas que han reforzado esta tendencia. La primera es la idea de que, para apoyar un mercado de transporte eficiente, es necesario que los usuarios paguen su costo justo, es decir el costo total social, y por lo tanto es determinante poder medir los costos externos como base para determinar los impuestos y cargos de transporte. El segundo es el crecimiento de las preocupaciones medioambientales en Europa. (Friedrich & Quinet, 2011)

En los países europeos es claro que el papel del transporte, de las infraestructuras y de todos los servicios prestados por las empresas transportistas trascienden a la mera participación en el PIB nacional, ya que el transporte pertenece al conjunto de actividades que se denominan estratégicas y que son imprescindibles para el funcionamiento de la economía. Un sistema de transporte eficiente es indispensable para el crecimiento económico y el bienestar social (Mostert & Limbourg, 2004).

> Pero, además de estos efectos directos, el transporte tiene otra dimensión, puesto que facilita el aumento de la competitividad en los distintos mercados de bienes y servicios de un territorio. En este sentido, el transporte opera de forma similar a la información: empuja a que bajen los precios y a que aumente la calidad y variedad de las posibilidades de consumo de los individuos contribuyendo a la especialización productiva a escala mundial y a favorecer el crecimiento económico, de ahí la importancia de calcular sus costos desde la noción de costo social considerando externalidades. (Fernández & Olmedillas Blanco, 2001, pág. 9)

1.5 Modelo conceptual de externalidades en transporte de carga metropolitano

La identificación de las externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos en si misma se constituye como un reto que involucra el entendimiento de los conceptos desarrollados, es así como se abordaron dos grandes aspectos el transporte como

externalidad territorial destacada en el ámbito metropolitano y, por otro lado, el análisis de las externalidades generadas por el transporte como tal, haciendo la diferenciación entre los distintos modos de transporte de pasajeros y el transporte de carga carretero que confluyen en el ámbito metropolitano, que finalmente es al que se le estimarán y valorarán las externalidades en el próximo capítulo.

El transporte suele tener por sí mismo externalidades, pero en sí mismo también llegar a ser una externalidad en los procesos económicos del desarrollo urbano y metropolitano. Sin embargo, el enfoque del presente documento son las externalidades económicas del transporte de carga las cuales tradicionalmente se cuentan como un factor adicional asociado a las imperfecciones de los mercados. Teniendo en cuenta que el transporte está sujeto por sí mismo a un mercado, existen dos tipos de externalidades económicas definidas anteriormente, las pecuniarias y las tecnológicas, de las cuáles el modelo conceptual formulado solo se hace referencia a las últimas, entre las que se pueden encontrar la contaminación por emisiones, siniestralidad, congestión, efectos barrera y externalidades positivas como crecimiento económico y valorización de terrenos.

Complementado lo anterior, el abordaje desde la geografía económica trata el transporte como una fuente de externalidad, pero a su vez las dinámicas del transporte de carga generan sus propias externalidades. Esto es básico para entender la manera en cómo se expresan, o para llamarlo de otra manera, se materializan las externalidades del transporte de carga en los distintos ámbitos territoriales ya que tradicionalmente se interpreta la externalidad como algo genérico donde la escala geográfica no importa.

Según la literatura consultada, las externalidades se han venido abordando conceptual y teóricamente sin incorporar la especificidad del territorio. Es decir, no parece ser muy evidente cómo el tratamiento de las externalidades tome una aproximación diferente en las distintas escalas territoriales, ¿Cómo se expresan o cuál es el alcance en función de cada ámbito geográfico?; ¿se incorporan igual en entornos nacionales, regionales, metropolitanos y urbanos?

Como respuesta a los anteriores cuestionamientos, es necesario aclarar que no todas las externalidades se expresan de igual manera en las escalas territoriales, las expresiones y las magnitudes de las externalidades no son las mismas en el ámbito nacional, regional, metropolitano y urbano ya que el tipo de carga, el tipo de vehículo y la operación, los modos

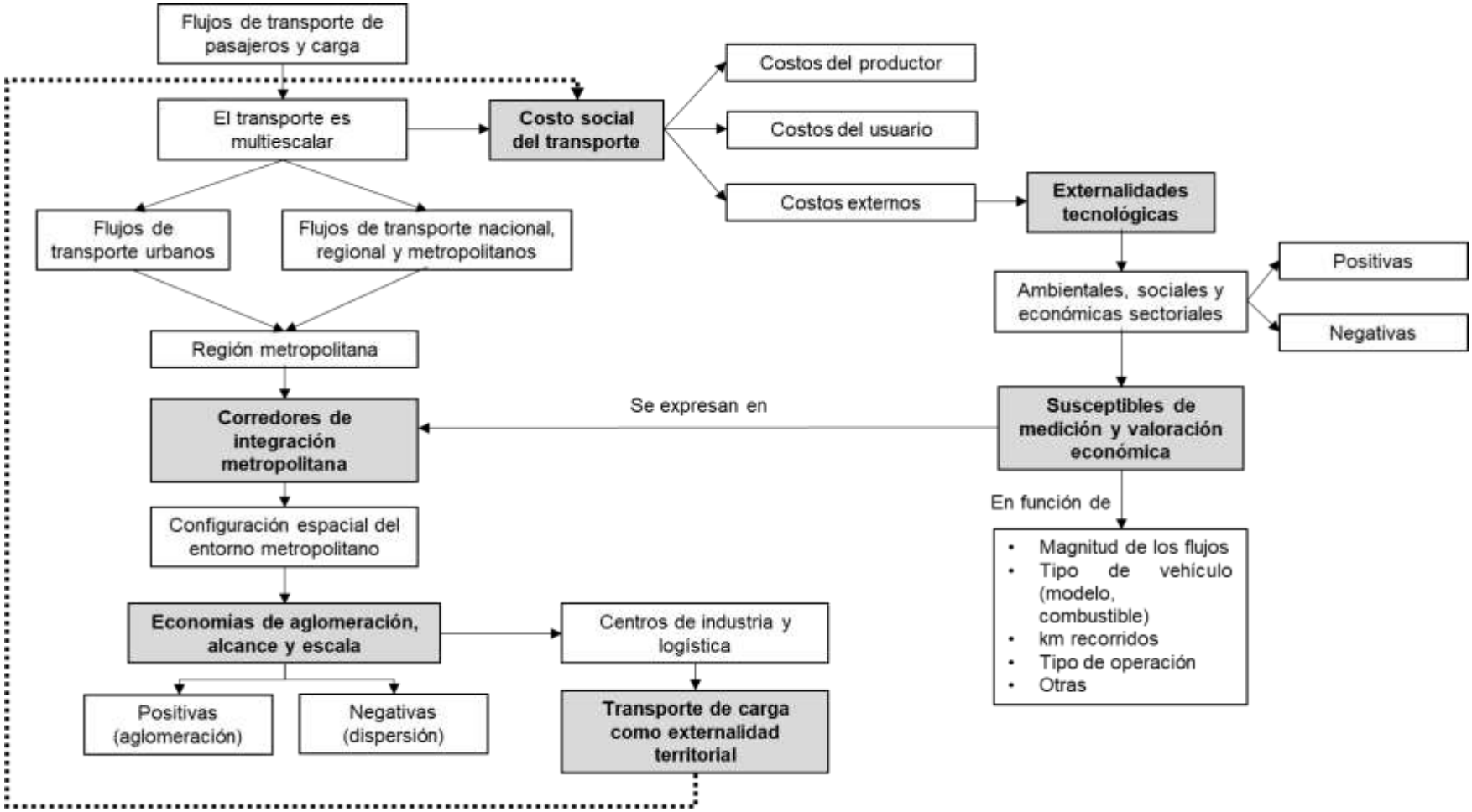
con los que se comparten infraestructuras y la estructura territorial en términos de usos del suelo entre otras variables son distintas. Y esto tiene consecuencias como la trasferencia de externalidades entre jurisdicciones que se evidenció en el ejemplo que se presentó anteriormente.

Es así como, el modelo formulado conlleva en una primera aproximación a un problema que desarrollará en el siguiente capítulo, ya que si bien en los corredores del transporte de carga metropolitano las externalidades son susceptibles de medición de manera agrupada, es necesario que se logren caracterizar las variables que permitan diferenciar claramente la magnitud de las mismas, asociadas a los diferentes tipos de flujos que confluyen en dichos corredores y las externalidades propias de la infraestructura del entorno metropolitano. Este es el caso, por ejemplo, de emisiones a las que se suman las de las actividades industriales.

Entender lo anterior, permitió identificar un vacío en la política pública y la política sectorial de movilidad (restricciones al tránsito de camiones de carga y el pico y placa ambiental si bien son un intento de internalizar una externalidad de las regiones o áreas metropolitanas, han desencadenado una transferencia de externalidades a nivel territorial y no a una mitigación real), y se regresa al mismo cuestionamiento inicial ¿quién y cómo se deben pagar las externalidades?, los generadores de carga, los prestadores del servicio de transporte de carga, el consumidor y/o la sociedad.

Como resultado de la anterior conceptualización en la Figura 1-11 se presenta el modelo conceptual aplicable para la identificación de externalidades, en el que se destaca el corredor como la unidad mínima espacial en la que son susceptibles de medición las externalidades, pero tiene una particularidad y es que confluyen flujos de transporte de pasajeros y de carga en distintos modos asociados a diferentes escalas que reflejan la multiescalaridad del transporte y también a las actividades propias del entorno.

Figura 1-11: Modelo conceptual para identificar las expresiones de las externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos



Fuente: Elaboración propia

2. Propuesta metodológica para la estimación y valoración de externalidades en entornos metropolitanos

En este capítulo se buscar **explorar y proponer una metodología que permita generar un modelo para estimar y valorar las externalidades del transporte de carga,** esto a partir del marco de referencia desarrollado en el modelo conceptual del capítulo anterior. En ese sentido en primer lugar se presentará el alcance del modelo conceptual y metodológico, para posteriormente plantear la metodología soportada en teorías desarrolladas en diferentes investigaciones a partir de las cuales se identifican las externalidades a evaluar, se aborda su expresión territorial metropolitana y finalmente se presentan los métodos de estimación y valoración de externalidades recomendados para incluir dentro del modelo metodológico.

Dicho modelo metodológico esta soportado sobre los conceptos desarrollados en el capítulo 1 de la presente investigación, entre los que se destacan los que se presentan en la Figura 2-1, la multiescalaridad del transporte, la distinción de las expresiones de las externalidades en las diferentes escalas territoriales, la transferencia de externalidades entre jurisdicciones y escalas territoriales, la regiones metropolitanas como subsistemas de ciudades, el abordaje de externalidades positivas y negativas como parte del análisis de las economías externas y el enfoque del transporte de carga como externalidad en sí mismo y cómo generador de externalidades.

Figura 2-1: Conceptos base del modelo metodológico

Fuente: Elaboración propia

2.1 Alcance del modelo conceptual y metodológico

En los entornos metropolitanos en general se mezclan flujos de transporte de mediana, y larga distancia, pero también de corta distancia en los diferentes modos (autos, motos, buses y camiones). Es por esto que se debe reconocer la importancia de comprender este fenómeno de la multiescalaridad del transporte y lograr aislar los impactos expresados en externalidades sobre el territorio para cada modo. En este caso específico, el centro del análisis son las externalidades del transporte de carga metropolitano, análisis fundamental para la toma de decisiones, las cuales se deben soportar en cifras y enfocarse en beneficiar a la totalidad de los municipios que conforman los entornos metropolitanos, sin generar sesgos positivos o negativos sobre la ciudad núcleo.

El entorno metropolitano es un ámbito relevante de estudiar porque es en este ámbito donde el transporte de carga carretero toma más relevancia pues la industria tiende a localizarse en las periferias de las grandes centralidades. Con esto se enfatiza el propósito de la presente investigación, que las externalidades del transporte de carga en el entorno metropolitano requieren una mirada especial.

El transporte de carga es esencial para el desarrollo económico de las regiones y es un indicador de competitividad de los países. Sin embargo, también se ha constituido como un desafío ya que genera externalidades sobre la movilidad, la sociedad y el territorio que usualmente, como es el caso particular de Colombia, no se están internalizando. La ausencia de internalización obedece fundamentalmente a la falta de mecanismos para su estimación y valoración, que han desembocado en el problema de no tener un valor preciso o al menos aproximado de la magnitud de las externalidades y a qué actor asociarla.

Reconociendo la relevancia de lo anterior y como se mencionó antes, diversos estudios en Europa principalmente (encabezados por los gobiernos) así como en otros continentes se han enfocado en este último aspecto, el análisis de las externalidades negativas del transporte de carga, tomando como principales la siniestralidad vial, la congestión y la contaminación, análisis que en general se han realizado siguiendo diferentes metodologías. (Gobierno de Aragón, 2009)

En ese sentido Márquez & Cantillo (2011) indican que el transporte de carga ha sido una problemática y un desafío, ya que son múltiples las externalidades asociadas a este y que resulta útil incluirlas dentro de los modelos de transporte, para esto realizaron un ejercicio de valoración de los parámetros de las funciones de costos, involucrando costos internos y externos, para la red intermodal colombiana. Este ejercicio práctico es un buen punto de referencia para la presente investigación.

Es así como el modelo metodológico desarrollado en la presente investigación, corresponde al conjunto de métodos que se utilizan para recolectar y analizar las variables medibles que se identificaron en el modelo conceptual desde el que se abordó el problema de las externalidades y la respuesta a la pregunta planteada como orientación de la presenta investigación **¿Cómo generar mecanismos para valorar e internalizar los costos asociados a las externalidades negativas del transporte de carga en entornos metropolitanos?**

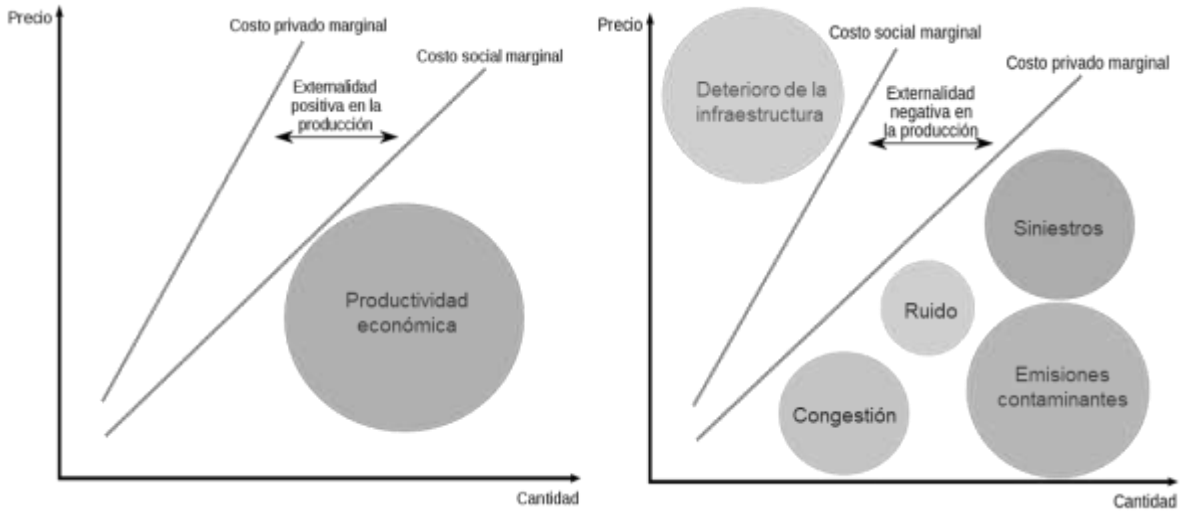
De acuerdo con lo anterior, el modelo conceptual y metodológico que se propone en esta investigación intenta generar una aproximación que permita estimar y valorar las externalidades de manera que funcione como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones coordinada de las autoridades de los municipios que conforman una región metropolitana. Las fortalezas del modelo radican en identificar las externalidades que se

pueden asociar exclusivamente al transporte de carga en particular, evidenciar su expresión en el territorio, estimar y valorar las externalidades con el fin de hacerlas comparables en la magnitud del impacto de manera que se puedan tomar decisiones sobre estás.

El modelo tiene un componente fuerte de representación espacial de los resultados de en el territorio de manera que facilite así la toma de decisiones, ya que tener el valor de la magnitud en sí no es suficiente, si no se cuenta con una herramienta que permita evidenciar la expresión de las externalidades en el territorio.

De acuerdo con lo anterior el modelo conceptual y metodológico propuesto tiene implícito el análisis de externalidades positivas y negativas, por un lado, la productividad económica y por otro lado la contaminación, la congestión y la siniestralidad vial tal como se presentan en la Figura 2-2.

Figura 2-2: Análisis del modelo conceptual

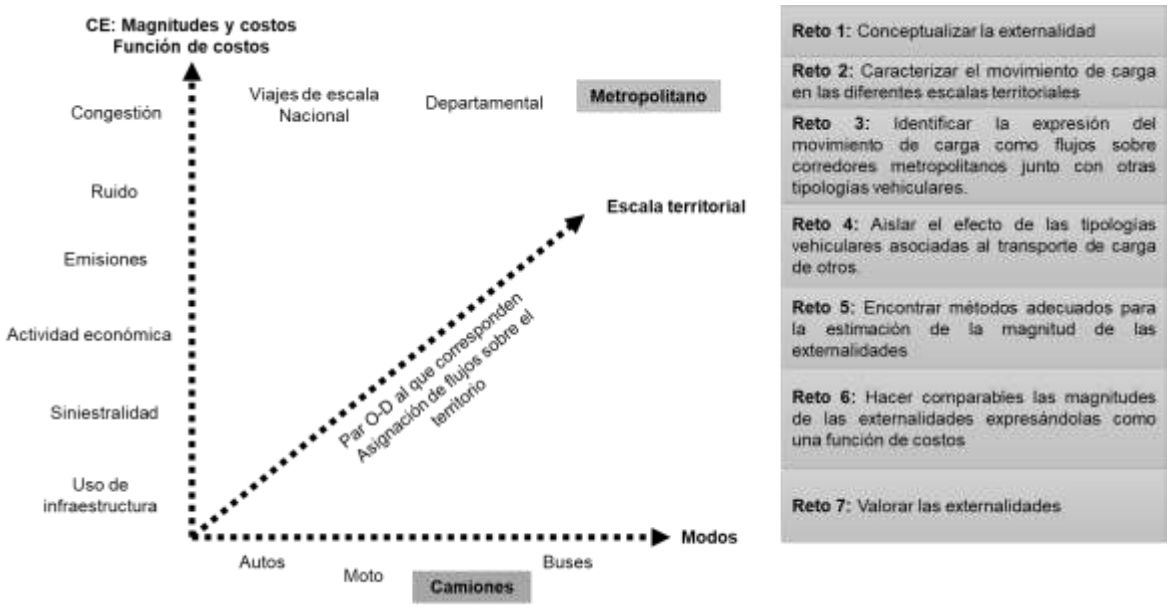


Fuente: Elaboración propia a partir de De Rus et al. (2003)

Contar con un soporte conceptual y metodológico robusto, permitirá que desde las diferentes autoridades en las jurisdicciones territoriales se pueda realizar un abordaje de la logística desde la noción del costo social del transporte, es decir incluyendo en la función de costos, los costos de las externalidades.

Con una herramienta con los retos conceptuales y metodológicos como los que se presentan en la Figura 2-3, en el caso de contarse con insumos precisos se pueden llegar a tomar decisiones sobre la flota, infraestructura necesaria para reducir afectaciones del transporte de carga y evaluar decisiones sobre cómo implementar restricciones vehiculares o definir proyectos para la optimización de la logística, así como identificar quién produce las externalidades, bajo qué condiciones y en dónde se están expresando, así como comparar el costo social de cada una de estas. Es conveniente reiterar que la contribución de la presente investigación se centrará en las tipologías de vehículo asociadas al transporte de carga correspondientes a flujos metropolitanos.

Figura 2-3: Retos conceptuales y metodológicos del modelo propuesto



Fuente: Elaboración propia

2.2 Regiones metropolitanas como subsistemas de ciudades y externalidades

Para abordar las expresiones territoriales de las externalidades en los entornos metropolitanos se tomaron como referencia dos autores Boix D. (2003) y Ruiz (2015). El primero expone en su trabajo *"Redes de ciudades y externalidades"* que las ciudades en sus procesos de desarrollo exigen una cuota significativa de recursos públicos por lo que en función de esto existe un conjunto de políticas públicas urbanas. Las consideraciones

ambientales asociadas son cada vez de mayor relevancia. De allí que la valorización de las externalidades ambientales y urbanas en torno a proyectos de infraestructura, tanto ex ante como ex post, sean de creciente importancia para las decisiones gubernamentales.

Boix D. (2003) lo que buscó con su trabajo es precisamente avanzar en los análisis sobre externalidades urbanas y ambientales de grandes inversiones a escala metropolitana, con el objeto de construir instrumentos cualitativos y cuantitativos a considerar en los esquemas de toma de decisión del agente público, incluidos los grados de intervención y participación de los agentes privados que invierten en proyectos de infraestructura en las ciudades, este objetivo sin duda de alinea con las expectativas de la presente investigación.

Es así como Boix D. (2003) define la externalidad como ““todo aquello” que se genera producto de una inversión y que habitualmente no es considerado en los análisis de costo beneficio que preceden la decisión del proyecto”. (pág. 10)

A partir de lo anterior articula esta idea con el concepto de red de ciudades la cuál es descrita de la siguiente manera:

> Una red está formada por un conjunto de actores (nodos) relacionados entre ellos mediante una serie de vínculos (links). La economía urbana y la geografía económica utilizan el término redes de ciudades para referirse a una interpretación de la economía en el espacio en la cual los nodos son las ciudades, conectadas por vínculos de naturaleza socioeconómica (links), a través de los cuales se intercambian flujos de distinta naturaleza, sustentados sobre infraestructuras de transporte y comunicaciones. Las principales características de las redes de ciudades son la posibilidad de coexistencia de estructuras jerárquicas y no – jerárquicas, la cooperación entre ciudades y la generación de ventajas asociadas a la organización de la estructura urbana y la interacción entre sus nodos. (Boix D., 2003, pág. 14)

Bajo los dos conceptos mencionados Boix D. (2003) formula lo siguiente:

> La hipótesis que aparece en las redes de ciudades es que las externalidades no se generan exclusivamente en el interior de los grandes establecimientos productivos y de las ciudades asociadas a la concentración de la población y la actividad sino

> también en la red de ciudad, asociadas a la interacción entre unidades urbanas, y donde la concentración espacial no es requerida. Estas economías reciben el nombre de economías de red y se asocian fundamentalmente a la organización de la producción en el espacio-territorio, al efecto de masa que consiguen estas ciudades al interactuar, a la morfología e intensidad del uso de la red y a los procesos “feedback” derivados de intercambios materiales y de conocimiento. (pág. 14)

Así mismo, realizó precisiones sobre las relaciones que se presentan en las redes de ciudades bajo la lógica territorial:

> La lógica territorial se basa en el principio de la jerarquía y dominación. Aplicada a los sistemas urbanos produce un modelo de centros anidados en relación a su dimensión y sus funciones. Las empresas suelen ser empresas monoplanta, donde las externalidades se producen por la dimensión (escala). Los costes de transporte y el tipo de competencia determinan la localización de las empresas, buscando el área de mercado óptima. (Boix D., 2003, pág. 19)

Boix D. (2003) realizó tres anotaciones importantes sobre el concepto de externalidades en el marco del concepto de redes de ciudades:

> 1. Aunque pueda planificarse una red como concepto estratégico, las ventajas de la organización en red sólo se disfrutan cuando la interacción se hace efectiva.
>
> 2. Aunque la red se concibe como una estructura territorial generadora de externalidades positivas, los mismos canales de interacción pueden posibilitar la transmisión de externalidades negativas, pues el concepto de interdependencia no tiene por que ser sólo pósitivo, y el declive de algunos de los miembros de la red puede arrastrar al resto en situación de recesión o crisis.
>
> 3. La naturaleza de la externalidad es intangible, y no puede observarse directamente utilizando el sistema de precios finales, como en las redes de empresas. Este componente dificulta extraordinariamente la observación de las pautas de interacción y la medición de la cuantia de la externalidad que tiene que ser aproximada mediante método indirectos. (pág. 58)

Ruiz (2015) avanza en este concepto de redes de ciudades y lo aterriza en el contexto colombiano haciendo alusión a lo siguiente:

> La existencia de concentraciones urbanas implica a su vez la concepción de concentraciones económicas, reflejadas en el tamaño económico de las ciudades. Tales concentraciones económicas se caracterizan por generar diversas relaciones dinámicas que se pueden presentar en el interior de las ciudades y con el resto de ciudades, que sin dejar de lado el espacio rural, conllevan a la configuración de un sistema urbano. En este sentido, el modelo de sistema de ciudades, basado en las teorías de equilibrio económico, groso modo permite representar el tamaño, distribución y localización de las ciudades dentro de una economía. Lo anterior se traduce en un proceso de jerarquización del sistema de ciudades y la consecuente evolución de dicho proceso, explicados a partir de dos perspectivas que operan simultáneamente: la concentración de la población (presentada en el capítulo anterior) y la concentración económica. (pág. 102)

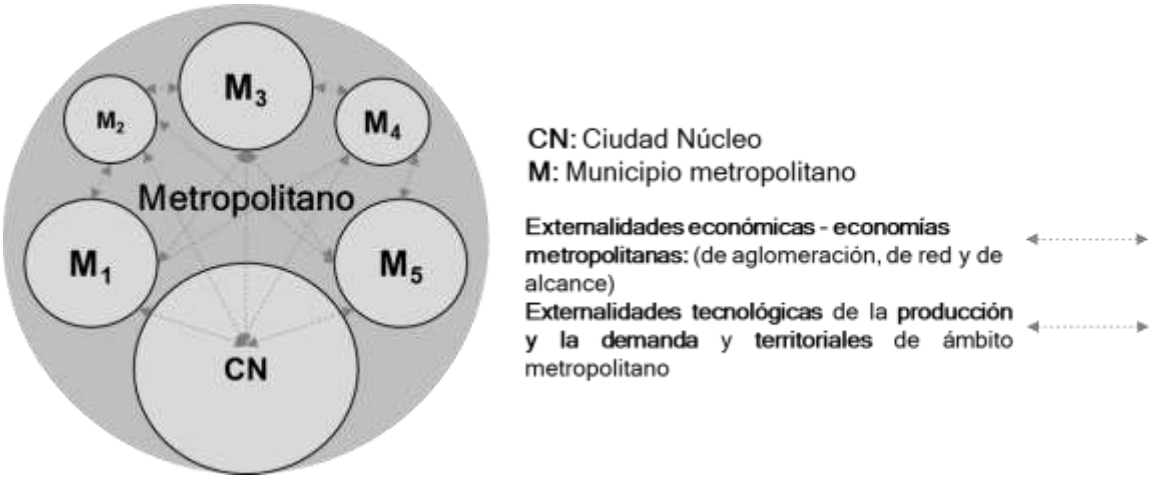
Es así como Ruiz (2015) caracteriza las regiones metropolitanas planteando lo siguiente:

> Tal y como se ha explicado a lo largo de esta investigación, los territorios metropolitanos se caracterizan por una localización de la actividad económica diferenciada espacialmente entre la Ciudad Núcleo y Municipios, no solo aprovechando la potencialidad que proporcionan las economías de metropolización, sino de otros fenómenos económicos territoriales como los diferenciales de los precios del suelo, una preexistencia de al menos una o más ciudades distintas a la ciudad núcleo, y su inmersión como región metropolitana dentro de un sistema de ciudades más de tipo nacional. (pág. 184)

Los planteamientos antes expuestos, permiten comprender las expresiones de las externalidades en las regiones o áreas metropolitanas desde la Economía Espacial, por lo que en adelante estas se entenderán como un subsistema de ciudades que hace parte de un sistema urbano mayor (por ejemplo, el correspondiente a un ámbito nacional). De allí que será importante caracterizar el movimiento de mercancías en las diferentes escalas territoriales partiendo de la escala nacional, hasta llegar a una comprensión metropolitana, para de esta manera centra el análisis de las externalidades en el transporte de carga.

En la Figura 2-4 se presenta a nivel esquemático la estructura de una región metropolitana, colocando los cuatro elementos que se destacan en la relación Ciudad Núcleo – municipios periferia, la existencia de jerarquías, el valor del suelo que condiciona la configuración territorial e incluso concede vocaciones a los municipios, la interacción socioeconómica y finalmente las externalidades positivas y negativas que se generan producto de esta relación, en este caso se pueden mencionar dos bastante relacionadas con el enfoque de la presente investigación, las economías de aglomeración y el transporte (tanto de pasajeros como de carga producto de esa relación Ciudad Núcleo – municipios periferia).

Figura 2-4: Región metropolitana como subsistema de ciudades



Fuente: Elaboración propia a partir de Ruiz (2015)

Lo anterior conlleva a fortalecer el concepto que se ha venido desarrollando de transferencia de externalidades entre las jurisdicciones de las regiones metropolitanas y las consecuencias de las decisiones que se toman de manera desarticulada entre la Ciudad Núcleo y los municipios periféricos que componen una región o área metropolitana.

2.3 Expresión metropolitana de las externalidades del transporte de carga

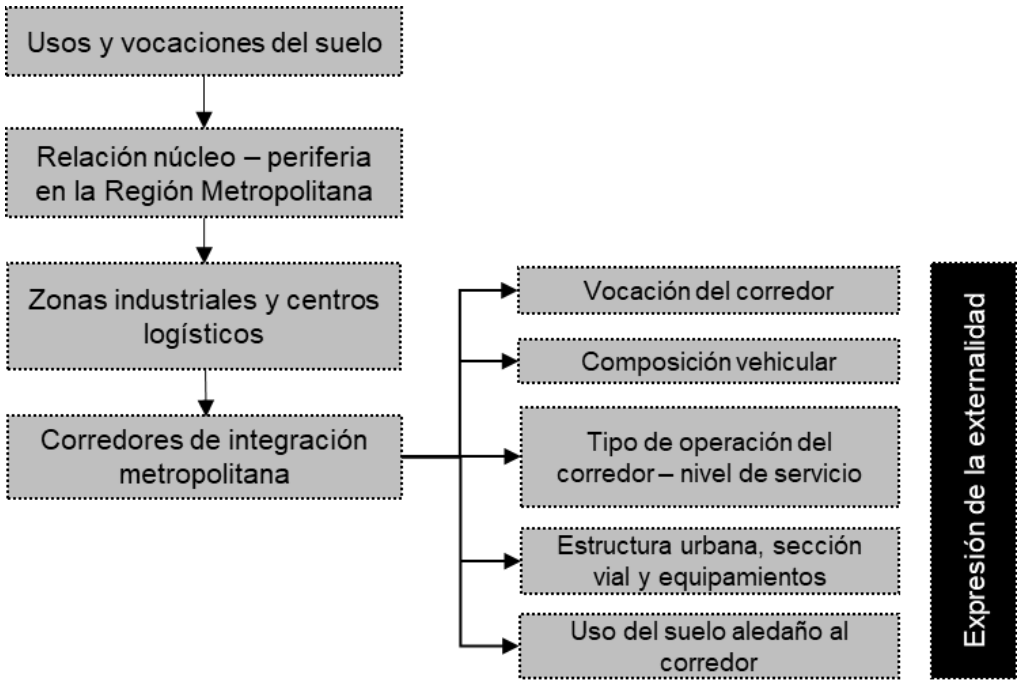
La identificación de externalidades se puede realizar a través de observaciones sobre el territorio, en las cuáles se debe retomar la idea del modelo conceptual propuesto, ya que se debe entrar en el cuestionamiento acerca de cuáles externalidades se pueden asociar en particular al transporte de carga, la discusión se puede abordar analizando el transporte de carga como generador de externalidad o el análisis inverso del transporte de carga

como externalidad de la configuración territorial de áreas metropolitanas, esto último se puede asociar a hechos como no contar con un corredor alterno o anillo vial que permita separar flujos nacionales, regionales, metropolitanos y urbanos y la configuración territorial a partir de la aparición de centros logísticos dentro de la Ciudad Núcleo y municipios de la región metropolitana. Y esa es la razón de la utilidad del análisis de imágenes o trabajos de campo que se constituyen como un punto de partida.

Entender quién o qué produce la externalidad es el paso fundamental para estimarla, valorarla e internalizarla. En la Figura 2-5 se presenta el análisis básico para el ejercicio de observación del territorio. El análisis parte de los usos y vocaciones del suelo de la región metropolitana una vez identificada la relación entre el núcleo y la periferia, posteriormente, el análisis se centra en la identificación de zonas industriales y centros logísticos, de manera que se identifiquen los corredores de integración metropolitana, sobre estos es conveniente detallar la vocación, es decir que otros flujos adicionales a los metropolitanos confluyen allí.

A partir de esto, focalizar el análisis en las tipologías vehiculares que se encuentran dentro de dichos flujos e identificar el tipo de operación que presenta el corredor identificando los conflictos e interferencias en la continuidad de los flujos. Adicional a lo anterior, se debe incluir el análisis de los elementos urbanísticos alrededor del corredor, la sección vial y la señalización, así como equipamientos y el uso del suelo aledaño, para que de esta manera con estos elementos se puedan interpretar las expresiones de las externalidades e intentar plantear hipótesis sobre quién las produce y bajo qué circunstancias.

Figura 2-5: Análisis para la identificación de las expresiones de las externalidades en el territorio



Fuente: Elaboración propia

Es así como se plantea como ejemplo lo siguiente, si en un tramo de corredor de integración metropolitana confluyen flujos de las distintas tipologías vehiculares provenientes de diferentes escalas territoriales como se esquematiza en la figura anterior, y adicional a esto existe una configuración territorial establecida alrededor del mismo corredor o viceversa, es decir, un corredor resultado de la configuración territorial, en ese caso existen dos posiciones la del generador de externalidades o la del receptor de las mismas, y se evidencian los flujos de mercancías o personas y la configuración vial a su vez como generadores/receptores de externalidades, la pregunta de nuevo es cómo identificar quién las produce y la magnitud que se integra como costo externo en la ecuación de costo social.

Es así como el análisis de las externalidades a nivel de corredor metropolitano es apenas una aproximación para entender el fenómeno del transporte y la configuración territorial metropolitana, aterrizando este análisis en el transporte de carga.

En la Tabla 2-1 se realizó el análisis de cada una de las externalidades del transporte planteadas por la OCDE, analizando su expresión general y aterrizando dicha expresión a

nivel metropolitano a partir de la relación entre la Ciudad Núcleo y sus municipios aledaños, en ese sentido se logró establecer una priorización en la que según su expresión se identificaron las externalidades que se destacan en el ámbito metropolitano.

Es interesante esta aproximación que considera las externalidades del transporte de carga aplicadas al total de la función de producción del transporte representada en la Ecuación (1.2), es decir desde el proceso, la infraestructura necesaria para la operación del transporte de carga, la operación en sí y los desechos generados al final de la vida útil de la infraestructura.

Tabla 2-1: Expresiones de las externalidades del transporte de carga carretero

Tipo de externalidad	Medio/Externalidad	Expresión general	Expresión metropolitana
Positiva	Industria/Producción	Aumentar la productividad para el conjunto de empresas de un país	Economías metropolitanas: Economías de aglomeración, de red y de alcance.
Positiva		Ahorros de tiempo de usuarios	
Negativa	Atmósfera/ Contaminación	Emisiones contaminantes locales y globales	Concentración de agentes contaminantes en corredores metropolitanos y zonas aledañas, se impacta el paso por cascos urbanos. Determina restricciones en la Ciudad Núcleo que afectan municipios aledaños
Negativa	Utilización del territorio	Efectos barrera y movimiento de tierras para construcción	Pasos urbanos de municipios metropolitanos afectados al ubicarse sobre corredores de integración metropolitana
Negativa	Residuos sólidos/ Contaminación	Desguace de vehículos viejos, Aceites usados. Materiales de construcción para carreteras	Uso del suelo destinado a recepción de residuos o construcción de nuevos proyectos viales
Negativa	Agua/Contaminación	Contaminación aguas superficiales y subterráneas por residuos pavimentos	Uso del recurso hídrico como receptor de residuos

Tipo de externalidad	Medio/Externalidad	Expresión general	Expresión metropolitana
Negativa	Ruido	Problemas en grandes ciudades y entornos de carreteras	Pasos urbanos de municipios metropolitanos afectados al ubicarse sobre corredores de integración metropolitana
Negativa	Siniestros viales	Elevado número de víctimas mortales y heridos. Vertidos de sustancias contaminantes	Pasos urbanos, suburbanos y rurales de municipios metropolitanos afectados al ubicarse sobre corredores de integración metropolitana
Negativa	Otros impactos	Congestión en vías urbanas o tramos determinados de carreteras	Pasos urbanos, suburbanos y rurales de municipios metropolitanos afectados al ubicarse sobre corredores de integración metropolitana

Fuente: Elaboración propia a partir de OCDE, Transport and the Environment, París, 1988.

Con respecto a lo anterior se destaca que tal y como lo plantearon De Rus et al. (2003) el estudio de las externalidades del transporte suele centrarse en los efectos negativos como se evidencia en la Tabla 2-1 debido a su fácil percepción con respecto a las externalidades positivas. Sin embargo, una cuantificación completa de las externalidades debería considerar tanto las negativas como las positivas que también se generan por las actividades de transporte y las infraestructuras necesarias para el desarrollo de dichas actividades.

Lo anterior es más evidente en el ámbito metropolitano, ya que su estructura territorial en sí misma tiene externalidades positivas que se generan a partir de las economías de aglomeración, de red y de alcance, esta particularidad no se presenta en otros ámbitos territoriales y aquí es dónde el transporte de carga juega un papel fundamental dentro de las relaciones económicas a partir del movimiento de mercancías entre una Ciudad Núcleo y los municipios aledaños de un área o región metropolitana.

En el marco del modelo que se propondrá en función de la información disponible y la expresión de la externalidad se tomará como referencia la producción económica como externalidad positiva, reconociendo la relación que existe entre el transporte de carga carretero en el movimiento de mercancías y los centros de producción (industriales y

logísticos) de un área o región metropolitana. Así mismo se contemplan la siniestralidad, la contaminación por emisiones atmosféricas y congestión como externalidades negativas, debido al impacto percibido en los corredores metropolitanos.

2.4 Métodos para la estimación y valoración de externalidades

Una vez identificadas las externalidades de tipo tecnológico del transporte de carga carretero en entornos metropolitanos, además de evidenciar cómo se expresan en el territorio, en el proceso de plantear cómo internalizarlas o mitigarlas (el fin en sí mismo de estudiar las externalidades), resulta fundamental comprenderlas con mayor detalle para lograr plantear una metodología para estimar la magnitud de las externalidades de manera que se les pueda asociar un valor económico a las mismas como ya se planteó anteriormente.

En ese sentido, a continuación, se desarrolla cada una de las cuatro (4) externalidades identificadas en el numeral anterior de manera que se plantea un método para determinar la función de valoración económica para cada una de estas aterrizando su análisis en mayor detalle a su expresión metropolitana.

2.4.1 Siniestralidad en los corredores metropolitanos

Por su propia naturaleza, tal como lo afirman De Rus et al. (2003) todas las actividades de transporte conllevan un riesgo de sufrir algún tipo de siniestro (numerosos vehículos moviéndose a una velocidad elevada y utilizando una infraestructura común). Ya sea por fallos mecánicos o, más frecuentemente, por la influencia del error humano, los siniestros sufridos por los vehículos son un suceso que se da en todos los modos de transporte. Sin embargo, no existe un consenso para realizar una evaluación sobre cuál es el modo de transporte con una menor probabilidad de siniestro.

Esto es así porque, por motivos tecnológicos (factores de la función de producción de la Ecuación (1.1), los distintos modos de transporte no son fácilmente comparables, lo cual hace que sea complejo tratar de buscar una variable de exposición común a todos ellos que refleje de forma adecuada sus características.

Particularmente el transporte de carga carretero dadas las dimensiones de los vehículos y su ocupación de la vía, se percibe a primera vista como el más propenso a sufrir o generar siniestros, sin embargo, al realizar el análisis de los siniestros asociados a este modo en específico en el entorno metropolitano es necesario tener en cuenta más variables, dado que los siniestros pueden estar asociados a otros factores de la función de producción propios y de otros modos, entre estos se destaca el estado de la infraestructura, y el comportamiento de quién lo opera.

El comprender la siniestralidad del transporte de carga metropolitano se complejiza cuando se incorpora la variable territorial, ya que en un corredor metropolitano confluyen diversos modos de diferentes ámbitos territoriales, no solo los metropolitanos. Es así como se aborda la siniestralidad vial, desde una revisión bibliográfica en la cual se encontraron modelos como los que se presentan en la Tabla 2-2, los cuáles fueron recopilados de otros autores por Al-Haji (2007) quién realizó una revisión del estado del arte buscando relaciones que vinculen dinámicas del tráfico vehicular con la ocurrencia de eventos viales a lo largo del tiempo.

Observar y entender estas funciones, permite establecer de manera apropiada factores macro que estimen y correlacionen la siniestralidad vial, con datos históricos existentes y de fácil medición. Se observa que distintos autores tienden a buscar relaciones que vinculen las fatalidades viales con los kilómetros recorridos como variable de exposición o con la tasa de motorización, e indirectamente con la población de los países de estudio. El autor señala que todos estos modelos estadísticos explicativos y predictivos han sido aplicados en distintos entornos con ajustes aceptables.

Tabla 2-2: Modelos estadísticos explicativos y predictivos por autor según Al-Haji

Autor	R.S. Smeed	Oppe	Navin
Año	1949	1998	1994
Modelo	$\frac{F}{V} = \alpha \left(\frac{V}{p}\right)^{-\beta}$	$\frac{F_t}{V_t} = e^{\alpha t+\beta}$	$T = T_f e^{-\frac{M}{M_0}}$[10]
Variables	F=Fatalidades V=Vehículos P=Población α y β =Parámetros estimados	t=Año de estudio F=Fatalidades V=Kilómetros / Vehículo α y β = Parámetros estimados	T=Fatalidades / número de vehículos T_f=Punto de cruce con el eje T M=Tasa de motorización M_0=Tasa máxima de motorización

Fuente: Adaptado de Al-Haji (2007)

[10] Basado en un modelo de 3 variables: Riesgo de tráfico, Riesgo personal y Motorización.

Además de lo mencionado por Al-Haji, la Organización Mundial de la Salud (OMS) hace referencia a la velocidad de los vehículos como factor de causalidad de los siniestros, de ahí la necesidad de controlar la velocidad en las vías, con el fin de reducir las tasas de siniestralidad en estas (Global Road Safety Partnership, 2008). De este informe, se reafirman algunas de las tesis sobre la importancia de controlar la velocidad y la variación de la velocidad en las vías, donde la mayor probabilidad de ocurrencia de siniestros se presenta en las vías donde el promedio de velocidad aumenta.

En particular en lo referente al transporte de carga en el ámbito metropolitano dado el peso de los vehículos y el paso urbano en los municipios, las velocidades que se alcanzan no son muy altas, sin embargo, considerar la velocidad como factor de análisis que aporta a la ocurrencia de siniestros viales se puede incorporar en una investigación futura para robustecer el modelo de estimación de siniestralidad del transporte de carga metropolitano propuesto.

En definitiva, no existe un consenso en la literatura sobre un único modelo aplicable, sin embargo, si existe una tendencia generalizada a lograr modelos simplificados y robustos, que permitan explicar y proyectar fácilmente la siniestralidad en función de determinados factores de riesgo, destacándose principalmente entre ellos los kilómetros recorridos y la tasa de motorización.

Abundantes trabajos, literatura y boletines FAL de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) reflejan la urgencia de abordar los temas de seguridad vial para los países, por los enormes costos sociales y económicos que conllevan. En particular, el transporte de carga por carretera, se está viendo impulsado a estructurar acciones tendientes a reducir su incidencia en los siniestros viales, motivado por su relación con la sociedad, la inseguridad vial producto del incremento del parque de vehículos hacen que la sociedad en su conjunto identifique al transporte de carga, por su activa presencia, como un usuario de alto riesgo en el uso de las infraestructuras.

Esto se traduce en normativas crecientemente exigentes, mayor fiscalización a través de cobros (similares al SOAT – Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito el caso de Colombia) y tendencia a perseguir la responsabilidad civil y hasta penal de los operadores que ejecutan servicios sin gestionar adecuadamente la seguridad. (División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, 2010)

Por otro lado, la necesidad del análisis de la siniestralidad vial en transporte de carga se asocia al costo de los siniestros, el no abordar de forma sistemática el tema de la seguridad en las operaciones de transporte es un riesgo económico enorme, la necesidad de responder por el valor de la carga, el costo de reponer vehículos, la sobredimensión de flota, el costo en imagen y deterioro de servicio afectan seriamente la sustentabilidad económica de las operaciones y la cobertura de todos estos riesgos a través de seguros significan un costo adicional importante, más aún para quienes no muestran buenos estándares de siniestralidad. (División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, 2010)

De acuerdo con todo lo anterior, dadas las restricciones de información con las que puede contar cada estructura metropolitana el análisis de siniestralidad se puede condicionar a las siguientes variables:

- Siniestros ocurridos en el entorno metropolitano discriminados por gravedad (con daños, heridos y muertos).
- Kilómetros promedio recorridos al día por tipología de camión como variable de exposición. En este punto resulta determinante lograr discriminar el ámbito del recorrido que estaba realizando el camión involucrado en el siniestro. La dificultad consiste en lograr desagregar cuales siniestros se producen en recorridos metropolitanos y lograr diferenciarlos de otros ámbitos territoriales.
- PIB, como medida de magnitud la producción económica.

De esta manera a nivel macro, para datos totales anuales al contar con los datos suficientes se podrá evaluar la relación entre la ocurrencia de siniestros viales, fenómenos del tráfico y de las dinámicas sociales de la ciudad. A este nivel, se puede evaluar la relación entre fatalidades y eventos con heridos con los flujos de vehículos de carga, los kilómetros recorridos promedio recorridos por estos y la producción económica.

Así, se puede evaluar la relación independiente de cada una de las variables y posteriormente, usando las relaciones encontradas en la bibliografía, en modelos más complejos incluyendo otras variables. Para adaptar las ecuaciones de Smead, Oppe y Navin a las variaciones de kilómetros que se pueden determinar a partir de un modelo de transporte, se propone utilizar la relación entre kilómetros promedio, parque automotor y

kilómetros totales recorridos en la red metropolitana; adicionalmente, se puede incluir el valor de PIB de tal manera que genere una relación proporcional con la siniestralidad.

En cuanto a la valoración de los siniestros viales, esta se puede realizar en función del Valor Estadístico de la Vida - VEV[11] o el Valor Estadístico de los Siniestros, existen diversos estudios de referencia en los que se encuentran los costos estimados de los siniestros variando según su gravedad. En ese sentido se propone simplificar el análisis como se presenta en la Ecuación (2.1):

$$Ces = S_D * Ve_D + S_H * Ve_H + S_F * Ve_F \quad (2.1)$$

Donde Ces es el costo externo de los siniestros, S_D, S_H y S_F corresponden al número de siniestros totales según la gravedad solo daños, con heridos y con fatalidades respectivamente, multiplicados por su costo estadístico (Ve).

La anterior ecuación permite estimar y valorar la siniestralidad, sin embargo, se puede complejizar el modelo en la medida en la que se incorporen mayores variables de exposición tomando como referencia las ecuaciones expuestas por Al-Haji (2007).

2.4.2 Relación núcleo – periferia: el caso de la contaminación ambiental

Las actividades de transporte tienen toda una serie de efectos negativos sobre el medioambiente, entre los cuales destacan por su importancia cuantitativa la contaminación atmosférica y la generación de ruido, en el marco del modelo metodológico propuesto en este numeral, el análisis se centrará en la estimación de los impactos de la contaminación atmosférica, la cual se realiza habitualmente a partir de una cuantificación de las emisiones y de los costos asociados a las mismas, mediante estudios específicos sobre cada tipo de contaminante.

Los problemas más evidentes son la contaminación atmosférica (tanto a nivel local o regional, como los efectos que se causan a nivel global, como el denominado “efecto

[11] Es una medida actualmente estandarizada en el mundo, y se usa como herramienta para cuantificar las externalidades generadas por la siniestralidad en proyectos de transporte,

invernadero”) que causan todos los tipos de vehículos al quemar combustibles. (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

En este contexto, el análisis de la contaminación por emisiones como externalidad del transporte de carga metropolitano resulta fundamental, dado que se deben lograr aislar totalmente las emisiones asociadas al transporte de carga de las generadas por otros modos, y también de las generadas por fuentes fijas como las industrias localizadas en las áreas o regiones metropolitanas, otra fuente de emisiones que se concentra en este ámbito territorial a diferencia de otros.

Adicional a lo anterior, una característica particular de esta externalidad es que tiene una expresión muy fuerte sobre los receptores, por esta razón una situación que ocurre reiteradamente en la Ciudad Núcleo de las áreas y regiones metropolitanas es lo asociado a la declaración de emergencias ambientales por mala calidad del aire, situación ante la cual una de las primeras acciones de los tomadores de decisiones consiste en la restricción del paso de los vehículos de carga, los cuáles por su tecnología y tipo de combustible son catalogados en general como altamente contaminantes.

El tomar estas decisiones de restricción sobre las Ciudades Núcleo tiene una incidencia directa sobre los municipios metropolitanos que tiene como resultado la transferencia de externalidades a estos últimos, los cuales deben albergar en su jurisdicción los vehículos que se estacionan esperando el levantamiento de la restricción, que normalmente se hace en horario nocturno, generando congestión, ocupación del espacio público, pérdida de capacidad en las vías, deterioro del paisaje, entre otras.

De acuerdo con lo anterior, contar con estimaciones de la magnitud de la externalidad de la contaminación por emisiones asociada en particular al transporte metropolitano, permite que se tomen decisiones sobre la verdadera incidencia de estos vehículos sobre la calidad del aire que se percibe en las Ciudades Núcleo en particular, y evaluar con datos reales soluciones como la restricción.

Es así como en el caso del impacto ambiental asociado a la contaminación por emisiones se han encontrado varios enfoques de modelación de tráfico para estimar la cantidad de emisiones, de manera que se encontró que en aplicaciones de gran escala (nacional o regional) es apropiado el uso de modelos como el MOBILE; aunque también son considerados de interés modelos un poco más sencillos como el MODEM, que emplea la

técnica de los factores de emisión, y establece un valor representativo de la cantidad de sustancia contaminante que se libera a la atmósfera con relación a la actividad asociada que la produce.

Adicionalmente a lo anterior, a continuación se hace referencia a otros modelos para la estimación de emisiones vehiculares, los cuales son mencionados en la Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas (2017) desarrollada por el Ministerio de Ambiente, que pueden utilizarse para una mejor aproximación a la medición de la contaminación atmosférica por fuentes móviles como externalidad:

- El Modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE), por sus siglas en inglés, desarrollado por el Centro Internacional de Sistemas Sostenibles (ISSRC, por sus iniciales en inglés) y la Universidad de California en Riverside, permite estimar emisiones vehiculares para ayudar a las ciudades y regiones a: i) enfocar las estrategias de control y planeación del transporte hacia unas más efectivas, ii) predecir cómo las diferentes estrategias afectarán las emisiones locales, y iii) medir el progreso en la reducción de emisiones en el tiempo.
- El simulador de emisiones de vehículos automotores MOVES (por sus siglas en inglés) fue desarrollado por la EPA y permite estimar emisiones generadas por fuentes móviles a nivel nacional, regional y de proyecto para gases de efecto invernadero, contaminantes y compuestos tóxicos. Es utilizado para crear factores de emisión o inventarios de emisiones tanto para vehículos en vía como para vehículos fuera de la vía. El modelo permite ingresar información de los tipos de vehículos, periodos de tiempo, áreas geográficas, contaminantes, características de operación de los vehículos y tipo de vías para ser modeladas.
- COPERT (computer programme to calculate emissions from road transport), es un software empleado a nivel mundial para calcular emisiones de transporte en carretera, fue desarrollado por la Agencia Ambiental Europea, y permite el cálculo de emisiones a escala nacional, regional o local, para una resolución temporal anual, diaria e incluso desarrollos más recientes permiten el cálculo con resolución de una hora. COPERT ha sido desarrollado para preparar los inventarios de emisiones de los países miembros de la Unión Europea, sin embargo, ha sido empleado en muchos otros países como Chile y Colombia.

Siguiendo la línea del método de los factores de emisión, se plantea de manera general el modelo que se va a utilizar para estimar los costos de la contaminación por emisiones g, para cada uno de los tipos de emisiones contaminantes, como se muestra en la Ecuación (2.2):

$$Ceg = Q(\beta i \cdot FEi) \cdot L \quad (2.2)$$

Donde Ceg corresponde al costo de la contaminación por emisiones Q representa el flujo vehicular, FEi es el factor de emisión expresado en gramos por vehículo y por kilómetro, βi incluye el costo monetario de la polución de cada emisión contaminante; a su vez, L es la longitud del arco evaluado.

Se destaca de esta metodología que permite incluir como input los kilómetros recorridos específicamente en viajes metropolitanos del transporte de carga carretero, particularizando el análisis por tipo de vehículo y tipo de combustible que utiliza, en función de la cantidad de vehículos. Por lo que cumple el objetivo de brindar una estimación y valoración exclusiva del transporte de carga metropolitano. Se debe recalcar que esta información de entrada de la ecuación propuesta se puede extraer fácilmente de un modelo de transporte, en el que se asignen flujos de vehículos de carga, el cual incluye por defecto una matriz O-D.

2.4.3 Congestión en los corredores metropolitanos y los pasos urbanos

El problema de la congestión en el transporte surge por un desajuste puntual entre la demanda existente para la utilización de una infraestructura y la capacidad máxima de ésta para dar servicio a los vehículos o usuarios. Esta es una característica particular, ya que en todos los modos de transporte la demanda raramente es constante a lo largo del tiempo. Por esto, la infraestructura se diseña con una capacidad determinada que, si bien puede ser modificada a largo plazo, en el corto plazo es fija.

En ese sentido, la congestión puede considerarse como una externalidad en el sentido de que se genera por parte de unos actores que no tienen en cuenta los costos que están imponiendo al resto de usuarios de la infraestructura. Pero esta es una externalidad que puede definirse como “interna” del transporte (dado que todos los usuarios que se ven afectados por un problema de congestión son a la vez causantes y sufren los costos asociados a la saturación de la infraestructura).

En particular en el ámbito metropolitano la congestión se percibe mayoritariamente en los pasos urbanos de la ciudad núcleo y algunos municipios, en los que se evidencia el “cuello de botella” que se genera con el ingreso de cada vehículo de carga a la infraestructura dado su tamaño y cantidad en función la relación de movimiento de mercancía entre la ciudad núcleo del área o región metropolitana y los municipios aledaños.

Es así, como la congestión se manifiesta de manera más evidente en el ámbito metropolitano a diferencia de otros, en forma de largas colas de vehículos saturando las carreteras en determinados periodos del día (horas pico), o en días concretos a lo largo del año (por ejemplo, salidas y regreso de vacaciones en las grandes ciudades, en donde por lo general para estas fechas se restringe la circulación de vehículos de carga). Por lo que, si en un momento determinado el número de vehículos que utiliza una carretera se halla cercano al límite de la capacidad de ésta, el efecto es un peor nivel de servicio, que se traduce en velocidades medias más bajas y en tiempos empleados en los trayectos más elevados de lo normal.

En principio tal y como la afirma De Rus et al. (2003), hay dos tipos de costos generados por la congestión de carreteras: el exceso de tiempo que los usuarios invierten en sus desplazamientos, y el exceso de consumo de combustible por la circulación a velocidades muy bajas. La cuantificación de estos costos es relativamente simple si existe información suficiente sobre la red de carreteras que se pretende analizar. La disponibilidad de datos sobre intensidades medias de circulación por periodos horarios (flujo de vehículos) y sobre velocidades medias alcanzadas en las vías que tienen problemas de congestión, permite realizar estimaciones del tiempo extra que los vehículos invierten en los desplazamientos.

Para esto, se requieren datos sobre recorridos medios por vehículo, y pueden estimarse las diferencias en tiempos para realizar dichos recorridos en condiciones de circulación fluida y con congestión. De manera similar, las estimaciones sobre el exceso de consumo de combustible pueden aproximarse a partir de información sobre consumos medios a diferentes velocidades. Si bien el consumo depende mucho del tipo y edad de los vehículos, resulta factible utilizar valores medios que reflejen el consumo global de un parque de automóviles conocido.

Aunque la cuantificación de la magnitud de la congestión, en términos de tiempos y consumos extra de combustibles realizados por los vehículos, sea relativamente sencilla,

la principal dificultad para cuantificar los costos está asociada a cómo determinar un valor del tiempo (VOT).

En particular, la cuantificación de los costos del tiempo plantea serios problemas desde el punto de vista metodológico[12], ya que idealmente la valoración correcta serían los costos de oportunidad de los tiempos perdidos por la circulación en condiciones de congestión. Los costos de oportunidad varían mucho de acuerdo con los individuos que realizan los viajes, el modo y, especialmente, según los motivos de viaje.

Para la estimación y valoración de la congestión (Cec) se parte del VOT que puede llegar a establecerse según la tipología de camión y el tipo de mercancía abordo por el tiempo como la diferencia de la circulación en escenario a flujo libre y un escenario con congestión ($\Delta\, T$), dicha diferencia se puede determinar fácilmente a partir de un modelo de transporte, adicionando a esto costo extra de consumo de combustible por la circulación a bajas velocidades (C_x). A continuación se expresa lo anterior mediante la Ecuación (2.3):

$$Cec\ = VOT * \ \Delta\, T + C_x \quad (2.3)$$

Donde el costo de la congestión se evalúa como el VOT expresado en COP/min multiplicado por el delta entre el modelo bajo la operación a flujo libre en un escenario base y otro en un escenario con congestión.

Si bien el costo social de la congestión puede verse como una medida artificial de la ineficiencia en el uso de la infraestructura de transporte, es común aceptar que ella en sí misma es una externalidad, dada por la diferencia entre la curva de costos marginales y la curva de costos medios. “La mejor práctica para la estimación de su costo se basa en las relaciones flujo - demora, el valor del tiempo y las elasticidades de la demanda de transporte". (Márquez Díaz & Cantillo Maza, 2011, pág. 291)

2.4.4 El transporte de carga incidente de la producción económica metropolitana

Puede señalarse que la existencia de infraestructuras y la oferta de servicios regulares de transporte de pasajeros y mercancías hacen aumentar la productividad para el conjunto de

[12] Una de las metodologías más utilizadas en la actualidad corresponde a la aplicación de encuestas de preferencia declarada que permiten construir modelos de elección discreta a partir de los cuales se determina el valor del tiempo de un usuario.

empresas de un país. Aunque algunos de estos efectos generales podrían encuadrarse dentro del concepto de externalidad (en aquellos casos en los que los agentes beneficiados no realizan un pago directo por los efectos externos que mejoran su bienestar o sus ingresos), en otros casos, estos efectos son pagados por los usuarios al comprar los servicios de transporte, o pagar por el uso de las infraestructuras. (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

En el marco de lo anterior, se determinó la producción económica agregada como externalidad positiva del transporte de carga metropolitano ya que desde la teoría existe una clara tendencia a plantear el PIB como variable socioeconómica explicativa del tráfico, en especial del transporte de carga. Por esta razón se asume la sumatoria del PIB de la Ciudad Núcleo y de los municipios de un área o región metropolitana como medida de la actividad económica, en las cuáles por la configuración del territorio y como se explicó antes se presentan Economías Metropolitanas según el concepto introducido por Ruiz (2015), donde se destacan las economías de aglomeración, de red y de alcance. Es importante precisar que si bien en este trabajo sólo se explora en la producción económica como externalidad positiva, en los entornos metropolitanos puedan darse otras más, como por ejemplo valorización de los precios del suelo o procesos de encadenamiento de otras actividades económicas.

Dadas las características de la configuración territorial (usos del suelo y equipamientos) en el ámbito metropolitano la dinámica industrial y logística se destaca, de ahí el papel fundamental del transporte de carga, de manera que se pueden plantear correlaciones que permitan determinar si una o más variables asociadas al transporte de carga (toneladas movilizadas o viajes realizados) pueden ser explicadas a través PIB identificando además de la Ciudad Núcleo, los municipios del área o región metropolitana donde dicha correlación sea más diciente. Es así como en la Ecuación (2.4) se representa la valoración de la producción económica como externalidad (Cea).

$$Cea = \sum_{0}^{N} PIB \quad (2.4)$$

2.4.5 Modelo metodológico propuesto

Comprender las externalidades económicas, y particularizar su análisis a las externalidades tecnológicas reconociendo que existen externalidades asociadas a la

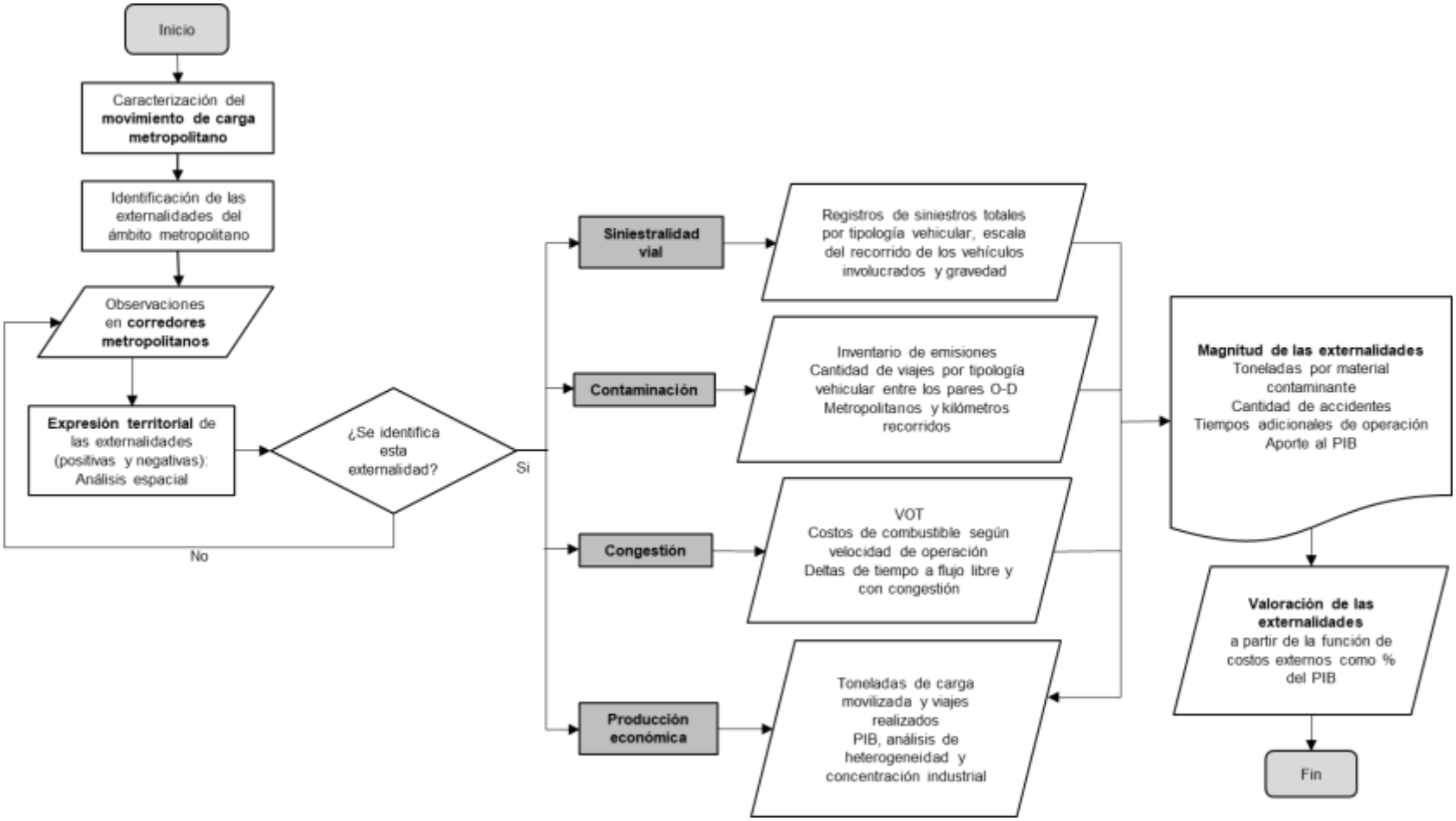
producción y demanda del transporte de carga y externalidades asociadas al ámbito territorial, es la base de la propuesta metodológica para la estimación y valoración de externalidades, ya que esto permitió identificar que las expresiones de las externalidades en el ámbito metropolitano tienen particularidades consecuencia de las Economías Metropolitanas (de aglomeración, de red y de alcance) que se dan entre la Ciudad Núcleo y los municipios aledaños de un área o región metropolitana.

En ese sentido, en la Figura 2-6 se presenta el diagrama de flujo que condensa la estructura del proceso metodológico para la estimación y valoración de las externalidades del transporte de carga metropolitano, en la cual se inicia por caracterizar el movimiento de carga metropolitano para identificar las relaciones entre la Ciudad Núcleo y los municipios metropolitanos y cómo se expresan las externalidades antes identificadas sobre los corredores metropolitanos, en los cuáles se pueden realizar observaciones con el fin de caracterizar su comportamiento e identificar cualitativamente la expresión de las externalidades sobre estos.

Posteriormente se evalúa la disponibilidad y las características de la información de referencia como insumo en el ámbito metropolitano, el reto está en identificar cómo segregar cada externalidad y asegurar que está medición corresponda exclusivamente a los vehículos asociados al transporte de carga que realicen viajes metropolitanos.

El paso final consiste en la valoración económica de la externalidad, que no es más que lograr establecer y hacer comparables las magnitudes de las externalidades, las cuales por si mismas solo con magnitudes no son comparables debido a la naturaleza de cada externalidad y su forma diferente de expresarse en el ámbito metropolitano. Además, el lograr expresar las externalidades como funciones de costo permite incluirlas dentro de la modelación de transporte. Para la valoración de las externalidades existen numerosas investigaciones que buscan darle un valor económico a sus efectos, por ende, se pueden tomar dichos valores en función de la magnitud de las externalidades estimada.

Figura 2-6: Metodología para la estimación y valoración de las externalidades



Fuente: Elaboración propia

3. Una aproximación a la estimación y valoración de las externalidades en la Región Metropolitana de Bogotá

En este capítulo se presentan los resultados del **ejercicio de aplicación del modelo desarrollado para la estimación y valoración de externalidades para el caso de la Región Metropolitana de Bogotá, de manera que de acuerdo con la información disponible se logró evaluar y validar la propuesta del modelo conceptual y metodológico expuesto en el capítulo 2**. El objetivo de realizar este ejercicio es demostrar los múltiples análisis que se derivan de la metodología, los cuales se configuran como una herramienta para la toma de decisiones sobre las restricciones y el manejo del transporte de carga en específico, así como las limitaciones de información que se encontraron a la hora de aplicar el ejercicio en específico en la Región Metropolitana de Bogotá.

De acuerdo con lo anterior, a continuación, se presentan en orden secuencial los procesos que aborda el modelo conceptual y metodológico propuesto, especificando las fuentes de información y el estado de la misma en términos de fortalezas y limitaciones. En primer lugar, se realizó la caracterización del movimiento de carga en las diferentes escalas territoriales de manera que se logró comprender cómo se dan los flujos de carga en el país y a nivel metropolitano, destacando la participación de los flujos de la Región Metropolitana de Bogotá con respecto al movimiento total de carga en modo carretero del país.

En segundo lugar, se realizó un análisis que permitió la identificación de las expresiones de las externalidades del transporte de carga en el entorno metropolitano a través de observaciones a nivel corredor, de manera que se profundizó en la reflexión sobre el transporte de carga como externalidad de la configuración del territorio y a la vez como generador de externalidades. En un tercer apartado se presentan los resultados obtenidos

para cada una de las externalidades identificadas a partir de las propuestas en el modelo conceptual y metodológico, que son susceptibles de medición con la información disponible para el caso de la Región Metropolitana de Bogotá. Y en un cuarto apartado se presentan las limitaciones y recomendaciones que se pueden realizar para garantizar un mejor procedimiento de estimación y valoración de las externalidades.

3.1 Caracterización del movimiento de carga en los ámbitos territoriales

Caracterizar la dinámica de flujos del transporte de carga del país, es un insumo fundamental para entender las magnitudes del mismo y la participación de las regiones metropolitanas, en particular en este caso el análisis se centrará en la Región Metropolitana de Bogotá. Es así como la caracterización del transporte de carga se realizó en términos de cantidad de toneladas movilizadas y viajes realizados entre los diferentes orígenes y destinos tomando como base una zonificación a nivel departamento a partir de la información que se encuentra disponible en el Registro Nacional de Despacho de Carga (en adelante, RNDC) el cual es un sistema que permite recibir, validar y transmitir la información generada en las operaciones del Servicio Público de Transporte de Carga por Carretera[13].

Al respecto, se precisa que una limitación de la información contenida en el RNDC está asociada a que solo las Empresas de Transporte habilitadas por el Ministerio de Transporte para prestar el servicio el Servicio Público de Transporte de Carga por Carretera en el territorio nacional deben registrar obligatoriamente sus operaciones, por ende, dado el contexto colombiano hay un porcentaje de viajes que no se registran en esta plataforma que corresponden a las actividades de transporte “informal” o de “pequeña escala” que prestan algunos transportistas.

Aun con la limitación antes expuesta para efectos del propósito del análisis que se busca realizar, la información del RNDC es válida para la construcción de la matriz de toneladas movilizadas y viajes, dado que las magnitudes obtenidas corresponderán a la carga formal

[13] Manual del usuario del Registro Nacional de Despacho de Carga. Ministerio de Transporte 2014 disponible en el Sitio web: https://rndc.mintransporte.gov.co/MenuPrincipal/tabid/204/language/es-MX/Default.aspx?returnurl=%2F

que se moviliza en el país y coincidirá con la fuente de información de los tableros de control de los corredores logísticos que actualmente maneja el Ministerio de Transporte para el seguimiento al transporte de carga en términos de carga movilizada, viajes, emisiones y siniestralidad, sobre esta última es importante destacar que si bien aparece como parámetro al momento de la realización de la presente investigación no contaba con información.

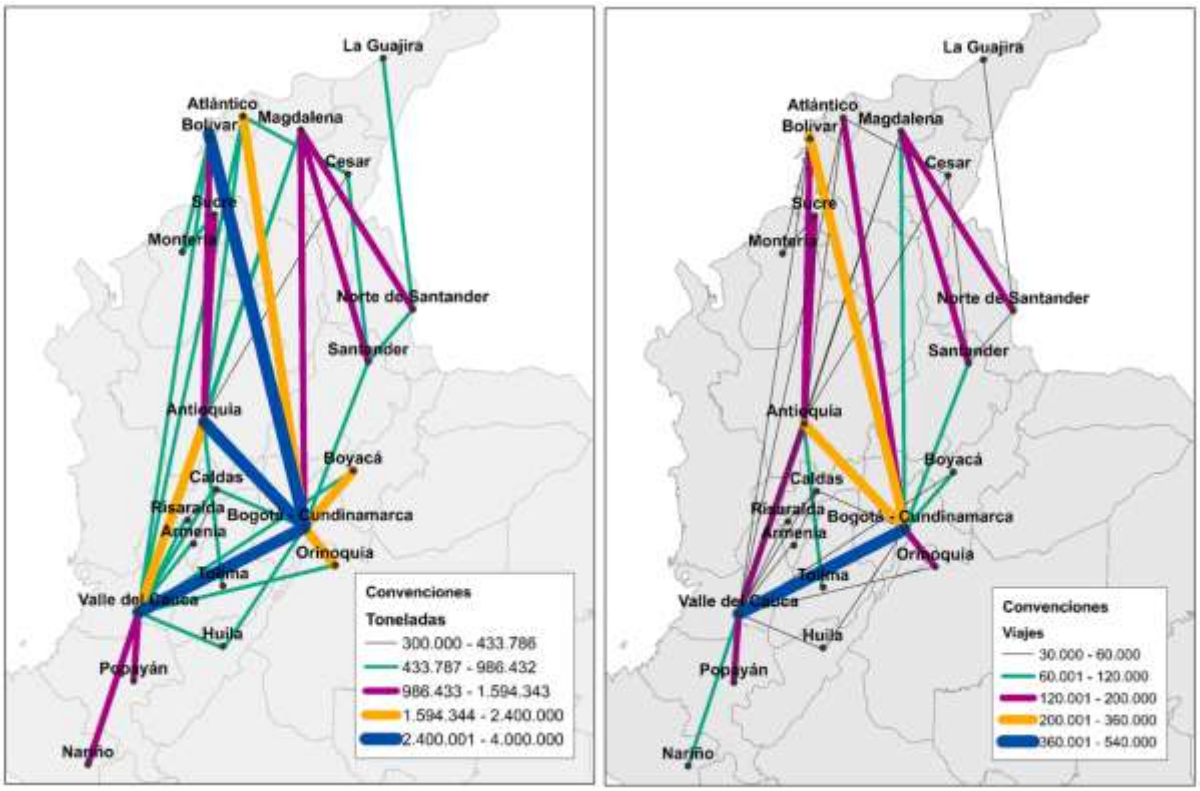
Esto permite recalcar el valor agregado de esta investigación ya que se evidencia la intención del Ministerio de Transporte para incluir las externalidades como parámetro de seguimiento del transporte de carga en el país, parámetro que en la actualidad no tiene el soporte teórico suficiente para cuantificar la externalidad asociada en particular al transporte de carga aislándolo de otros modos, a lo cual esta investigación busca contribuir.

3.1.1 Movimiento de carga nacional

Para la caracterización del movimiento de carga nacional se construyó la matriz Origen – Destino de las toneladas movilizadas y viajes realizados en el 2019 a partir del RNDC, que además permite evidenciar la tipología de camión asociada a cada movimiento y los kilómetros recorridos, por lo que se logró un análisis detallado tal cómo se presenta a continuación en la Figura 3-1, en la cual se presentan las líneas de deseo de movimiento de las 118 millones de toneladas de carga del país que se movilizaron en el 2019, donde se evidencia la fuerte relación que se presenta entre Cundinamarca incluyendo a Bogotá en el análisis con la Orinoquia agrupando los departamentos de esta región, el Valle del Cauca, Antioquia y las ciudades de los tres puertos principales del país.

Se presenta en líneas de deseo de los cerca de 9 millones de viajes en las diferentes tipologías de camión que se realizaron en el 2019. En las que se evidencia la correspondencia del comportamiento de los viajes con las líneas de deseo de las toneladas movilizadas.

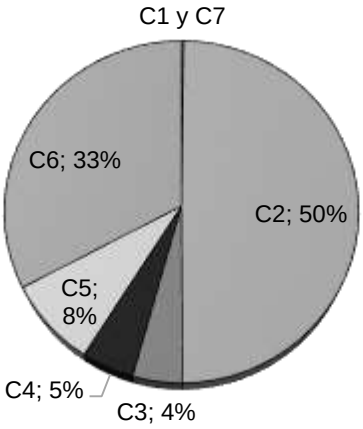
Figura 3-1: Movimiento de carga en toneladas del país en el año 2019



Fuente: Elaboración propia a partir del RNDC

Adicionalmente en la Figura 3-2 se presenta la configuración de los vehículos utilizados en los viajes de carga realizados. Identificar esto es fundamental ya que en externalidades como la contaminación las magnitudes están en función de la tipología del vehículo. Como se evidencia predomina el uso de vehículos pequeños tipo C2 y los grandes tipo C3, solo en estas dos categorías se encuentran el 80% de los vehículos en los que se moviliza la carga del país.

Figura 3-2: Configuración de vehículos utilizados en viajes de carga en el año 2019



Fuente: Elaboración propia a partir del RNDC

El propósito de realizar este análisis del movimiento de carga en el país es generar un orden de magnitud que se pueda asociar a la estimación de las externalidades. En ese sentido, en la Tabla 3-1 se presenta una clasificación propuesta de los viajes de todo el país en los que en función de las distancias en kilómetros que recorren registradas en el RNDC, se clasificaron en viajes de corta (incluye viajes urbanos), mediana y larga distancia, además de viajes metropolitanos. Se destaca de esta clasificación el peso porcentual que tienen los viajes de la Región Metropolitana de Bogotá, los municipios que se tuvieron en cuenta fueron los 20 consignados en el documento (Secretaria Distrital de Planeación, 2014), los cuales representan el 8,8% de los viajes del país.

Tabla 3-1: Participación de las escalas territoriales en el movimiento de carga del año 2019

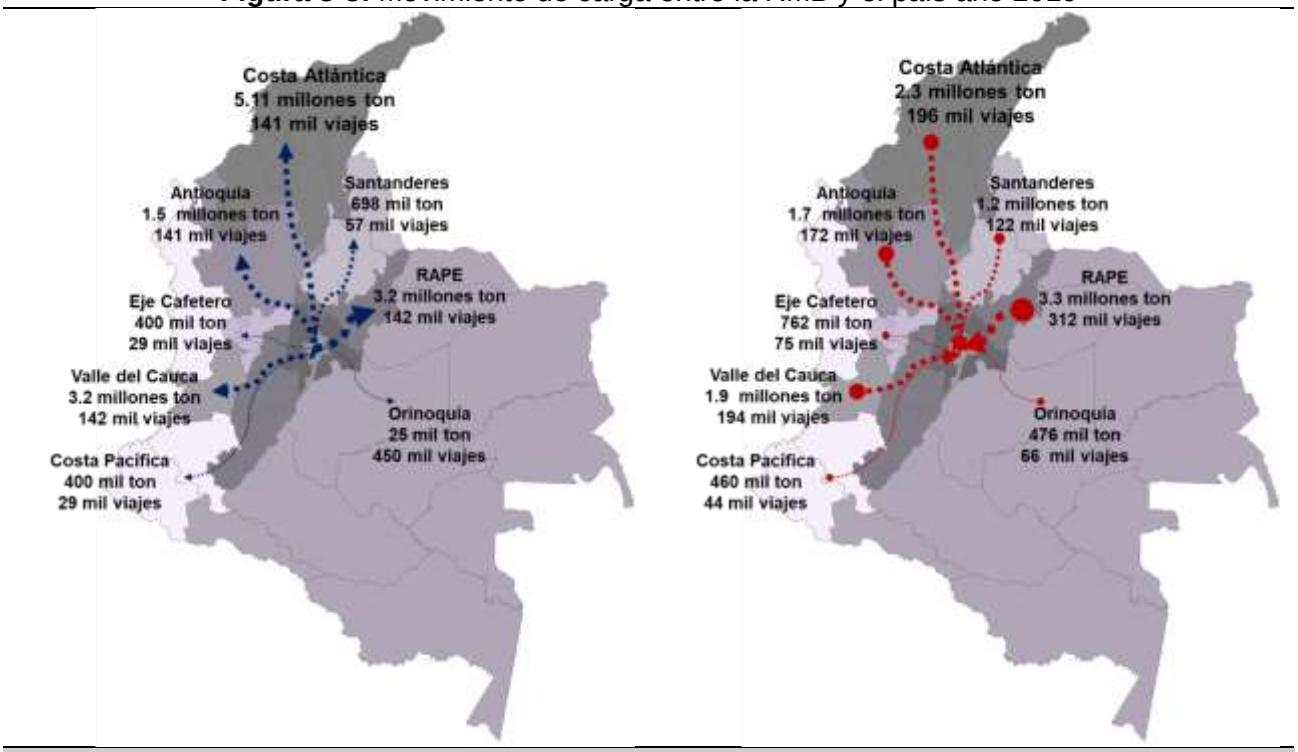
TIPO DE VIAJE	DESCRIPCIÓN	TON	VIAJES	% TON	% VIAJES
Corta distancia	Viajes con distancias menores a 100 km	37.770.147	3.286.967	31,9%	37,1%
Mediana distancia	Viajes con distancia entre 100 km y 300 km	48.620.405	2.983.006	41,1%	33,7%
Larga distancia	Viajes con distancias superiores a 300 km	26.241.416	1.803.624	22,2%	20,4%
Región Metropolitana de Bogotá	Viajes realizados en la Región Metropolitana de Bogotá	5.671.290	775.692	4,8%	8,8%
Total		118.303.259	8.849.289	100,0%	100,0%

Fuente: Elaboración propia a partir del RNDC

Buscando aterrizar el análisis del movimiento de carga del país en la Figura 3-3 se presentan los movimientos que se realizan hacia y desde la Región Metropolitana de Bogotá, agrupando las zonas de análisis en términos de las regiones que se han constituido tales como la Región Administrativa y de Planeación Especial (Región Central RAP-E conformada por los departamentos de Boyacá, Huila, Tolima, Meta y Cundinamarca) y regiones geográficas como la Costa Atlántica, Pacifica, la Orinoquía y separando los departamentos del Valle del Cauca y Antioquia dado el alto flujo de carga con estos.

En la Figura 3-3 se presenta un análisis más detallado sobre el Departamento de Cundinamarca y su interacción en términos de movimiento de carga con la Región Metropolitana de Bogotá, así mismo se realiza un detalle sobre la interacción de Bogotá como Ciudad Núcleo de la Región Metropolitana con los otros municipios que conforman esta unidad funcional. Se evidencia que Bogotá se abastece en gran proporción de las mercancías que se producen en la periferia, sin embargo, la producción de Bogotá en su mayoría no tiene como destino los municipios de la Región Metropolitana.

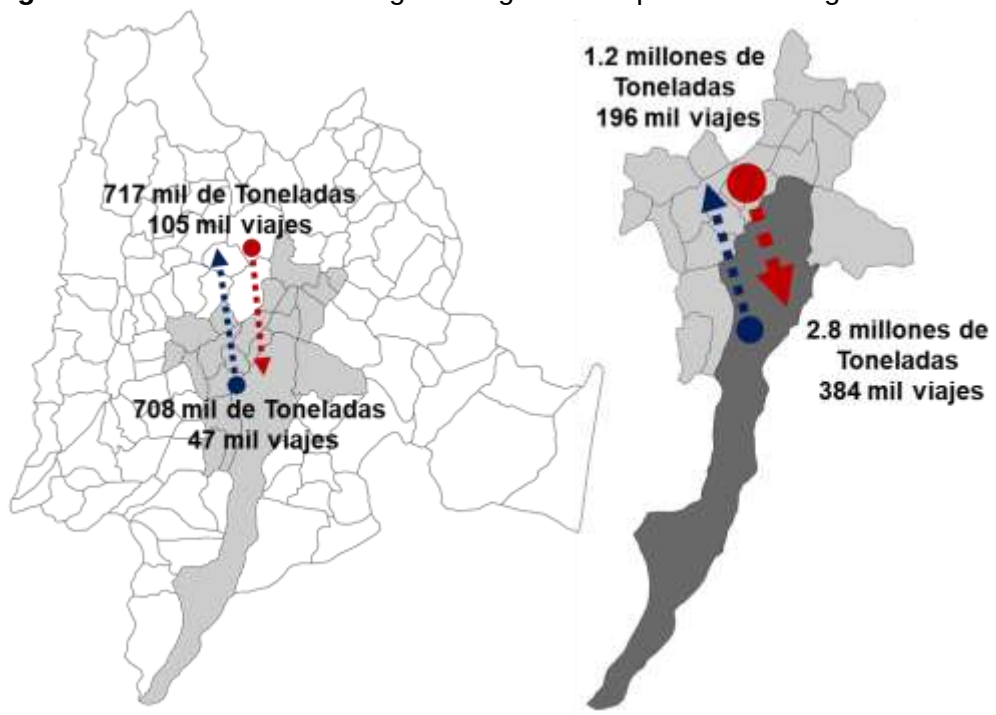
Figura 3-3: Movimiento de carga entre la RMB y el país año 2019



Movimiento de carga generado en la RMB	Movimiento de carga atraído en la RMB

Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC

Figura 3-4: Movimiento de carga la Región Metropolitana de Bogotá D.C. año 2019

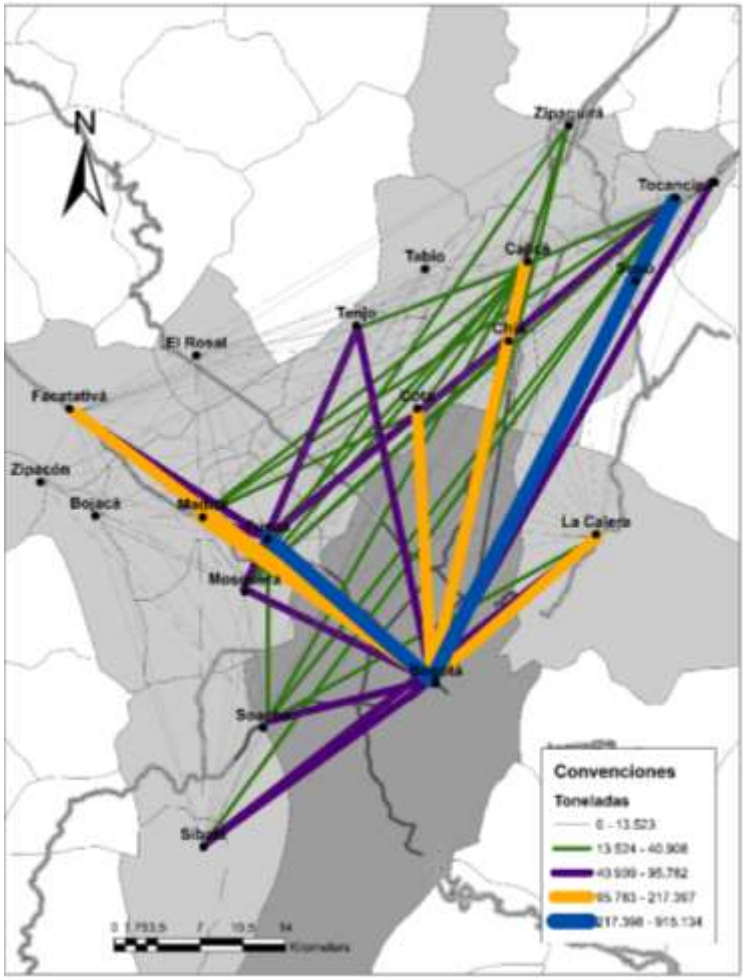


Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC

3.1.2 Movimiento de carga metropolitana

Una vez caracterizado el movimiento de carga en Colombia y en el entendido de la Región Metropolitana de Bogotá como subsistema dentro del sistema de ciudades nacional, el análisis se centra en este entorno metropolitano funcional pero no constituido legalmente (al momento de realización de la presente investigación se encuentra aprobada en último debate la iniciativa de su constitución en el Senado de la República). Entrando en el detalle del análisis tal y como se observa en la Figura 3-5 donde se representan las 5.671.290 toneladas de carga, se evidencia que las interacción más fuerte en el movimiento de carga se da entre Bogotá y Tocancipá en ambos sentidos igual que con el municipio de Funza, en el Anexo A se precisan los pares O-D metropolitanos con sus respectivos valores de toneladas movilizadas y sus viajes.

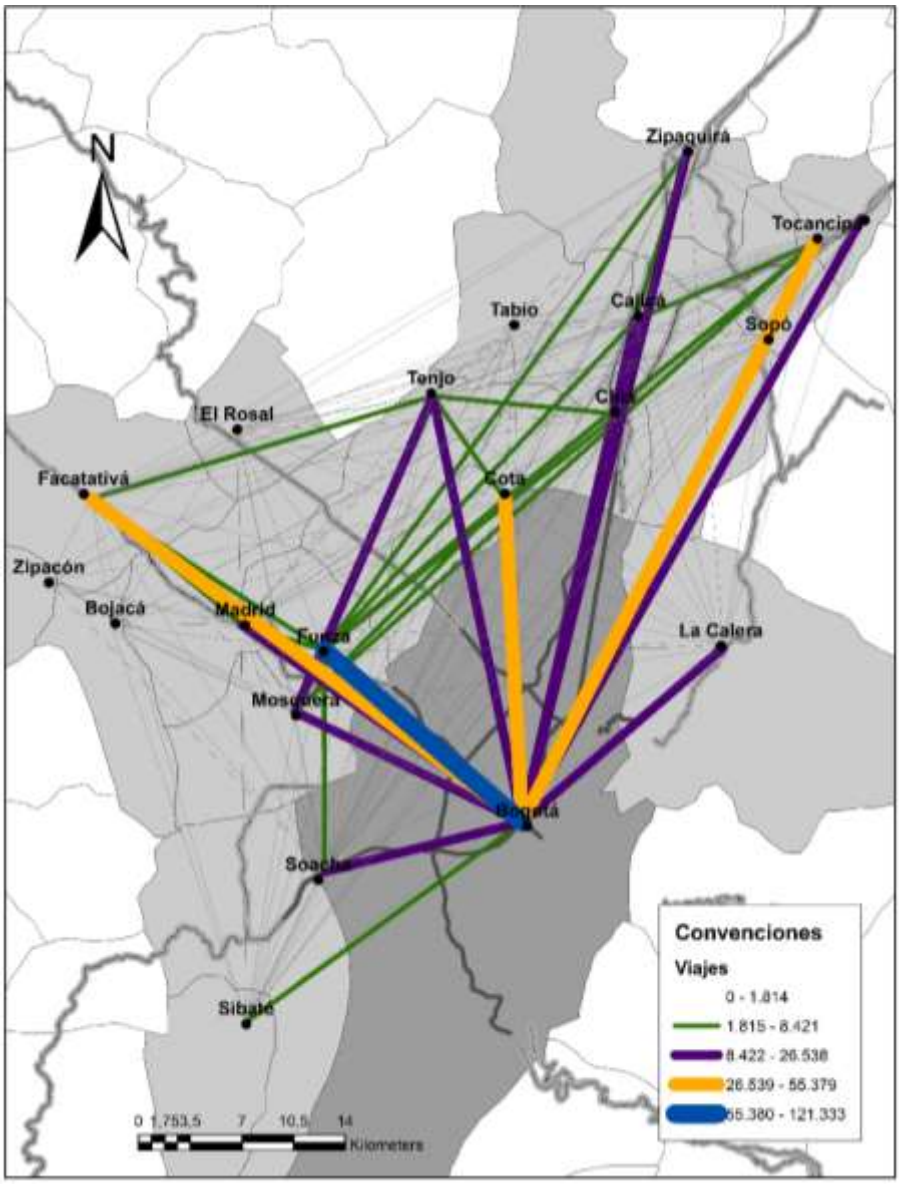
Figura 3-5: Líneas de deseo entre pares O-D metropolitanos en términos de toneladas movilizadas



Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC

Se realizó además, un análisis en términos de los 775.692 viajes anuales en el que se evidencia tal y como se presenta en la Figura 3-6, que la interacción más fuerte se da entre Bogotá y Funza en ambos sentidos al igual que con Tocancipá, en este caso se evidencia la importancia del análisis de la tipología de camión utilizada, ya que en el caso de Tocancipá si bien la relación de toneladas movilizadas es la más alta como se evidenció antes, no corresponde con el comportamiento de los viajes ya que se encuentra por encima Funza, esto se da por la tipología de camión que utilizan para los viajes.

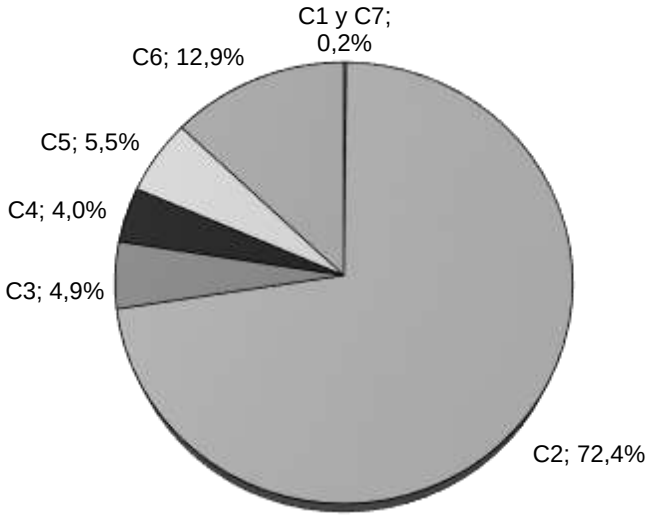
Figura 3-6: Líneas de deseo entre pares O-D metropolitanos en términos de viajes



Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC

En el marco de lo expuesto anteriormente, en la Figura 3-7 se presenta la tipología de camiones utilizados en el movimiento de carga metropolitano, se destaca que el 72% de estos se realizan en camiones pequeños tipo C2.

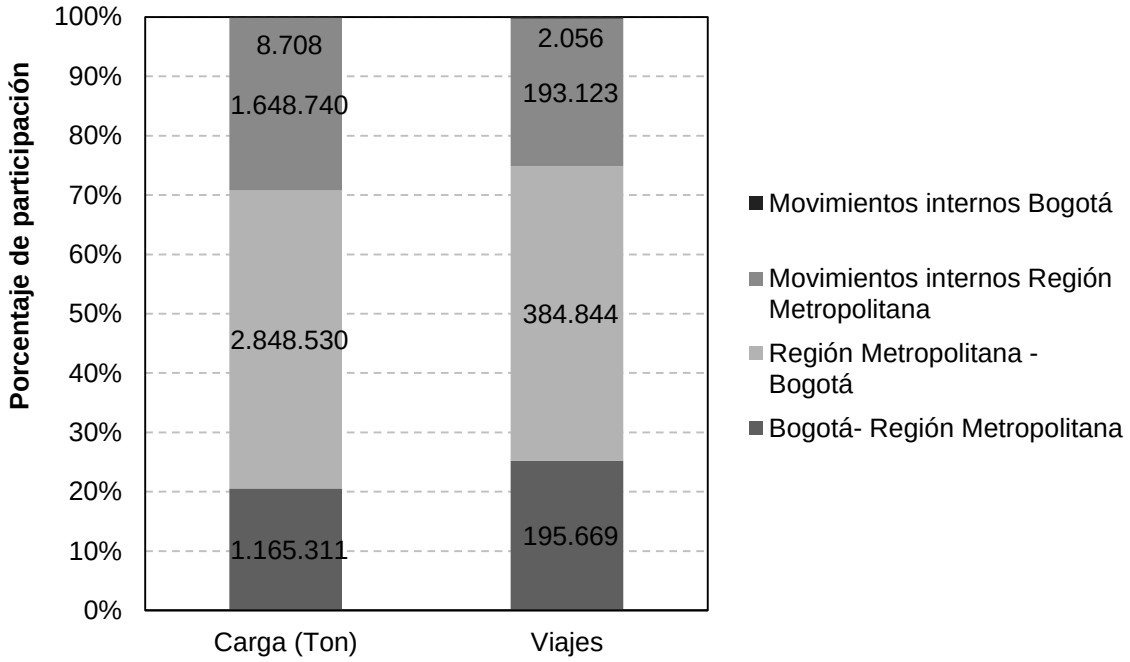
Figura 3-7: Tipología de camiones en el movimiento de carga metropolitano



Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC

Por último entrando en el detalle de la clasificación de los movimientos de carga en la Región Metropolitana de Bogotá, en la Figura 3-8 se presenta la clasificación de los viajes, donde se evidencia que predominan los movimientos de carga con destino Bogotá como Ciudad Núcleo de la Región Metropolitana de Bogotá.

Figura 3-8: Clasificación de los movimientos de carga en la Región Metropolitana de Bogotá



Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC

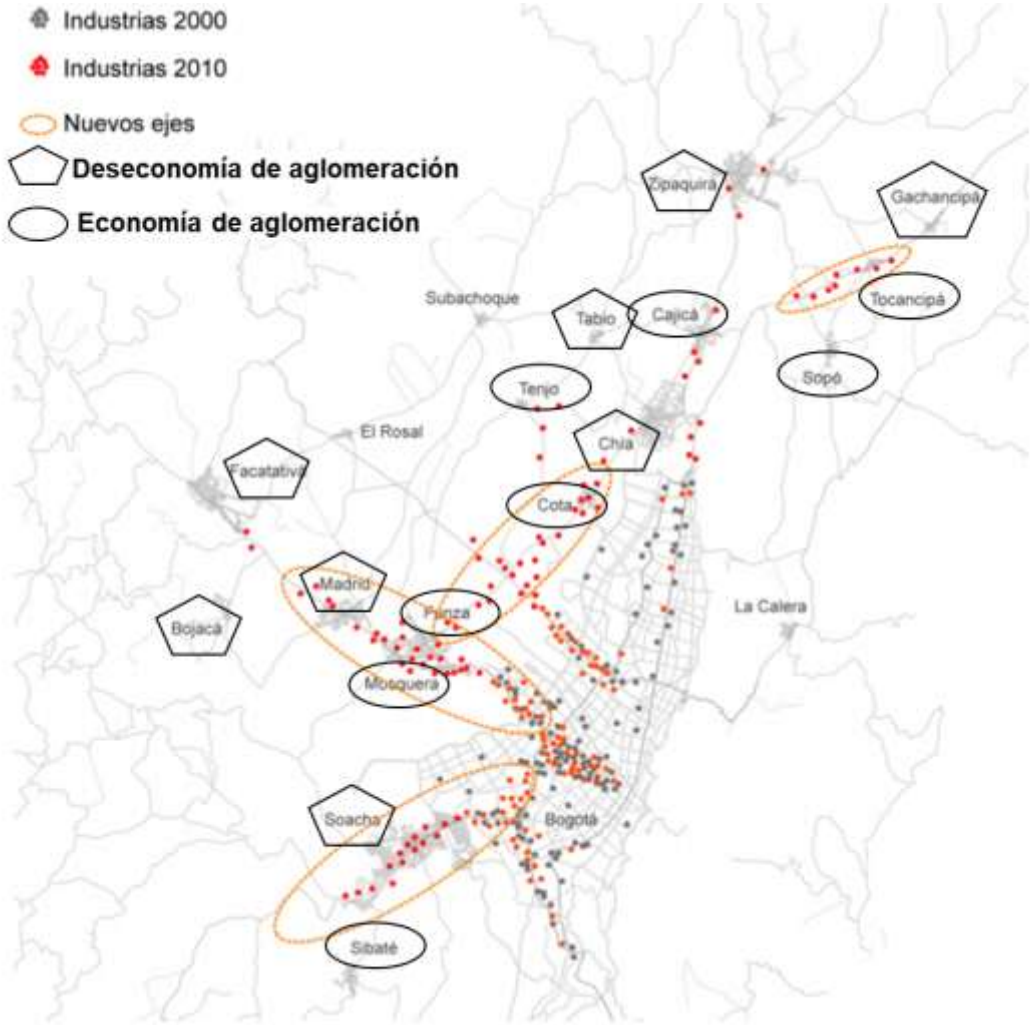
3.1.3 Caracterización logística e industrial del ámbito metropolitano

Una vez caracterizados los flujos de carga se procede al análisis espacial del entorno metropolitano con el fin de desarrollar el concepto planteado del transporte como externalidad territorial destacada en el ámbito metropolitano por la configuración territorial en la que se ubican centros industriales y logísticos en los municipios metropolitanos y a su vez de las externalidades tecnológicas de tipo ambiental, social y de economía sectorial como resultado de la producción y demanda del transporte. El abordaje del primer concepto se realiza a partir del análisis espacial de puntos de industria y logística en la Región Metropolitana, en donde se evidencia que la mayor concentración de industria históricamente se ha dado sobre el eje vial de la Avenida Calle 13 principal vía de integración regional que conecta a Bogotá con el resto del país.

Con el crecimiento de la ciudad, las industrias localizadas a lo largo del eje quedaron inmersas en el casco urbano de la ciudad. Ante la reducción de suelo disponible en las periferias de la ciudad y con la consolidación del proceso de metropolización de la región, se ha dado un incremento de la localización industrial fuera de los límites de la ciudad, sobre la extensión del corredor de la Calle 13 (Silva M., 2016).

Este hecho se puede observar a partir de la Figura 3-9 la cual muestra la localización de industria dada entre los años 2000 y 2010. Además de la extensión del eje de localización industrial en el corredor de occidente, se destacan 3 ejes más de localización industrial: un eje al nororiente que involucra los municipios de Sopó, Tocancipá y Gachancipá; un eje al suroccidente conformado por Soacha y Sibaté; y un eje al occidente conformado por Cota y Funza. Estos ejes de localización de industria, están conformados principalmente por aquellos municipios que exhibieron en 2010 las mayores economías de aglomeración. (Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional - UNCRD, 2011).

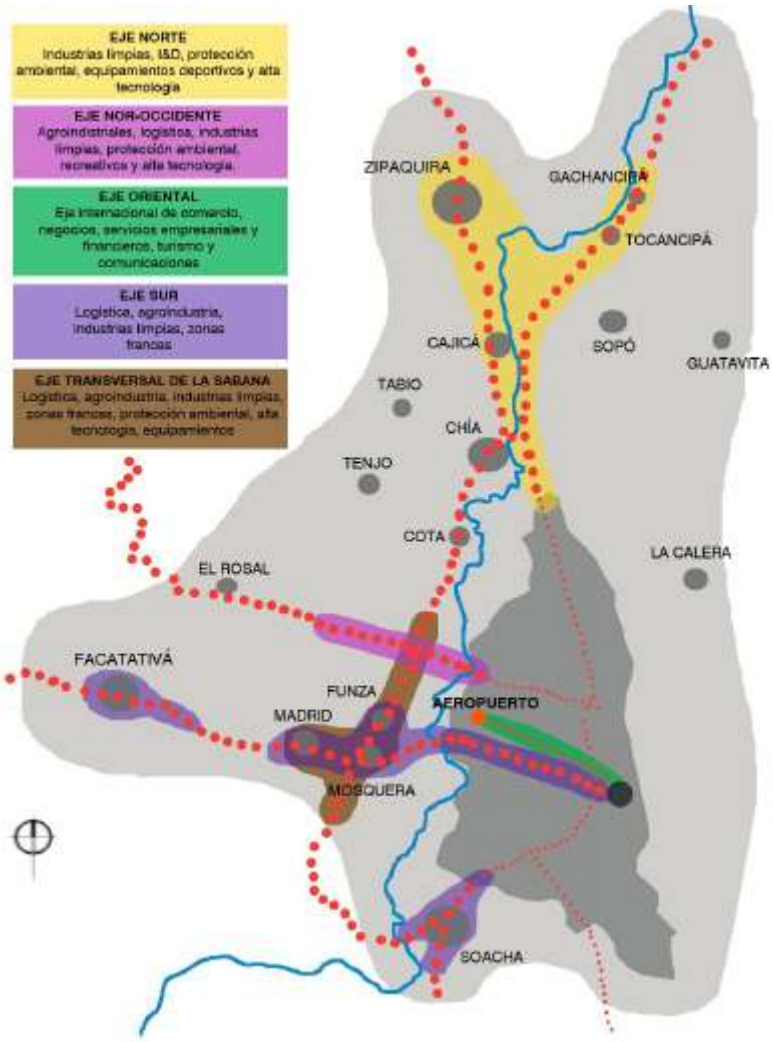
Figura 3-9: Localización de industria en Bogotá y el ámbito urbano para los años 2000 y 2010



Fuente: Tomado de (Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional - UNCRD, 2011, pág. 14)

Dado el que el análisis anterior correspondía a la revisión de la configuración espacial de la Región Metropolitana al año 2010, como parte de la información disponible, se encontró una investigación de referencia del año 2012, en la que se caracterizaron cada uno de los ejes de desarrollo metropolitano a través del corema que se presenta en la Figura 3-10, en la que se evidencia la distribución entre áreas industriales según tipología de producto y áreas vivienda en algunos municipios de la Región Metropolitana de Bogotá.

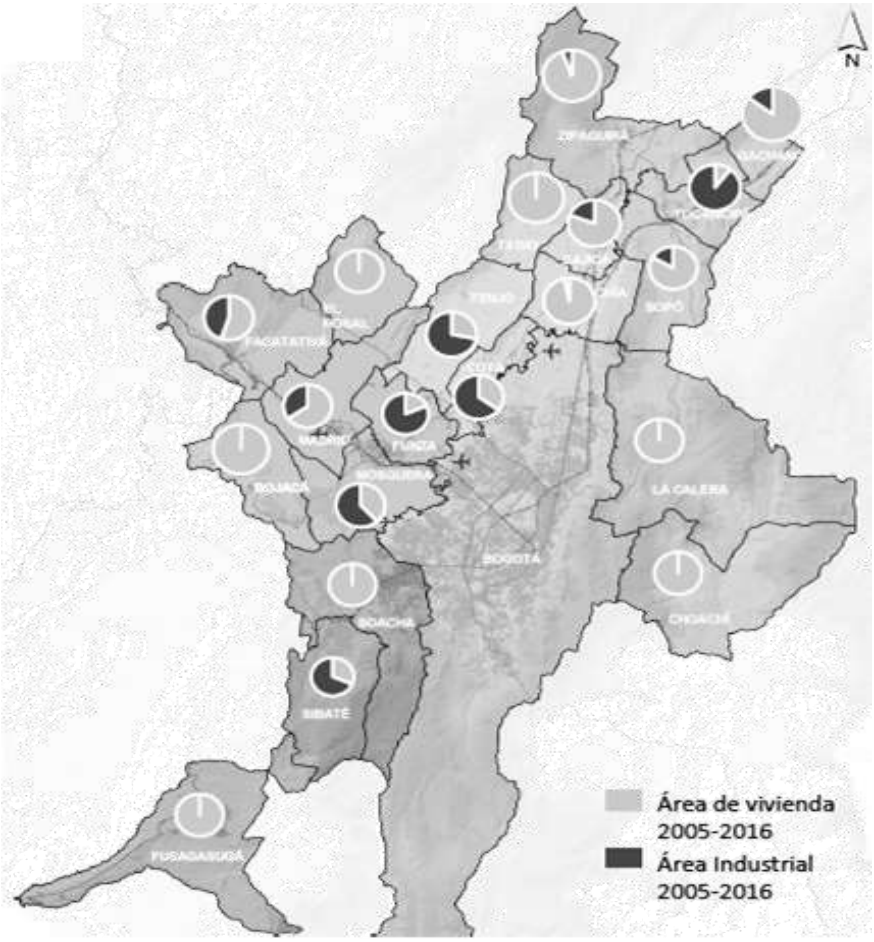
Figura 3-10: Ejes de desarrollo de la Región Metropolitana de Bogotá



Fuente: Tomado de (Mora A., 2012, pág. 127)

Complementando lo anterior, en la Figura 3-11 se presenta un análisis más reciente en el que se evidencia como predominante la vocación industrial en algunos municipios de la Región Metropolitana (entre los que se destacan Tocancipá, Funza, Mosquera, Facatativá y Sibaté), esto coincide con la distribución de los viajes y movimientos de carga identificados para el 2019 a través de las matrices construidas a partir del RNDC, lo que se evidencia en esto, es cómo la actividad industrial se ha ido ampliando a través de los años y determina la configuración del territorio, y esta a su vez genera como consecuencia el aumento de los viajes y movimiento de carga metropolitano.

Figura 3-11: Área industrial en entorno metropolitano de Bogotá



Fuente: Adaptado de Estudio de crecimiento y evolución de la huella urbana Bogotá – Región. (IDOM, 2018)

Esta estructuración del territorio conllevó a la aparición del transporte de carga el cuál se puede asumir como una externalidad de la localización de centros de industria y logística en la periferia de Bogotá, pero a su vez como generador de externalidades que se expresan sobre los corredores metropolitanos.

Esta perspectiva simplificada se puede explicar desde la Teoría del Lugar Central[14], la cual deja en evidencia que los costos de transporte han sido determinantes en la estructuración espacial de una región. Al estar asociados a la distancia:

[14] Es una teoría geográfica deductiva desarrollada por el geógrafo alemán Walter Christaller (1893–1969), intenta explicar, a partir de ciertos principios generales, la distribución y jerarquización de los espacios urbanos que prestan determinados servicios a la población de un área circundante. Para ello establece el concepto de "lugares centrales" a los puntos donde se prestan determinados

> Entendida como un factor de impedancia y determinante de la accesibilidad en la interacción espacial, es así como se evidencia que los costos de transporte (asumidos solo desde la noción de costos del productor y del usuario, dejando de lado los costos externos) permiten explicar además las decisiones de localización dentro de una aglomeración. Decisiones que por efecto acumulativo van incidiendo en la estructuración del espacio. (Camagni, 2005, pág. 25)

Por esta razón, el reacomodamiento y los grandes cambios de la estructura espacial de la región metropolitana de Bogotá puede explicarse de manera teórica a partir de la Teoría de Localización propuesta por Von Thünen. (Silva M., 2016)

3.2 Los corredores de carga en la región metropolitana de Bogotá

La escala en la que se expresan más evidentemente las externalidades en los entornos metropolitanos son los denominados corredores de integración metropolitana, es por esto que las restricciones al paso de vehículos de carga orientadas a mitigar externalidades como la contaminación y la congestión se realizan en dos escalas, por un lado, se restringe el paso totalmente de vehículos por Bogotá como núcleo de la Región Metropolitana, lo que por otro lado y en consecuencia genera la transferencia de externalidades a los municipios aledaños.

Así mismo son los corredores de integración metropolitana los que funcionan como captadores de viajes con origen y destino en la Región Metropolitana de Bogotá, pero también como corredores de paso para viajes de otras regiones de Colombia, por lo que terminan acogiendo las expresiones de las externalidades del transporte de carga de escala nacional, regional, departamental, metropolitano y municipal.

Para analizar lo anterior, se realizó un análisis general de los 5 corredores de integración metropolitana (Calle 13, Calle 80, Autonorte, Autosur y Salida a Villavicencio), haciendo uso de fotografías a lo largo de cada tramo de manera que por inspección visual se lograron establecer relaciones entre las expresiones de las externalidades y los actores que se

servicios para la población de un área circundante. La teoría sugiere que hay leyes que determinan el número, tamaño y distribución de las ciudades.

evidencian. De manera que se realizó un análisis empírico por inspección visual que permitió hacer una disertación sobre los factores asociados a las externalidades: condiciones operacionales, tipos de combustible, tipos de vehículo, usos del suelo, equipamientos aledaños, asociar a un agente una externalidad o determinar cómo una externalidad afecta a otro agente.

En la Figura 3-12 se presenta un ejemplo de la interpretación de una de las fotografías de la Calle 13, sobre las cuales se identifican en primer lugar los actores involucrados (transporte de carga de diferentes tipologías vehiculares y transporte público, ambos de escala urbana, metropolitana, regional y nacional, transporte especial, motos, automóviles, bicicletas y peatones), la configuración del entorno en términos de usos del suelo aledaños (zonas industriales y con servicios de comercio) y la sección vial (con capacidad reducida para el volumen circulando en la hora pico y con evidentes deficiencias en la infraestructura por temas de capa de rodadura y señalización), y por último la evidencia la expresión de las externalidades que se presentan (siniestros, congestión, contaminación y deterioro de la malla vial).

Este rápido análisis permite que surjan varios cuestionamientos acerca del cómo mitigar y/o internalizar las externalidades bajo el escenario que se observa, en el que confluyen diversos actores y situaciones a los que podrían asociarse las diferentes externalidades, de allí se retoma el debate sobre quién debe pagar las externalidades y sí es posible aislar el efecto de cada actor vial en las externalidades y determinar la cuota que cada uno debería internalizar para asumir ese costo externo del transporte asumido como un costo social en la actualidad.

Para el caso específico de este ejemplo y concreto enfocando el análisis solo en el transporte de carga, si se elimina totalmente el transporte de carga (sea por una restricción de paso por el corredor o por la habilitación de otro corredor tipo variante) de esta imagen ¿desaparecerán las externalidades totalmente? ¿en qué proporción disminuirán si es el caso? En el Anexo B se presentan en total las observaciones realizadas sobre los 5 corredores metropolitanos.

Figura 3-12: Expresión de las externalidades en el corredor metropolitano de la Calle 13 de Bogotá

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de Google Streetview, 2019

En el caso particular de la Región Metropolitana de Bogotá, se identificó que la expansión urbana se ha caracterizado, por un lado, por las decisiones de ordenamiento territorial local definidas por cada jurisdicción de los respectivos municipios (las cuales no han sido muy coordinadas), y, por otro lado, por la lógica del mercado inmobiliario de la región que se ha basado en la especulación sobre la renta del suelo (grandes proyectos residenciales y parques industriales).

Adicionalmente, Bogotá y sus municipios aledaños constituyen un importante nodo logístico, dada su ubicación geográfica estratégica y la presencia del terminal de carga del principal aeropuerto internacional del país y uno de los más importantes de Latinoamérica.

En ese sentido, los esfuerzos de la región se han encaminado al planteamiento de lineamientos para una política logística regional, articulada con una política nacional logística que atienda las cadenas de comercio exterior, promueva la eficiencia y crecimiento de cadenas locales, adopte medidas para la reducción de costos de transporte para el productor, aumente la inversión en infraestructura logística, elimine intermediarios, y provea soluciones logísticas, con el propósito de generar más y mejores oportunidades para la economía.

El resultado del planteamiento de observar la expresión de las externalidades en los corredores, permitió caracterizar el comportamiento de los vehículos de carga en tres diferentes tramo tipo a lo largo de cada corredor en función de la configuración del territorio que se presentan en la Figura 3-13 y que se describen a continuación:

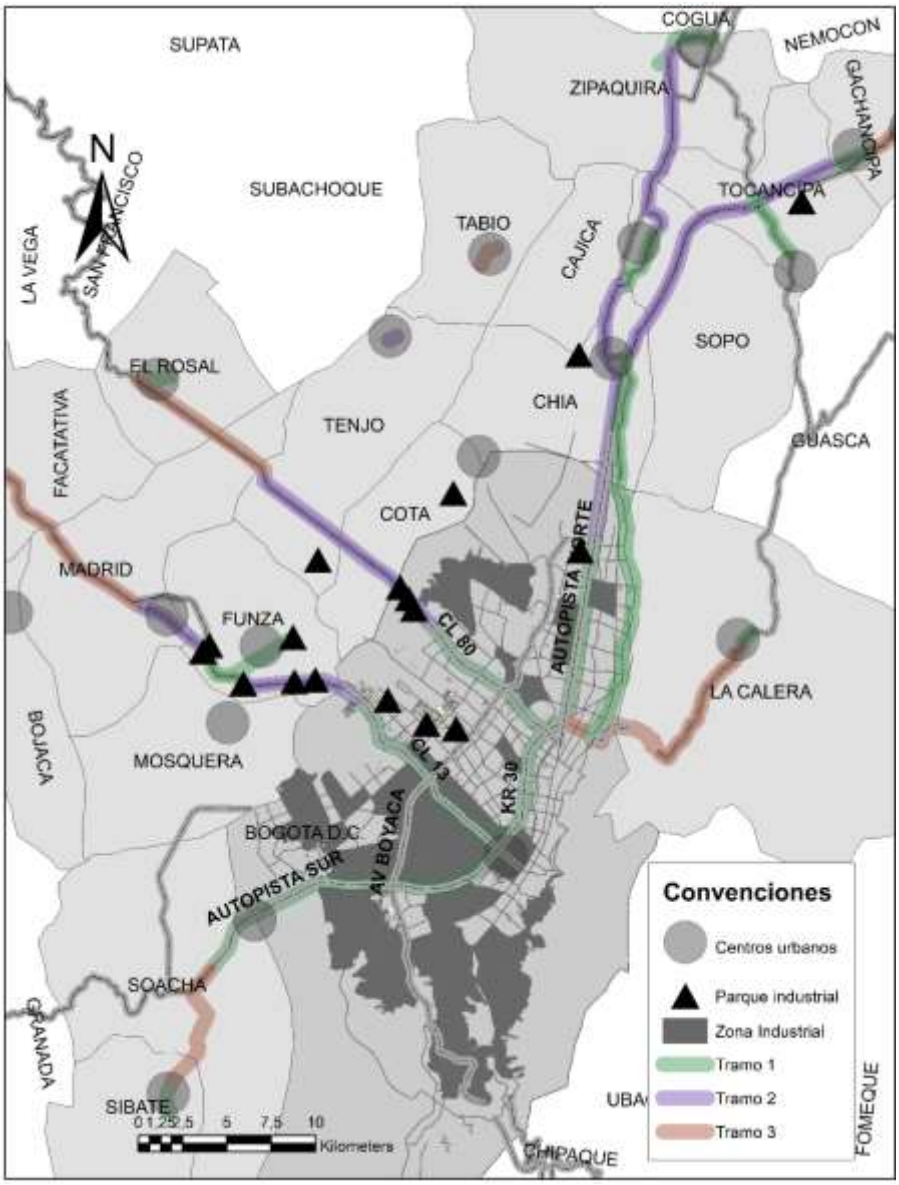
- El tramo tipo 1 corresponde a los pasos por cascos urbanos en los que, por el tamaño de los vehículos de transporte de carga, este se percibe como principal generador de externalidades pero que está acompañado de altos flujos de otras tipologías vehiculares y rodeado de elementos como equipamientos y la infraestructura en sí de la vía con adecuaciones o carencias puntuales para actores viales vulnerables tales como los ciclistas o peatones. Las características operativas de este tipo de tramo están muy asociadas a los usos del suelo aledaños, se destaca por las bajas velocidades y altos flujos vehiculares. La percepción de las externalidades es muy alta.

- El tramo tipo 2 corresponde a las partes del corredor con acceso a centros de consolidación de carga o centros logísticos metropolitanos. La percepción de las externalidades se puede considerar como de mediano impacto en razón de los pequeños conflictos que se pueden presentar en los puntos específicos de acceso a centros de consolidación de carga o centros logísticos metropolitanos. Las características operativas de la vía tienen un mejor nivel de servicio con respecto al tramo tipo 1.

- El tramo tipo 3 corresponde al flujo libre, es decir a los tramos de corredor que permiten el tránsito de camiones y otros actores viales sin interferencias entre estos, en este tramo la percepción de las externalidades es muy baja ya que el tráfico se mantiene continuo y no se presentan las condiciones para la generación de conflictos entre los diferentes actores viales.

De acuerdo con el reconocimiento de los corredores metropolitanos a través del análisis de imágenes, se logró establecer como base para la estimación de las externalidades, la distribución de los flujos de la matriz de toneladas movilizadas y viajes realizados en los corredores del entorno metropolitano.

Figura 3-13: Corredores metropolitanos identificados

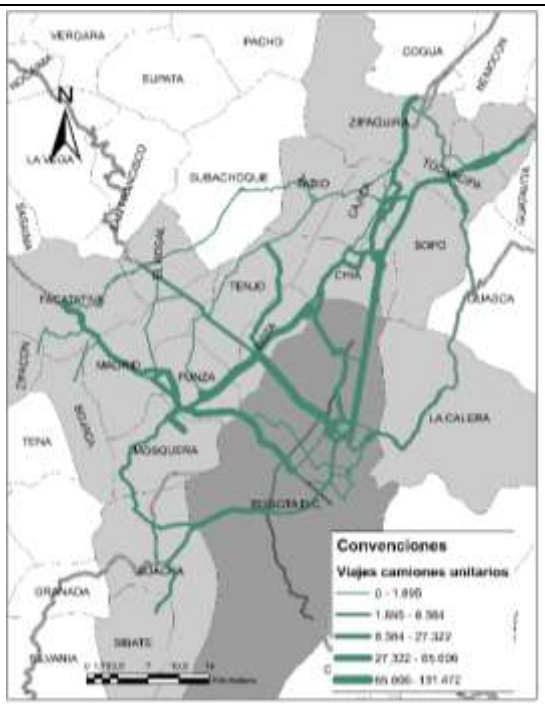


Fuente: Elaboración propia a partir de observaciones en corredores metropolitanos

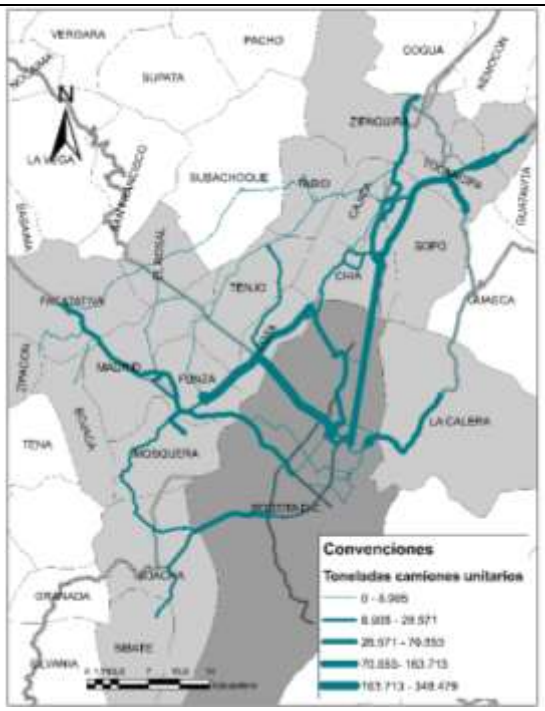
Dado que para la Región Metropolitana de Bogotá no se contó con el modelo de transporte actualizado y calibrado incluyendo los vehículos de carga, a partir de la matriz de carga O-D construida en el numeral 3.1.2 se realizó un proceso de asignación utilizando una API de Google que se puede manipular haciendo uso del Software R conocida como GraphHopper Route Optimization[15].

[15] https://docs.graphhopper.com/#operation/getRoute

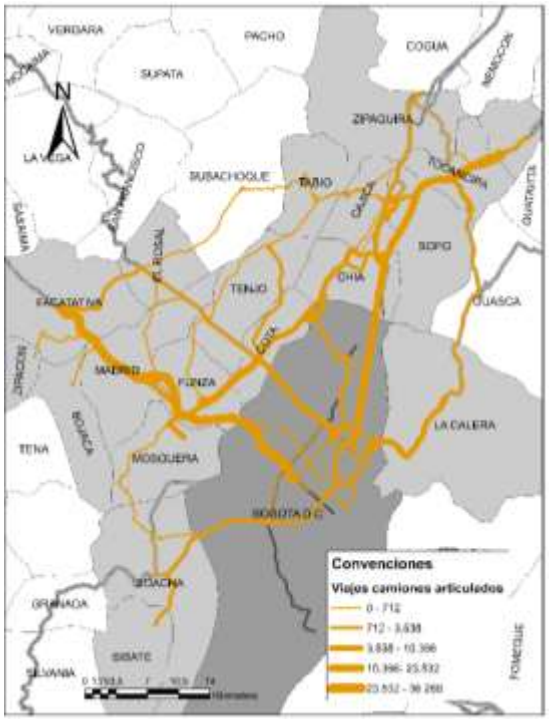
Figura 3-14: Asignación de flujos de carga



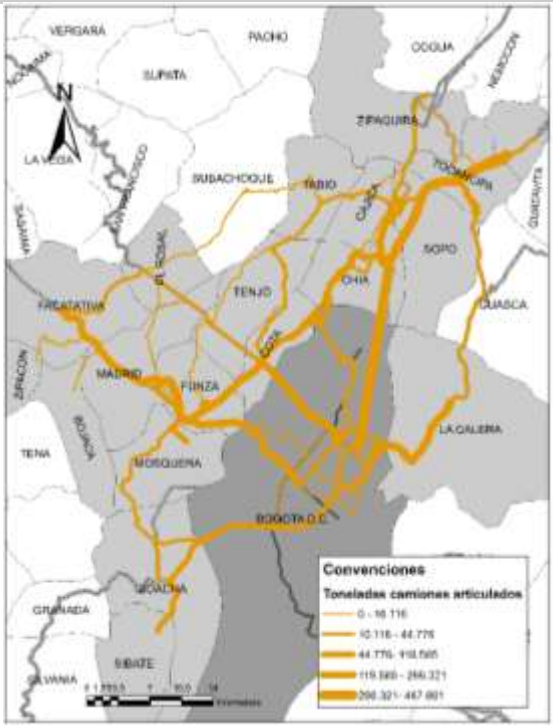
Viajes camiones unitarios



Toneladas camiones unitarios



Viajes camiones articulados



Toneladas camiones articulados

Fuente: Elaboración propia a partir de ejercicio de asignación de GraphHopper Route Optimization

La API utilizada puede integrar la planificación de rutas de un punto A a un punto B, optimizando las rutas sobre la red de Googlemaps utilizando los datos de rutas frecuentes y velocidades usuales de los que dispone Google, los resultados de dicha asignación se presentan en la Figura 3-14, discriminados para camiones unitarios (CU) y camiones articulados (CA).

Los resultados del ejercicio de asignación realizada usando GraphHopper Route Optimization, resultaron consecuentes con el comportamiento que se evidenció en las observaciones realizadas en los corredores, en las cuales se destaca que los corredores más cargados corresponden a la Calle 13, Calle 80 y la Autopista Norte. Llama la atención que la distribución cambia en función de la tipología de camión, en el caso de los camiones articulados se mantiene una proporción más alta en la Calle 13 sobre la Calle 80, el comportamiento contrario se presenta en el caso de los camiones unitarios.

Finalmente es de destacar que este ejercicio de asignación si bien hubiera sido ideal sobre un modelo de transporte, el uso de esta API de Google es válido ya que permite realizar una representación de la situación real de los viajes de transporte de carga “formales” registrados en el RNDC aislándolos de otros modos y esto constituye una base para realizar la estimación de la magnitud de las externalidades entre pares O-D distinguiendo camiones unitarios y articulados sobre los corredores metropolitanos en donde se asignan los flujos que es donde finalmente se expresan y se perciben directamente las externalidades.

3.3 Estimación y valoración de las externalidades del modelo propuesto

Se presentan a continuación los resultados de la estimación y la valoración para cada una de las externalidades contempladas en el modelo conceptual y metodológico, iniciando por la estimación de la magnitud de las diferentes externalidades, seguida de una representación espacial de dicha magnitud de manera que se logró identificar la expresión de las externalidades en el territorio, y se finalizó el ejercicio con una aproximación a la valoración de cada una de las magnitudes de las externalidades estimadas.

3.3.1 Magnitud de las externalidades

El proceso de estimación de la magnitud de las externalidades partió de la matriz O-D de carga realizada a partir del RNDC para el año 2019, datos base para la aplicación de los métodos seleccionados para la estimación de cada una de las externalidades contempladas en el modelo propuesto en esta investigación que se presentan en función de la disponibilidad de información para el caso particular de la Región Metropolitana de Bogotá. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las externalidades.

- **Siniestralidad vial**

En cuando a la siniestralidad, esta externalidad se analizó consolidando el registro de los siniestros de tránsito que se presentaron entre el 2015 y 2019, obtenido a partir de información de la Secretaria Distrital de Movilidad - SDM (para el caso de Bogotá la cual cuenta con información detallada) y a través de la información sobre fatalidades por siniestros de tránsito de la Agencia Nacional de Seguridad Vial - ANSV para el mismo periodo.

En primer lugar, a partir de la base de fatalidades por siniestros de tránsito de la ANSV, se realizó la validación de la participación de los municipios en el reporte de siniestros de Cundinamarca. Adicionalmente se aplicó otro filtro buscando sólo aquellos siniestros que estuvieran relacionados con vehículos de carga, de manera que se logró establecer un porcentaje de participación de los vehículos de carga en los siniestros con fatalidades en los municipios periféricos de la Región Metropolitana de Bogotá con respecto al total del departamento de Cundinamarca como se presenta en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Participación del transporte de carga en los siniestros viales con víctimas fatales en los municipios periféricos de la Región Metropolitana de Bogotá

Año	Total siniestros Cundinamarca todas las tipologías	Total siniestros con vehículo de carga en municipios metropolitanos	%
2015	247	3	1,2%
2016	261	4	1,5%
2017	222	7	3,2%
2018	200	6	3,0%
2019	247	3	1,2%
Total	1.177	23	2,0%

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos de victimas de siniestros viales anonimizada para el departamento de Cundinamarca de la Agencia Nacional de Seguridad Vial

Dado que la información de siniestralidad de Bogotá es completa y pública se logró desarrollar un análisis más detallado de la participación del transporte de carga en la siniestralidad. Es así como se tomó la base y se identificó dentro del total de siniestros de los años 2015 a 2019 según su gravedad, el porcentaje de estos en el que estuvieron involucrados los camiones tal y como se presenta en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Participación del transporte de carga en los siniestros viales de Bogotá

Año	Total siniestros	Total siniestros con vehículo de carga	%	Con heridos	Con fatalidades	Solo daños
2015	31.341	4.659	14,87%	523	99	4.037
2016	34.988	4.881	13,95%	485	92	4.304
2017	35.171	4.952	14,08%	497	86	4.369
2018	36.953	5.248	14,20%	672	88	4.488
2019	34.990	4.890	13,98%	598	88	4.204
Total	173.443	24.630	14,20%	2.775	453	21.402

Fuente: Elaboración propia a partir de consolidado de siniestros viales de la Secretaria Distrital de Movilidad Bogotá

En lo anterior se evidencia la necesidad de la formalización de la Región Metropolitana de Bogotá con el fin de tener información unificada que permita realizar análisis metropolitanos no segregados de manera que la orientación para la mitigación e internalización de esta externalidad sea con carácter metropolitano y no por cada uno de los municipios que conforman la Región Metropolitana.

Para efectos del ejercicio se logró establecer una tasa de siniestros por cada 10.000 vehículos por modo circulando en cada corredor metropolitano tal y como se presenta en la Tabla 3-4, se destaca que los camiones tienen una tasa más alta con respecto a otros vehículos en los corredores de la Autonorte, Calle 13 y Autosur, precisamente los que se destacan por tener flujos más altos de camiones, por lo que se evidencia empíricamente y de manera general la susceptibilidad a los siniestros que están generando los camiones circulando sobre corredores metropolitanos y el porqué es importante estudiar con mayor profundidad este fenómeno.

Tabla 3-4: Tasa de siniestros viales por modo sobre corredores metropolitanos

Corredor	Autos	Buses	Camiones
AutoNorte	1,0	0,2	1,5
Calle 80	1,1	0,4	0,9
Calle 13	1,3	0,4	1,9
Salida a Villavicencio	4,9	2,1	3,0
AutoSur	2,7	0,6	3,1

Fuente: Elaboración propia a partir de consolidado de siniestros viales de la Secretaria Distrital de Movilidad Bogotá y la base de datos de victimas de siniestros viales anonimizada para el departamento de Cundinamarca de la Agencia Nacional de Seguridad Vial

A partir de lo anterior, es fundamental mencionar que con respecto a la externalidad de la siniestralidad vial, con el fin de percibir una cifra más aterrizada, en el caso de la Región Metropolitana de Bogotá, la expresión de los siniestros se debe presentar como una tasa resultado del total de siniestros que se presentaron en un año con respecto a la magnitud de los flujos de las distintas tipologías sobre los corredores, estas últimas magnitudes se pueden obtener de los TPDA de los peajes de ingreso a Bogotá por cada corredor o de la toma de información de estaciones de aforo maestras ubicadas sobre los corredores.

Así mismo, es importante mencionar que en este caso no fue posible identificar la escala del recorrido que estaban realizando los camiones involucrados en los siniestros, por lo que no se logró identificar el porcentaje de los siniestros en los que estuvo involucrado con vehículo de carga distinguiendo la escala territorial del viaje que estaba realizando al momento del siniestro (metropolitano, de corta, mediana o larga distancia).

- **Impacto ambiental por contaminación atmosférica por emisiones**

Para la estimación del impacto ambiental por efectos de la contaminación se empleó en conjunto la matriz O-D metropolitana elaborada a partir del RNDC y el Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles y Fuentes Fijas Industriales de la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA), a partir de éste último se logró expresar la contaminación en términos de toneladas anuales de emisiones de PM2.5, CO_2 y precursores del PM2.5 (SOx, NOx, VOC, etc.) tal como se presenta en la Tabla 3-5; la metodología empleada por este modelo determina las toneladas de emisiones en función del parque automotor y su composición (tamaño, tipo de combustible) y los kilómetros anuales recorridos por tipología vehicular.

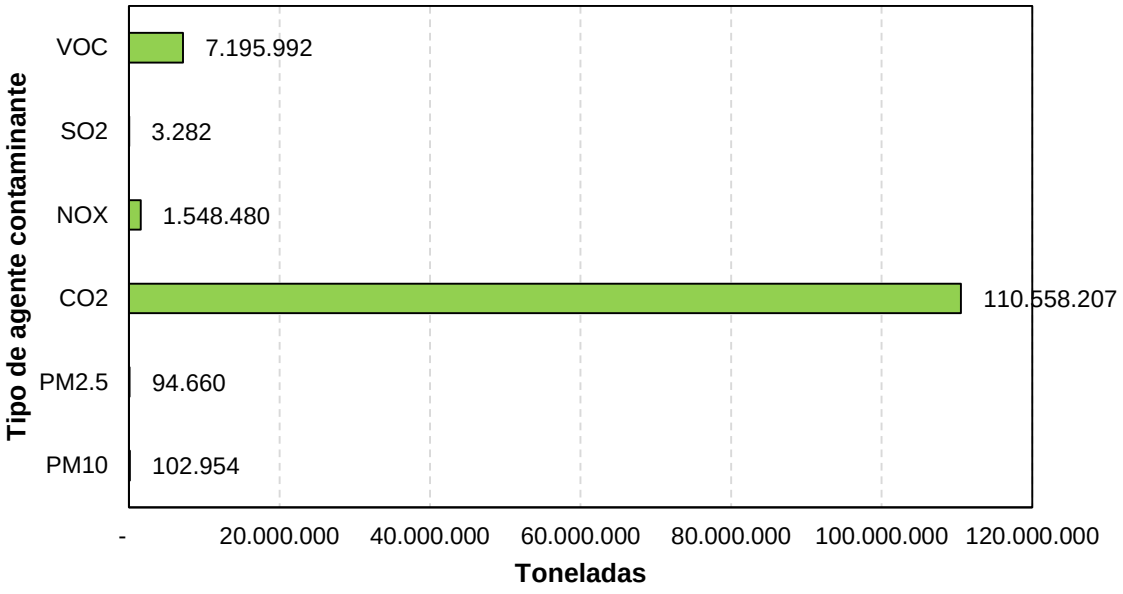
Tabla 3-5: Inventario de emisiones de fuentes móviles para camiones

Tipología de camión	Combustible	Tipología	PM10	PM2.5	CO2	NOX	SO2	VOC
			g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km
Camión C1	Diésel	**C1 - Diésel**	1,028	0,946	1177,982	21,672	0,035	1,844
Camión C2	Diésel	**C2 - Diésel**	1,539	1,416	1625,269	28,81	0,048	1,365
Camión C3	Gasolina	**C3 - Gasolina**	0,519	0,477	509,828	6,187	0,015	1,328
Camión C4	Gasolina	**C4 - Gasolina**	0,138	0,122	998,949	6,742	0,179	7,979
Camión C5	Gasolina	**C5 - Gasolina**	0,378	0,335	1.591	12,027	0,285	13.773
Camión C6	GNV	**C6 - GNV**	0,003	0,003	377,61	2,01	0	0,15
Camión C7	GNV	**C7 - GNV**	0,003	0,003	430,37	2.510	0	0,19

Fuente: Tomado de Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual - SDA (2019)

De esta manera, por un lado, a partir de la matriz O-D se determinó la cantidad de vehículos de carga y sus kilómetros recorridos correspondientes a cada par O-D metropolitano para el año 2019 y con los factores de emisión por tipología calibrados para Bogotá se logró obtener la cantidad de toneladas de emisiones anuales de PM2.5, CO_2 y precursores del PM2.5 correspondientes. El principal agente contaminante que se presenta en el total de viajes metropolitanos es el CO_2 tal como se evidencia en la Figura 3-15.

Figura 3-15: Cantidad de agentes contaminantes en el total de viajes de carga metropolitanos del 2019



Fuente: Elaboración propia

Lo que se evidencia en lo anterior es que los viajes no necesariamente se corresponden con la cantidad de toneladas y esto se debe a la configuración vehicular, para efectos de simplificar el análisis se dividieron las diferentes configuraciones vehiculares entre camiones unitarios (CU) y camiones articulados (CA).

- **Congestión**

Retomando la definición de congestión como externalidad desarrollada en el capítulo 2, es importante precisar que está se expresa en términos del tiempo adicional que les toma a los vehículos de la red carretera la incorporación de un vehículo más. En ese sentido, la congestión para el caso del análisis del transporte de carga metropolitano se puede asumir desde dos enfoques, el tiempo adicional que le toma a los camiones realizar sus viajes por las condiciones de saturación de los corredores metropolitanos, y el tiempo adicional que le toma a las demás tipologías vehiculares presentes en el corredor metropolitano por cuenta de la incorporación de los camiones.

La herramienta ideal para estimar estos tiempos sería un modelo de asignación que cuente con todas las tipologías vehiculares. Particularmente, en este caso sólo se cuenta con el

ejercicio de asignación de camiones presentado en el numeral 3.2, razón por la cual los resultados de la estimación solo abarcarán el primer enfoque, es decir el tiempo adicional que le toma a los camiones realizar sus viajes metropolitanos en las condiciones de saturación actuales de los corredores.

Es así, como la evaluación de la congestión se realizó tomando las dos tipologías de camión asignadas sobre la red metropolitana, camiones unitarios (CU) y camiones articulados (CA), y sobre cada arco de la red se tomó la velocidad que indicó la herramienta GraphHopper Route Optimization (API de Google utilizada para el ejercicio de asignación) estableciendo la diferencia en tiempo de los camiones circulando a esta velocidad, respecto a una velocidad ideal de 60 km/h. De esta manera, se obtuvo como resultado que el incrementar la velocidad de toda la red permite ahorros de tiempo que oscilan entre el 25% y 50% en cada arco con respecto a la situación actual representada en el ejercicio de asignación.

Adicional, se encontró que en promedio los camiones tardan 4 días al año involucrados en la congestión de los corredores metropolitanos.

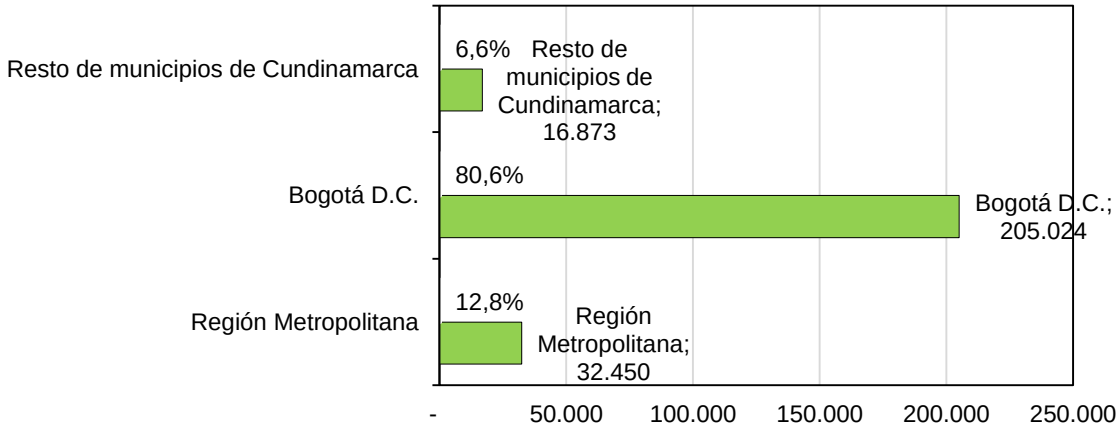
- **Productividad económica**

Para la estimación de la magnitud de la actividad económica como externalidad de la configuración territorial de la Región Metropolitana asociada igualmente al transporte de carga como externalidad, se estableció un índice de correlación de los viajes y las toneladas movilizadas según la matriz de carga metropolitana construida a partir del RNDC y el PIB de cada municipio que conforma la Región Metropolitana. En el caso del PIB de cada municipio, este se logró establecer a partir de las estadísticas del DANE en las que se encuentra el PIB total de Bogotá y el departamento de Cundinamarca, y el valor agregado por municipio a nivel porcentual[16] disponible para el año 2016. Al respecto, si bien lo ideal es contar con el PIB para el año 2019 para que corresponda temporalmente con la matriz de carga, dada la limitación de información, para efectos de aplicar la metodología planteada se procederá con esto.

[16] https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales

De acuerdo con lo anterior, a continuación, se presenta el análisis de la participación de los municipios en el PIB de la Región Metropolitana, en la Figura 3-16 se evidencia que Bogotá aporta un 80% del PIB a Cundinamarca y que los demás municipios de la Región Metropolitana suman un 13% adicional, por lo que se destaca su papel protagónico en la actividad económica del departamento.

Figura 3-16: Participación de los municipios en el PIB de la Región Metropolitana 2016



Fuente: Elaboración propia a partir de Elaboración propia a partir de DANE (2018)

De acuerdo con lo anterior en la Tabla 3-6 se realiza la precisión en el análisis del aporte al PIB de cada uno de los municipios que componente la Región Metropolitana de Bogotá. Se evidencia que los municipios que más aportan al PIB de la Región son Bogotá, Soacha, Facatativá y Tocancipá en su orden.

Tabla 3-6: Participación de los municipios en el PIB de la Región Metropolitana

Municipio	PIB (Miles de millones de pesos)	Peso relativo municipal en el valor agregado metropolitano (%)
Bogotá D.C.	205.024	86,34%
Bojacá	143	0,06%
Cajicá	1.578	0,66%
Chía	2.368	1,00%
Cota	4.246	1,79%
El Rosal	188	0,08%
Facatativá	3.483	1,47%
Funza	2.771	1,17%
Gachancipá	191	0,08%
La Calera	520	0,22%
Madrid	1.335	0,56%
Mosquera	2.121	0,89%
Sibaté	942	0,40%

Municipio	PIB (Miles de millones de pesos)	Peso relativo municipal en el valor agregado metropolitano (%)
Soacha	4.761	2,00%
Sopó	1.148	0,48%
Tabio	182	0,08%
Tenjo	1.388	0,58%
Tocancipá	3.389	1,43%
Zipacón	83	0,03%
Zipaquirá	1.613	0,68%
Total	237.474	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de Elaboración propia a partir de (DANE, 2018)

Adicional a lo anterior, se exploró si hay evidencia de una asociación o correspondencia entre el PIB como indicador de producción agregada económica de los municipios y el movimiento de carga. En la Figura 3-17 se presenta la relación del PIB con los viajes generados y atraídos de los 19 municipios que hacen parte de la Región Metropolitana, Bogotá fue excluida dado que se comporta como una variable de control.

En el análisis de este hecho estilizado, es clara la relación que existe entre el PIB y el movimiento de carga en términos de viajes generados y atraídos, llama la atención que dicha relación es siempre positiva, prácticamente todos los municipios se encuentran por encima de la línea diagonal que se trazó o cercanos a esta. Se destaca el caso del municipio de Funza y el de Soacha, los cuales presentan un comportamiento atípico con respecto a los demás municipios.

Funza debido a la heterogeneidad de productos registra un mayor número de viajes lo que evidencia que debe usar tipologías de camión pequeño; en el caso de Soacha si bien el PIB es alto, los viajes generados y traídos son bajos debido a que tiene un sector servicios que pesa bastante en la economía además se comporta como ciudad dormitorio, más allá de la actividad industrial y logística. Otro hecho que llama la atención es que la dispersión en los viajes atraídos es menor con respecto a los viajes generados, esto se puede explicar porque corresponden a lo que Bogotá produce para los municipios, por lo tanto, el comportamiento es más homogéneo. (Secretaria Distrital de Planeación, 2014)

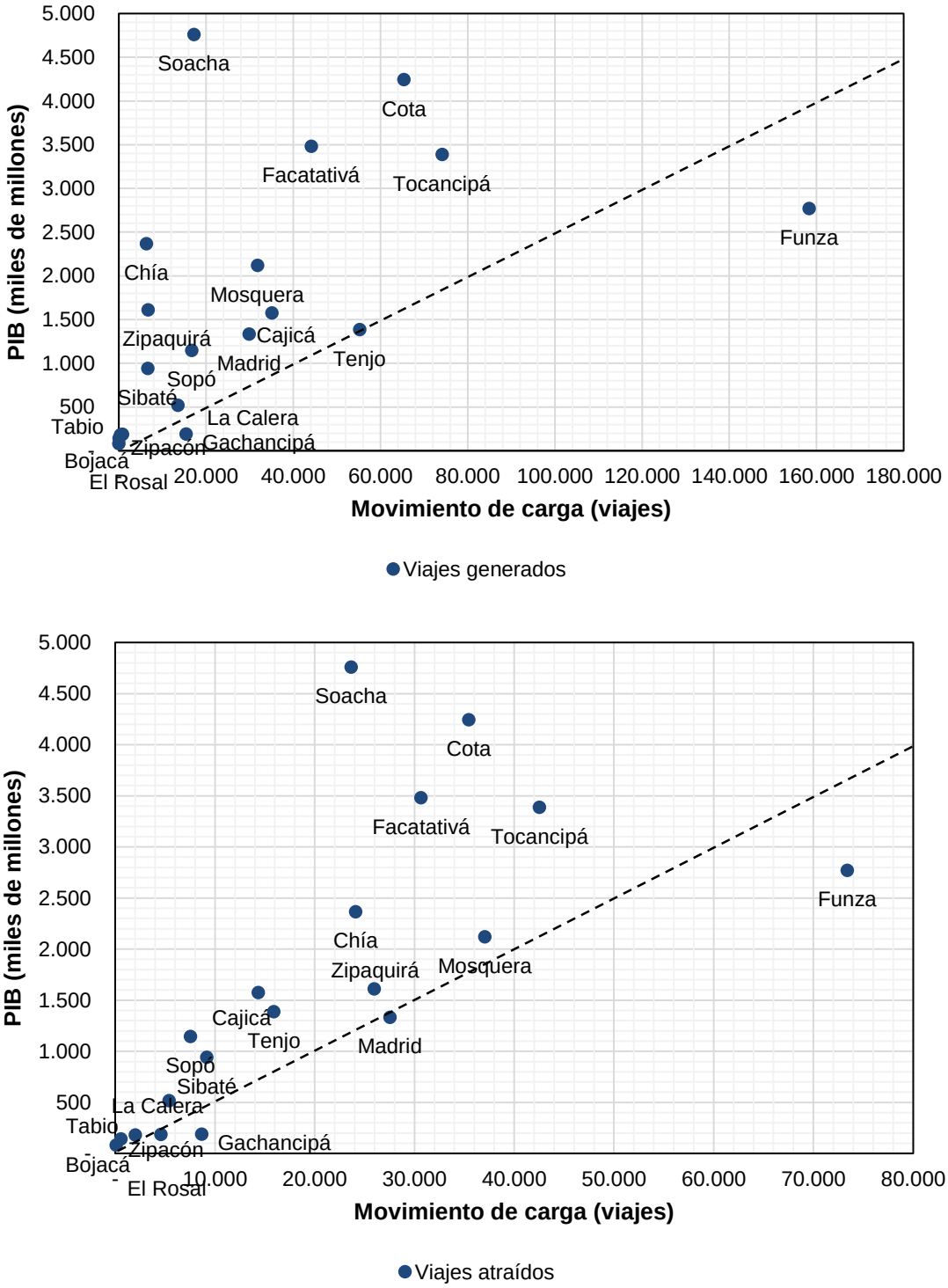
En cuanto a la relación entre el PIB y el movimiento de carga en términos de toneladas que se presenta en la Figura 3-18 se mantiene positiva con la mayoría de municipios ubicándose sobre la línea diagonal, el comportamiento de algunos municipios difiere del análisis anterior.

Se destaca el caso del municipio de Tocancipá cuyo principal producto generado corresponde a las bebidas como gaseosas y cervezas en camiones grandes, por lo que las toneladas generadas son mucho mayores a las atraídas, además este municipio se caracteriza por tener una menor diversidad de industrias, en contraste con un municipio como Funza con una heterogeneidad industrial mucho más alta, el caso de la Calera también se destaca ya que si bien en términos de viajes no se percibe una magnitud alta, en términos de toneladas generadas hay una mayor magnitud asociada a la producción de cemento que se da allí.

A partir de lo anterior, un hecho contundente es que a mayor PIB casi, como una generalidad, se presenta un mayor movimiento de carga en términos de viajes y toneladas, esta relación no es lineal dado que tiene una dispersión que se presenta en función de la heterogeneidad de la economía y la concentración de la industria en el municipio o la vocación como dormitorio.

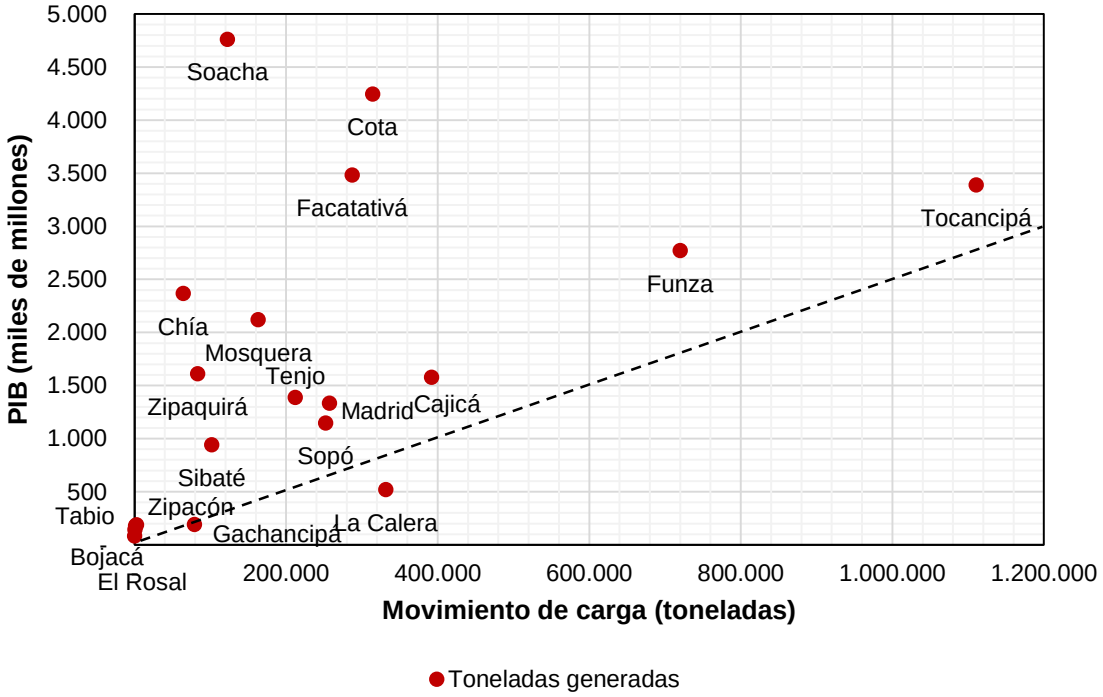
Es importante aclarar que el análisis no incluyó relaciones de causalidad, es decir, que el mayor movimiento de carga tiene como consecuencia un mayor PIB, o incluso, al contrario, sino que se buscó revisar si había concordancia entre los dos fenómenos (variables), ya que las limitaciones de información no permiten evaluar otro tipo de relaciones.

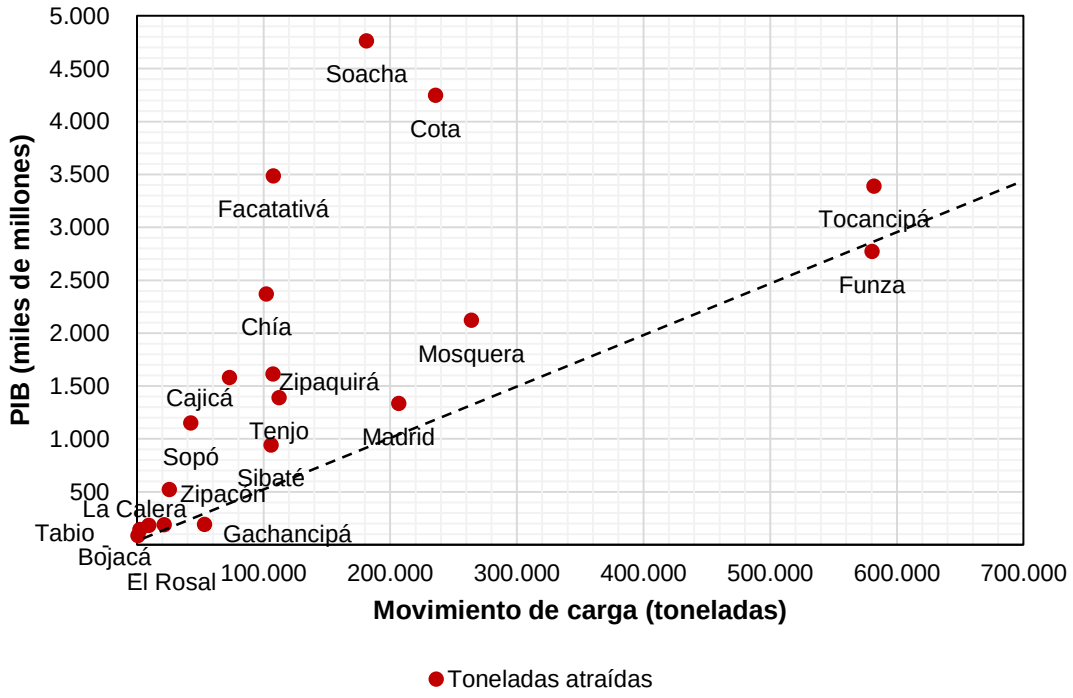
Figura 3-17: Relación entre el PIB como indicador de actividad económica y viajes como indicador de movimiento de carga



Fuente: Elaboración propia a partir de Elaboración propia a partir de (DANE, 2018)

Figura 3-18: Relación entre el PIB como indicador de actividad económica y toneladas como indicador de movimiento de carga





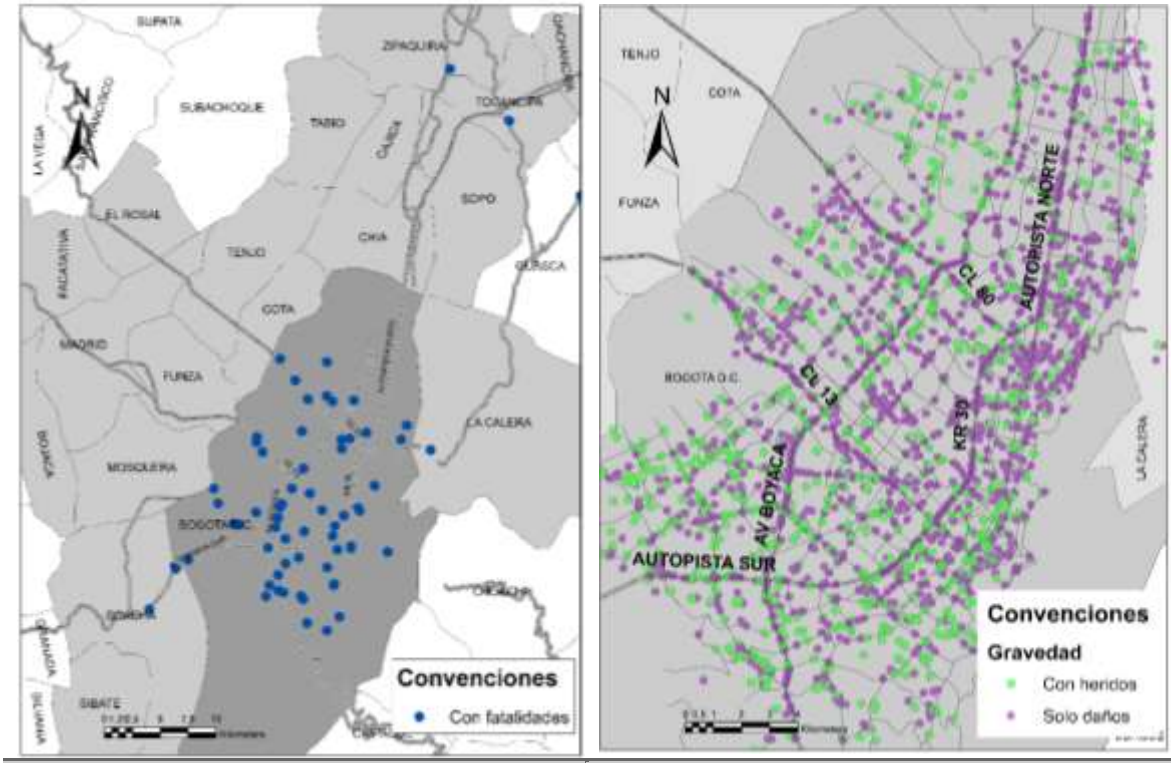
Fuente: Elaboración propia a partir de Elaboración propia a partir de (DANE, 2018)

3.3.2 Representación espacial de la magnitud de las externalidades

Si bien se obtuvo la estimación de la magnitud de las externalidades en los anteriores cálculos, estás magnitudes se deben espacializar de manera que se logre evidenciar su magnitud aterrizada en el territorio. Es así como a continuación se presentan los resultados obtenidos para cada externalidad.

En primer lugar, la siniestralidad como externalidad resulto ser poco significativa en el análisis realizado, a través del siguiente mapa se verifica espacialmente como se expresa dicha externalidad en el territorio. Se evidencia en la Figura 3-19 cómo los siniestros se concentran en los principales corredores metropolitanos y en los corredores urbanos de Bogotá.

Figura 3-19: Expresión territorial de la siniestralidad vial como externalidad negativa del transporte de carga para el año 2019

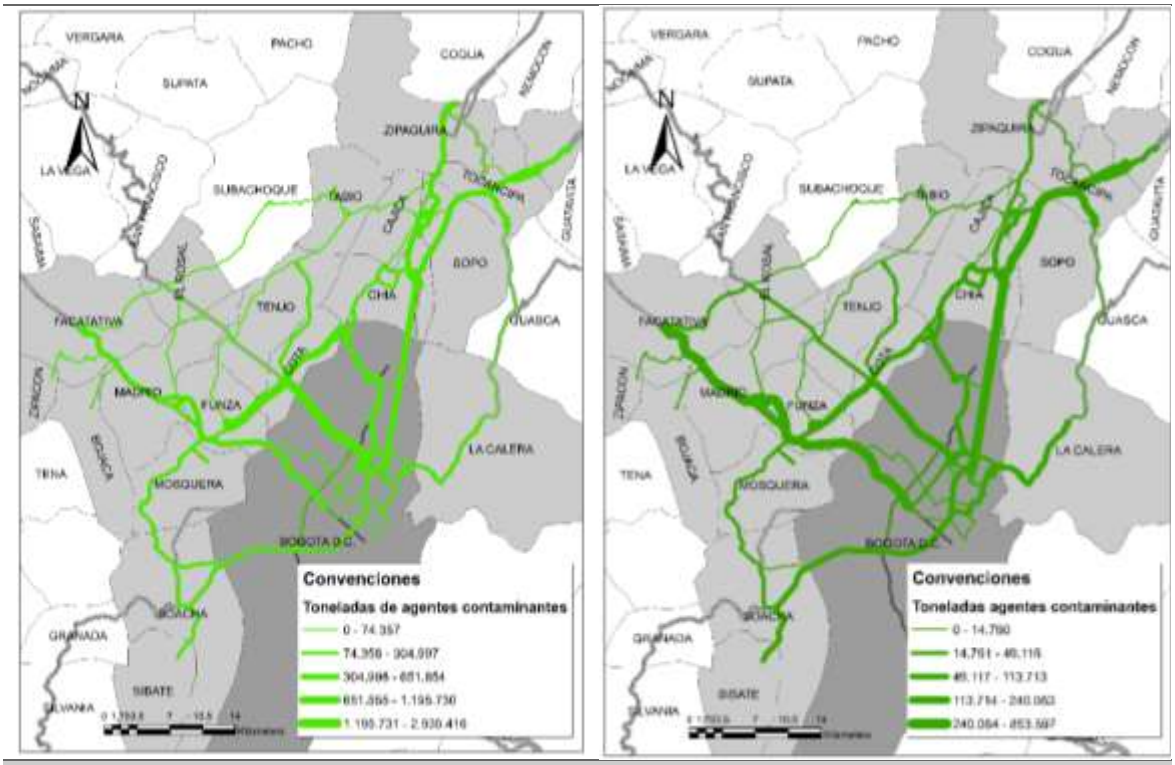


Siniestros con fatalidades en la Región Metropolitana	Siniestros con heridos y daños en Bogotá

Fuente: Elaboración propia a partir de consolidado de siniestros viales de la Secretaria Distrital de Movilidad Bogotá y la base de datos de victimas de siniestros viales anonimizada para el departamento de Cundinamarca de la Agencia Nacional de Seguridad Vial.

En segundo lugar se presenta en la Figura 3-20 la expresión de la externalidad del impacto ambiental por emisiones contaminantes. En la que a partir de la asignación del flujo de camiones que se realizó sobre cada arco se logró establecer la magnitud de las emisiones, lo que permitió evidenciar que la contaminación se concentra sobre los corredores de la Calle 13, Calle 80 y Autopista Norte en su respectivo orden.

Figura 3-20: Expresión territorial del impacto ambiental por contaminación atmosférica como externalidad negativa del transporte de carga para el año 2019

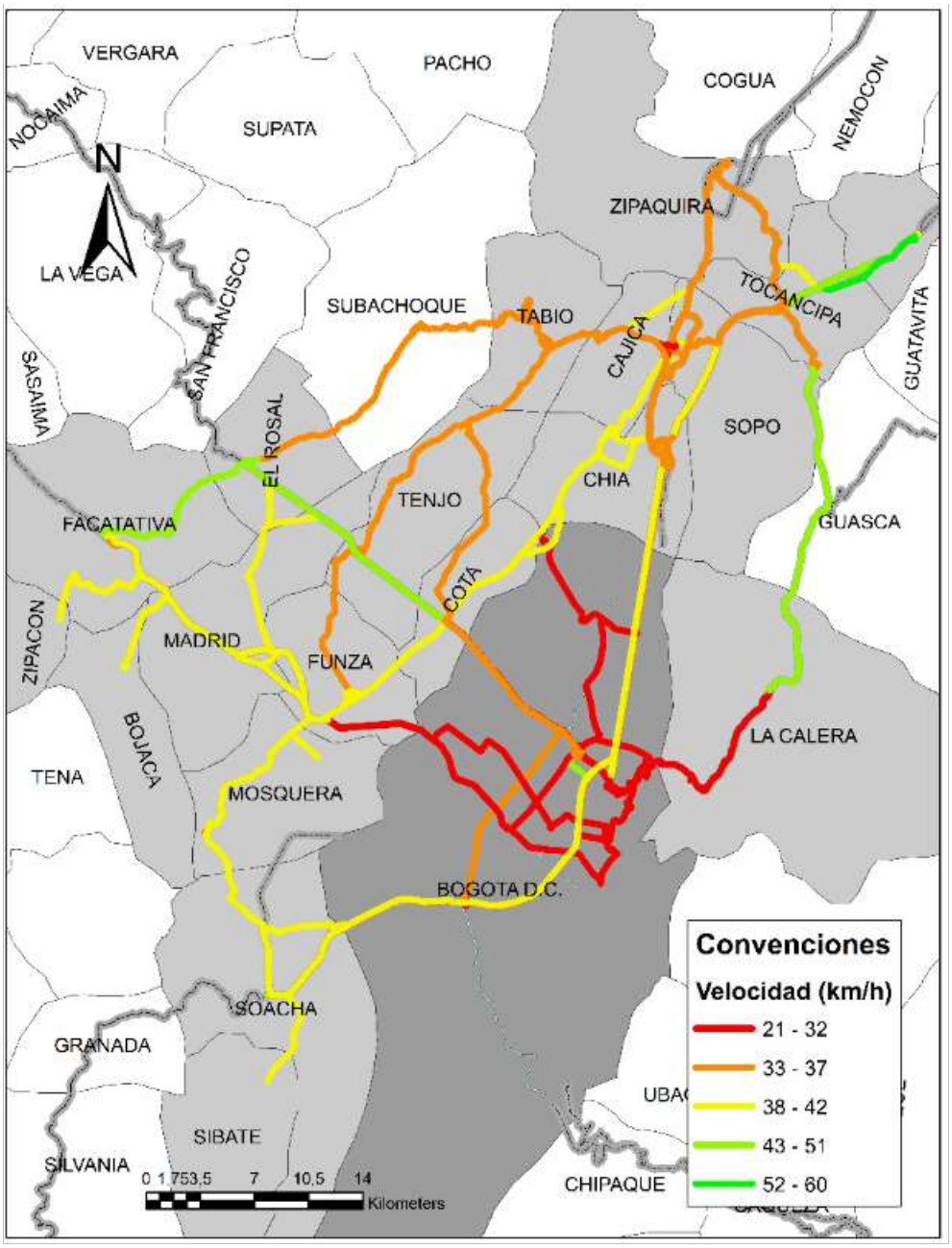


Camiones unitarios **Camiones articulados**

Fuente: Elaboración propia a partir de información del RNDC e inventario de emisiones de la Secretaria de Ambiente

Así mismo se logró evidenciar la congestión como externalidad, la cual se expresa en el territorio en términos de las velocidades que se observan en la red tal y cómo se presenta en la Figura 3-21.

Figura 3-21: Expresión territorial de la congestión como externalidad negativa del transporte de carga para el año 2019

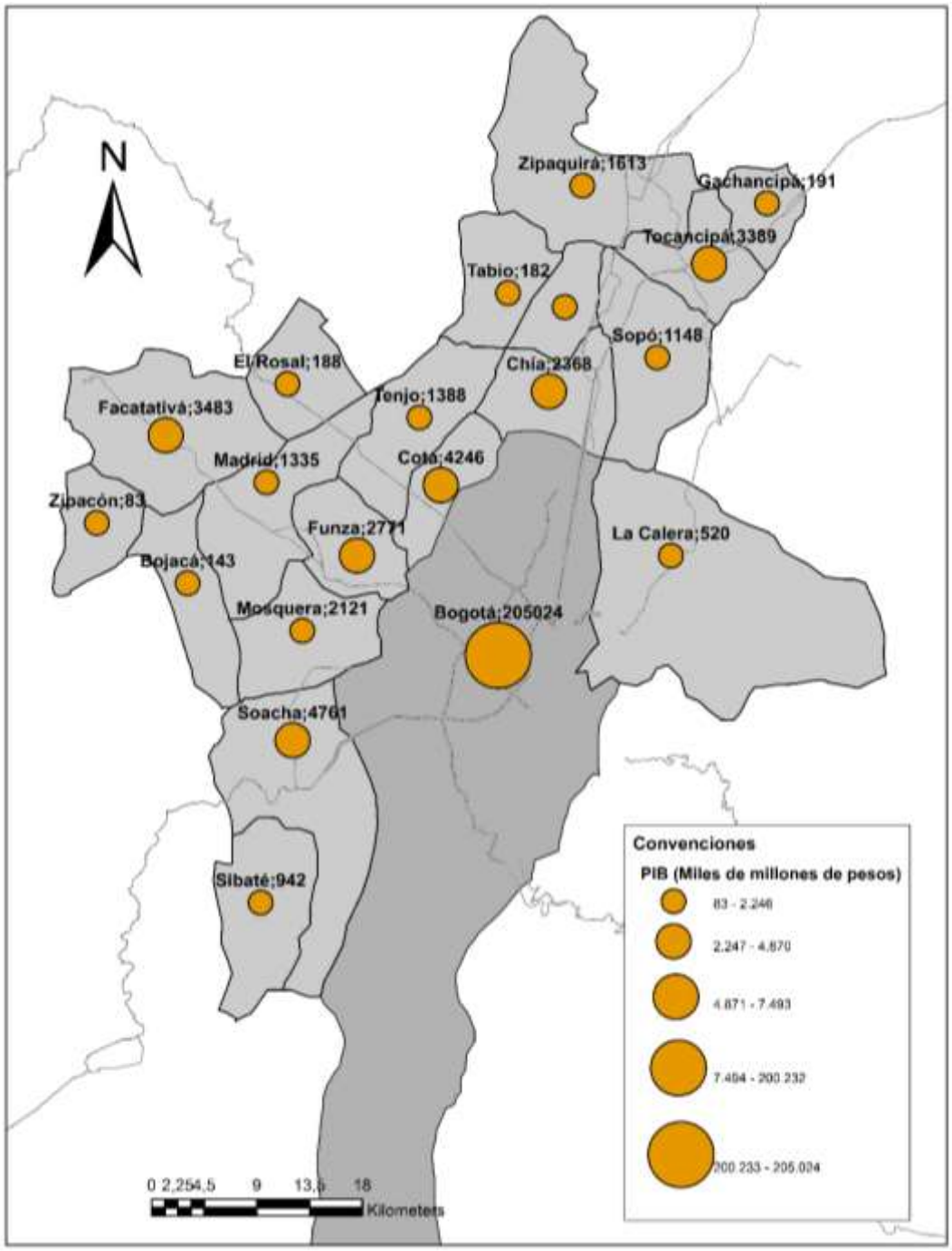


Fuente: Elaboración propia

Se logró estimar la actividad económica de la Región Metropolitana de Bogotá como externalidad de la configuración del territorio, en términos del PIB generado por cada uno de los municipios y estableciendo una relación con el movimiento de carga en el año 2019. En la Figura 3-22 se evidencia que los municipios con un PIB más alto corresponden con

los municipios que mayor movimiento de carga generan y atraen en la región como es el caso de Bogotá, Tocancipá, Facatativá y Soacha.

Figura 3-22: Expresión territorial de la productividad económica como externalidad positiva del transporte de carga para el año 2019



Fuente: Elaboración propia a partir de DANE (2018)

3.3.3 Valoración de las externalidades

A continuación se presenta la valoración de la magnitud de las externalidades que se estimaron en el numeral 3.3.1. Dicha valoración se abordó tomando diferentes referentes tal y como se presenta a continuación.

En primer lugar, se valoró la siniestralidad vial de acuerdo con las cifras del valor estadístico de los siniestros de tránsito tomando como referente dos fuentes la primera el SIGAT de Bogotá y la segunda para comprobar ordenes de magnitud, el estudio de costo de incidentes viales de Medellín desarrollado en el 2015 por la Universidad de Antioquia (Cabrera & Arango, 2015), cuyos resultados se presentan en la Tabla 3-7. Para el caso de Bogotá se encontró el estudio de (Márquez D. & Avella A., 2012) en el que se indica que el Valor Estadístico de la Vida (VEV) es de 128 millones de pesos que en palabras del mismo autor corresponde a un valor inferior a lo esperado, por lo que se optó por tomar los valores del SIGAT y traerlos a valor presente del 2019.

Tabla 3-7: Valores promedio por siniestro al año 2019

Gravedad del siniestro	Valor Asociado (COP Millones) Bogotá	Valor Asociado (COP Millones) Medellín
Solo daños	8,3	--
Con heridos	22,6	18,4
Con fatalidades	679,20	858,70

Fuente: Tomado de SIGAT-SDM (2018)

Como segundo elemento se abordó la valoración del impacto ambiental por contaminación atmosférica que se expresa en su aproximación al efecto en la sociedad como ahorros en gasto en salud, representada por costos de tratamientos, pérdida de productividad y perdida de bienestar. Estos valores pueden obtenerse empleando los siguientes indicadores (que se traducirán en pesos de 2019), reportados por la CEPAL en 2003, los cuales se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8: Valor de los efectos en la salud por variación de la emisión de una tonelada de contaminante (en miles de dólares por tonelada abatida) - estudio realizado en el 2003

VALOR DE LOS EFECTOS EN LA SALUD POR VARIACIÓN DE LA EMISIÓN DE UNA TONELADA DE CONTAMINANTE
(En miles de dólares por tonelada abatida)

Contaminante primario	Costo de tratamiento	Productividad perdida	Pérdida de bienestar	Total
Polvo resuspendido	0.013	0.14	0.54	0.69
Material particulado	1.063	11.64	43.2	55.9
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	0.055	0.60	2.2	2.9
Anhídrido sulfuroso (SO_2)	0.279	3.05	11.3	14.7
Amoníaco (NH_3)	0.077	0.85	3.2	4.1

Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), *Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana*, Santiago de Chile, agosto de 2001; y L. Cifuentes, "Estimación de los beneficios sociales de la reducción de emisiones y concentraciones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana", *Generación de instrumentos de gestión ambiental para la actualización del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago al año 2000*, documento preparado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Santiago de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2000.

Fuente: Tomado de Bull (2003)

Por otro lado, para emisiones de carbono, se tiene un referente de precio promedio en el mercado internacional de emisiones de carbono para el año 2019 de 23,42 Euros/Ton[17] (83.076 $COP/Ton)[18]. Al respecto es importante mencionar que con la reforma acordada a final de 2017 por la Unión Europea (que busca reducir a partir de 2019 los derechos de emisión de CO_2 que hay en este mercado para que el precio suba y coadyuvar en el cambio del modelo energético en Europa para expulsar las formas más contaminantes[19] , política que sin duda internaliza costos externos por contaminación en los costos de productor y del usuario final[20]) ha provocado que el precio de la tonelada de CO_2 equivalente desde

[17] https://www.sendeco2.com/es/precios-co2, https://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data. Consultadas en mayo de 2019.
[18] Tasa de cambio $COP 3.547/EURO. Cálculos propios a partir de TRM proyectada por Bancolombia para 2019(https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/investigaciones-economicas/publicaciones/tablas-macroeconomicos-proyectados – actualizado abril/2019), y una relación Euro/Dólar de 1,119 (http://www.banrep.gov.co/es/monedas-reserva).
[19] https://www.eltiempo.com/economia/sectores/union-europea-sube-el-precio-a-la-emision-de-co2-263754. //
[20] Ídem. Opinión de Xavier Labandeira, catedrático de Economía en la Universidad de Vigo y especialista en fiscalidad ambiental.

diciembre de 2017 a promedio 2019 (enero-mayo) se haya triplicado, y se espera se mantenga esta presión sobre los precios[21].

Si bien el precio de emisiones de carbono tiene que ver directamente con un precio de mercado y no con un precio que refleje el costo ambiental como perjuicio para la sociedad, la estimación de dicho costo es compleja, y se encuentra válido emplear un valor de mercado que representa un costo por contaminar. En la Tabla 3-9 se resumen los indicadores de costo de emisiones a emplear traídos a valor presente 2019:

Tabla 3-9: Indicadores de Emisión de agentes contaminantes y valor de los efectos en la salud por variación de la emisión de una tonelada de contaminante

Agente Contaminante	COP/Ton
CO2	83.076
NOX	15.650
SOX	78.365
VOC	20.895
PM 2.5	160.650
PM10	287.350

Fuente: Elaboración propia a partir de Información base antes referenciada

Para la valoración de los tiempos adicionales que tienen requieren los viajes de camiones en los corredores metropolitanos se tomaron como referencia los Valores del Tiempo – VOT resultado de un ejercicio de aplicación de encuestas de preferencia declarada y la construcción de un modelo de elección discreta realizado por Cal y Mayor en el 2018 para el proyecto de APP Autopista Norte, los VOT de referencia y los parámetros de la función de utilidad estimados para camiones unitarios (CU) y camiones articulados (CA) para un día hábil se presentan en la Tabla 3-10. Estos valores se asignarán a los tiempos adicionales que registra la red frente a una velocidad ideal como mencionó anteriormente, de manera, que se obtendrá un costo total aproximado de la congestión.

[21] https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/9058686/04/18/El-precio-de-la-tonelada-de-CO2-en-la-UE-ha-subido-un-60-desde-enero-.html. https://elperiodicodelaenergia.com/el-precio-del-co2-imparable-marca-un-nuevo-record-por-encima-de-27-e-por-tonelada-el-doble-que-hace-un-ano/

Tabla 3-10: VOT de referencia

Vehículo	Escenario/Proyecto	β Tiempo en vehículo (1/min)	β Costo (1/$)	VOT ($/min)
CU	Autopista Urbana Norte, Bogotá	-0,07874	-0,00024	337
CA	Autopista Urbana Norte, Bogotá	-0,08736	-0,00022	417

Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados de Estudios APP Autopista Norte. Cal y Mayor, 2018

Acerca de la producción económica, esta se presenta como la suma del PIB de cada uno de los municipios que hacen parte de la Región Metropolitana, ya que cómo se presentó antes, existe una correlación entre el movimiento de carga y el PIB de los municipios.

Es así como en la Tabla 3-11 se presentan los resultados de las externalidades del transporte de carga metropolitano para el Caso de la Región Metropolitana de Bogotá, para el año 2019. Se puede observar que la valoración de las mismas equivale al 4% del PIB de la región, donde se destaca el costo de la contaminación por emisiones atmosféricas, seguido de los costos de la siniestralidad. Para entender la cifra y contextualizarla, a partir de los datos reportados por la Cámara de Comercio de Bogotá (2018), la cifra obtenida es equivalente a la participación en el PIB de Bogotá de sectores como el de la construcción o de la información y comunicaciones.

Con las limitaciones expuestas, se logró una estimación y este resultado del 4% del PIB en externalidades negativas del transporte de carga metropolitano es una primera aproximación, que denota el vacío que existe en la valoración de las externalidades, quizás existen otros flujos de movilidad y transporte que estén contribuyendo con mayores externalidades, lo que permite evidenciar que puede ser una política regresiva aplicar restricciones solo al transporte de carga cuando de mitigar externalidades se trata, a falta de una herramienta adecuada para tomar este tipo de decisiones.

Tabla 3-11: Resultados de la estimación de externalidades del transporte de carga metropolitano 2019

Externalidad	Descripción	Factores determinantes	Unidad de medida	Magnitud	Costo (miles de millones pesos colombianos)	Costo (%PIB)
Siniestralidad	Costos médicos, daños materiales, costos administrativos, pérdidas de producción y sufrimiento derivados de los siniestros que no están cubiertos por los seguros.	* Gravedad y cantidad de siniestros	Siniestros por gravedad (fatalidades, heridos y sólo daños) / año	4.893	$ 110	0,046%
Contaminación atmosférica por emisiones	Daños a la salud, los ecosistemas, las infraestructuras y las actividades económicas derivados de la emisión de contaminantes (NOx, SOx, CO2, VOC, PM2.5, PM10).	* Tipo de vehículo * Tipo de combustible * Longitud de desplazamiento * Volumen vehicular	Toneladas / año	119.503.575	$ 9.404	3,960%
Congestión	Pérdidas de tiempo y costos operativos que impone la entrada de un vehículo adicional a todos los usuarios de la red.	* Velocidad de circulación * Número de vehículos en la red	Horas / año	206.990	$4	0,002%
Producción económica	Producción de los municipios de la región en un año	* Relación entre PIB y movimiento de carga	PIB miles de millones de pesos colombianos/ año	237.4734	$237.474	

Fuente: Elaboración propia

3.4 Limitaciones y recomendaciones para la aplicación de la metodología

En el marco de la aplicación del modelo conceptual y metodológico propuesto en el capítulo 2 y con la aplicación para el caso de la Región Metropolitana de Bogotá desarrollado en este capítulo, se obtuvo una aproximación a la estimación y valoración de las externalidades del transporte de carga metropolitano. Sin embargo, dadas las limitaciones en algunos de los insumos, la dificultad principal en la medición de externalidades se centró en lograr aislar la magnitud de la externalidad asociada directamente a los vehículos de transporte de carga, y en cómo finalmente se escoge la técnica o método adecuado de valoración de la externalidad. Es así como a continuación se presentan las dificultades y limitaciones del ejercicio realizado y las sugerencias en cuanto a los insumos que se pueden usar para lograr una medición y valoración más cercana a la realidad.

- **Movimiento de carga y viajes asociados:** En primer lugar, si bien el RNDC es una fuente oficial en la que se encuentran los viajes, esta matriz esta subdimensionada al no registrar los viajes que no cuentan con manifiesto de carga. Sin embargo, con los datos utilizados se logró cuantificar las externalidades asociadas a transporte “formal”. Bajo la misma metodología este ejercicio se puede replicar haciendo uso de un modelo de transporte con el que cuentan las regiones metropolitanas del país. Bogotá en particular cuenta con el modelo de transporte de carga metropolitano del 2015, el cuál puede ser una base para su actualización y calibración.

- **Siniestralidad vial:** En esta medición se tuvieron dos limitaciones, en primer lugar, la información de los siniestros de Cundinamarca no es pública, razón por la cual se debe realizar un trámite con la Agencia Nacional de Seguridad Vial y con el Registro Nacional de Accidentes de Tránsito - RUNT, de manera que solo se obtuvo el registro de siniestros con fatalidades georreferenciado. En el caso de Bogotá la información de siniestralidad vial es pública, razón por la cual se contó con el detalle de los siniestros según su gravedad. La recomendación a la hora de replicar esta medición es realizarla haciendo uso de una base de datos con los siniestros totales, de manera que la valoración de la externalidad sea completa. En el caso de la

Región Metropolitana de Bogotá, la magnitud de la externalidad de la siniestralidad en valor absoluto no presentó resultados significativos, sin embargo, cuando se estimó como una tasa que compara el total de los siniestros según vehículos involucrados vs. la magnitud de los flujos para cada tipología vehícular se obtuvo una alta relación en algunos corredores metropolitanos, de ahí la importancia de estudiar en más detalle el fenómeno, este puede no ser el caso de otras regiones metropolitanas.

- **Contaminación:** Las estimaciones de la contaminación como externalidad se lograron realizar de manera precisa llegando al detalle de incluir la tipología de vehículos por cada par O-D de viajes entre municipios, en posteriores estimaciones se puede incluir en caso de contar con la información, la edad del parque automotor.

- **Congestión:** Con un modelo de transporte contando con VOT a través de encuestas de preferencia declarada se puede correr un modelo con y sin vehículos de carga de manera que se logren cuantificar las diferencias de tiempos. Además, se puede establecer una correlación entre las velocidades de la red por arco y el flujo de camiones por arco versus flujos de otras tipologías. Una estimación más precisa del valor de la congestión adicional a lo estimado en el anterior ejercicio debe incluir los costos extra de gastos de combustible y los tiempos adicionales que implica la circulación de camiones sobre otras tipologías vehiculares en la red.

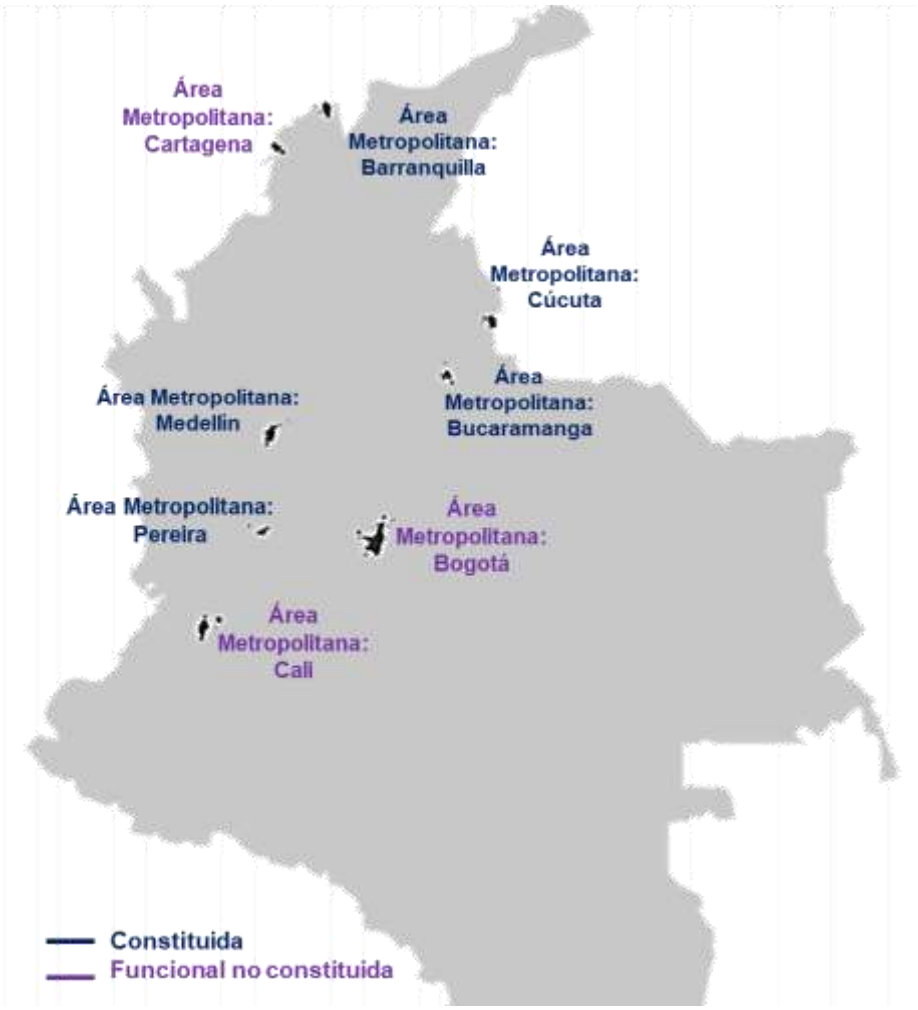
- **Producción económica:** Esta externalidad se estimó a partir del planteamiento de la relación entre el PIB de cada municipio y los viajes o toneladas generados o atraídos, la única limitación de la aplicación de este indicador radicó en la diferencia temporal de los datos utilizados, en caso de replicar el ejercicio se espera contar con el valor agregado del PIB actualizado a 2019.

Un aspecto importante resultado de las estimaciones de las externalidades es lograr entender cómo se relacionan entre sí y la correlación de las variables que las representan, por ejemplo, en el caso de la siniestralidad vial podría llegar a encontrarse una relación con la congestión que ya es clara en la teoría en términos de la variación de los siniestros viales en función de la velocidad, así como también variación de la contaminación en función de la velocidad. De acuerdo con esto, en un modelo más complejo sería interesante

lograr hacer comparables y establecer relaciones entre las estimaciones de las externalidades de los diferentes modos que circulan en la Región Metropolitana con el fin de fortalecer la herramienta para la dirección de políticas y proyectos enfocados en cada modo, al lograr identificar quién y bajo qué condiciones se producen las externalidades.

En Colombia en la actualidad se está pasando por un proceso de conformación de áreas o regiones metropolitanas, en la Figura 3-23 se presentan las principales, en las cuales toma relevancia el estudio del fenómeno del transporte de carga metropolitano y las externalidades asociadas al mismo, lo que constituye una oportunidad de replicar el ejercicio realizado en la presente investigación.

Figura 3-23: Áreas o regiones metropolitanas de Colombia



Fuente: Adaptado de (Ruiz, 2015)

4. Reflexiones y retos de la internalización de las externalidades

A partir de los resultados presentados en los anteriores capítulos a continuación se busca **proponer en el marco del modelo, pautas y recomendaciones para desarrollar mecanismos de internalización para los costos asociados a las externalidades, en términos de costos del productor, costos del usuario y costos sociales.**

Para internalizar las externalidades de manera general pueden considerarse diversas alternativas, como lo son: cambios en procesos, normas, impuestos, subsidios, así como cambios en hábitos y costumbres (Tinoco–López & Jaime P., 2006). De acuerdo con lo anterior este capítulo inicia con una disertación sobre quién debe pagar las externalidades, luego hace referencia a la toma de decisiones como región metropolitana a partir del concepto de transferencia de externalidades entre jurisdicciones territoriales y finalmente se abordan los elementos para la optimización de la logística metropolitana, los cuales se pueden evaluar o proponer a partir de los resultados de la aplicación del modelo.

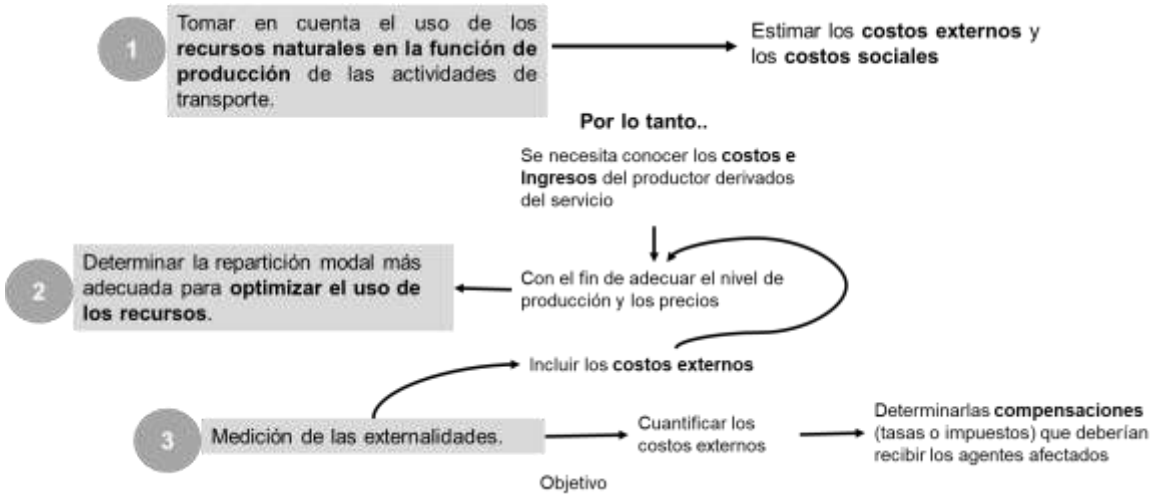
4.1 El debate de quién debe pagar las externalidades

Las externalidades (positivas o negativas) deben cargarse a aquellos responsables de las alteraciones ambientales y, en su caso, también a la población que disfruta de los beneficios de las acciones que las causa. (Tinoco–López & Jaime P., 2006) De manera que las consideren en los costos del proyecto desde su planeación. Así, si las externalidades son negativas (es decir, costos), en el proyecto se consideran los gastos para evitar, disminuir o mitigar los daños causados. Asimismo, en aquellos casos donde las externalidades resultan en efectos benéficos, esta aportación también debe ser considerada, además de tomarse en cuenta en las evaluaciones correspondientes. El

análisis de externalidades debe hacerse a fondo, para identificar claramente en qué etapas del proceso se presentan para proponer las acciones conducentes y asignar de manera equitativa las responsabilidades por las mismas. (Díaz, Alexander, & Sanhueza, 2003)

El debate de quién debe pagar por las externalidades se articula con los planteamientos de De Rus et al. (2003) sobre la importancia de considerar los efectos externos generados por el transporte, la sintesis del planteamiento se presenta en la Figura 4-1, en la que se recalca la importacia de llegar a la medición de la magnitud de las externalidades a partir de contemplar el uso de recusos naturales dentro de la función de producción del transporte que se presentó en la Ecuación (1.2).

Figura 4-1: ¿Por qué es importante analizar los efectos externos generados por el transporte?



Fuente: Elaboración propia a partir de (2003)

En la actualidad, en el caso de las regiones o áreas metropolitanas existe consenso alrededor del tema, son vehículos de carga los que generan impactos considerables en la movilidad y en la emisión de contaminantes en el aire, para estos últimos impactos Econometría y Consultores (2018) planteó para el caso del AMVA tasas retributivas y se han planteado otros documentos en los que se recomienda implementar medidas que regulen en el centro de la ciudad los horarios de cargues y descargue, llevándolos a periodos del día con una menor demanda de la malla vial como son las horas de la noche.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el caso específico de la Región Metropolitana de Bogotá en el numeral 3.3, se evidenció que la principal externalidad del transporte de carga en términos de costos y la que tiene una expresión más fuerte en el ámbito metropolitano es la contaminación por emisiones. Esto contrasta con los hechos que se presentaron a inicios de 2020 en Colombia, en los que las áreas metropolitanas del Valle de Aburrá y Bucaramanga, así como Bogotá declararon emergencias ambientales, para las cuales una de las medidas que se aplicaron fueron las restricciones al transporte de carga, así mismo la literatura se centra en los cobros que se debe realizar por este tipo de externalidad.

Estos cobros a manera de impuestos por contaminar, se pueden abordar desde dos perspectivas, por un lado permiten minimizar los costos totales de alcanzar un determinado objetivo ambiental al incentivar la adopción de las alternativas más baratas de descontaminación (Fullerton, 2001). Y por otro lado, los impuestos suponen un incentivo continuo a la reducción del deterioro ambiental porque promueven inversiones en procesos productivos y tecnologías limpias que permitan reducir los pagos impositivos futuros de los contaminadores (Requate, 2005)

Gago, Labandeira, Labeaga, & López-Otero (2020) precisa en su estudio un análisis que se articula sin duda con los inputs que maneja el modelo conceptual y metodológico propuesto en la presente investigación abordando como ejemplo que el impuesto sobre hidrocarburos en España, al igual que en la mayoría de los países, grava con un tipo impositivo más elevado la gasolina que el diésel. Si bien las emisiones de CO_2 por kilómetro de los vehículos de gasolina son, en general, mayores que los de los vehículos diésel, los impuestos sobre los carburantes no gravan la distancia recorrida sino el consumo de carburantes, y es la gasolina la que genera menores emisiones por litro (tanto de GEI como de contaminantes locales).

Además de lo anterior, el transporte de carga carretero metropolitano genera otras importantes externalidades, como la congestión, el ruido, los siniestros o los costos de la infraestructura que, en general, están más vinculadas a la distancia recorrida que al consumo de carburantes. En este contexto, es probable que el costo social de dichas externalidades por litro de carburante sea mayor para el diésel, ya que los vehículos que utilizan este carburante normalmente son más eficientes y cada litro de carburante permite recorrer una mayor distancia.

En cualquier caso, para abordar los elevados costos de las externalidades del transporte de carga metropolitanos como los estimados para el Caso de la Región Metropolitana de Bogotá son necesarias medidas sustancialmente más intensas. De hecho, los impuestos que gravan el transporte carretero en la Unión Europea cubren menos del 60% de los costos externos genera dos por éste (menos del 45% si se incluyen los costos de la infraestructura). (Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H., Boon, B., Smokers, R., Schroten, A., 2008)

Por otra parte, ya se ha indicado que el transporte por carretera genera una serie de externalidades que los impuestos tradicionales no son capaces de abordar. El análisis planteado por Gago et al. (2020) evidencia la ausencia de relación directa entre el consumo de carburantes (principal elemento de la actual fiscalidad sobre el transporte rodado, y las externalidades, sino que éstas dependen de otros factores, principalmente el momento de circulación del vehículo y su localización. Y precisamente estos son los factores que se condicionan como input del modelo planteado, kilómetros recorridos, nivel de exposición, tipología de vehículo, edad del parque automotor, entre otros.

En este contexto tal y como lo plantean Gago et al. (2020) sería aconsejable realizar una profunda transformación de la fiscalidad del transporte por carretera, que garantice una recaudación elevada y estable y, al mismo tiempo, aborde el problema de las externalidades. Para lograrlo, una opción propicia sería la introducción de impuestos sobre el uso real del vehículo aprovechando las tecnologías de geolocalización existentes para distinguir entre tipos de vehículo, hora del uso y localización.

Estos impuestos permitirían abordar simultáneamente las externalidades enunciadas, es decir, la contaminación global (tipos variables en función del tipo de vehículo), la contaminación local y el ruido (tipos variables en función del tipo de vehículo, el momento del día y la localización), la congestión (tipos variables por momento del día y la localización) y los siniestros y los costos de la infraestructura (tipos variables en función del tipo de vehículo y la localización).

Además, evitarían la caída del recaudo como consecuencia de las mejoras en la eficiencia de los vehículos y conllevarían una serie de beneficios adicionales, incluyendo nuevos servicios de valor añadido (pago automático de estacionamientos y peajes, seguros en función del uso del vehículo, asistencia en ruta en tiempo real), incremento de la seguridad

(suministro de alertas sobre situaciones peligrosas en las carreteras), así como la generación de una base de datos anónimos sobre desplazamientos que se podría emplear para la mejora de la planificación y operatividad del transporte. Este nuevo impuesto gravaría el uso del vehículo según el momento del día, la localización y, sobre todo, el tipo de vehículo (antigüedad y características tecnológicas).

De este modo, el gravamen de la distancia recorrida permitiría abordar los costos de los siniestros, la contaminación global y el deterioro de la infraestructura, mientras el tipo impositivo horario en función de la localización cubriría los costos de la congestión, ruido y contaminación local. Finalmente, el impuesto también podría incorporar un peaje de acceso a determinadas infraestructuras o zonas, relacionado con los costos de congestión y desgaste de la infraestructura.

4.2 La articulación metropolitana en la toma de decisiones de política sectorial de transporte y movilidad

En las regiones metropolitanas, dada su naturaleza, existen ventajas propias de las configuraciones territoriales de la actividad económica expresadas en distintas formas de economías de escala, que puede hacer que la producción agregada económica se entienda como una expresión de externalidades positivas. Sin embargo, estas ventajas para las empresas del sector industrial y logístico se presentan a costa de las externalidades negativas del transporte sobre la movilidad cotidiana y la sociedad expresadas por ejemplo en términos de siniestralidad, congestión y contaminación, ya que si bien las externalidades positivas son más altas que las negativas en términos de magnitud y costo, estas últimas tienen una expresión más fuerte en el territorio, sumando el hecho de que en la actualidad no se internalizan de ninguna manera, y estos costos son finalmente asumidos por la sociedad y los recursos de los municipios que conforman las regiones metropolitanas.

Ruiz (2015) plantea que con la inclusión de las externalidades inter jurisdiccionales al modelo básico para entender la metropolización se obtiene un resultado contrario al efecto del mayor tamaño del grupo pues la presencia de efectos externos no controlados hacia otras jurisdicciones, cuyos individuos pueden obtener beneficios sin pagar por ellos o ser

perjudicados sin recibir compensación. Es decir, la dificultad por internalizar estos efectos externos con el fin de ajustar el tamaño óptimo de la jurisdicción conduce a la formación de un mayor tamaño de grupo poblacional con algunas limitaciones de eficiencia en la provisión, provenientes por ejemplo del financiamiento del determinado bien público.

La razón es que los impuestos aplicados a bases movibles no logran medir los efectos externos y externalidades fiscales horizontales que de dicha base puedan derivarse, y que pueden permitir la presencia de ineficiencias en el recaudo y asignación de recursos entre jurisdicciones. La generación y presencia de externalidades favorecen mejor la opción institucional de un manejo más centralizado o integrado para algunos servicios respecto a lo que podría esperarse de un nivel local de gobierno, pero que responden a dinámicas más regionales que nacionales.

Así la formación óptima de jurisdicciones desde la provisión eficiente de bienes públicos dependerá entonces de la manera como se aprovechen las economías de escala y se internalicen las externalidades que caracterizan las estructuras espaciales (usualmente policéntricas e interrelacionadas) de la geografía económica de una región metropolitana, mediante la delimitación de las áreas territoriales para la toma de decisiones gubernamentales. (Ruiz, 2015)

En lo referente a la toma de decisiones en la actualidad quizás la mayor preocupación de los tomadores de decisiones en regiones metropolitanas se da por la creciente preocupación ante temas de índole ambiental, precisamente entre febrero y marzo del 2019 en las regiones o áreas metropolitanas de Bogotá, Cali, Valle de Aburra y Bucaramanga se presentaron emergencias ambientales que tuvieron consecuencias directas en la restricción del ingreso de vehículos de carga a las Ciudades Núcleo, lo que tuvo repercusiones en temas de distribución de mercancías generando preocupación entre los generadores de carga y los prestadores de servicios de transporte y logística. Adicional a lo anterior esto tuvo consecuencias en los municipios aledaños a las Ciudades Núcleo dado que se genera acumulación de vehículos esperando al levantamiento de las restricciones, lo que genera igualmente externalidades, esto precisamente es lo que se denomina la trasferencia de externalidades entre jurisdicciones territoriales, ya que si bien la Ciudad Núcleo logra implementar una medida.

En el caso de Bogotá, por ejemplo, las autoridades han intentado mitigar las externalidades del transporte de carga en la escala urbana con medidas tales como el pico y placa ambiental y las restricciones horarias de circulación, lo que sin duda ha contribuido a la mitigación de las externalidades pero sólo en la escala urbana y a costa de la generación de externalidades para el entorno metropolitano ya que los municipios aledaños se ven invadidos de vehículos de carga esperando al levantamiento de las restricciones para el ingreso a la ciudad. Sin duda esto es un evidente conflicto, en el que entre las diferentes escalas territoriales existe una transferencia de externalidades y seguramente esto mismo ocurre en otras regiones metropolitanas del país.

Estas decisiones en la actualidad se toman sin lograr precisar la magnitud exacta de la externalidad que se está disminuyendo, en el caso particular de la contaminación por emisiones se debe tener en cuenta que existen también fuentes fijas de emisiones y que dadas las limitaciones se está asumiendo que sólo los vehículos de carga contaminan, pero se debe contar con una herramienta como que se desarrolló en esta investigación como una contribución para la toma de decisiones sustentada, el lograr profundizar sobre esta propuesta y extenderla a otras tipologías, sin duda constituirá un avance para tomar de forma consciente y apoyándose en cifras este tipo de decisiones, además se recalca la necesidad de plantear esto como región metropolitana y no como municipios separados, entendiendo que este subsistema de ciudades al tener esta connotación tiene repercusiones en la red en la medida del estado de cada nodo.

Entre las restricciones típicas que se realizan en las regiones metropolitanas se tienen los cobros por congestión, las restricciones de circulación por corredores, los horarios de operación restringidos que motivan la logística urbana nocturna.

Desde la teoría, De Rus et al. (2003) proponen tres (3) medidas para la internalización de las externalidades que se constituye como el fin último para estimarlas y valorarlas.

- **Impuestos pigouvianos o tasa de compensación[22]:** la primera forma de intervención pública para intentar resolver el problema planteado por una externalidad negativa tiene una larga tradición, y los impuestos que se aplican con el objetivo de introducir correcciones suelen recibir el nombre de “pigouvianos”. La idea en la que se basan estos impuestos es muy sencilla: para hacer que la

[22] Ver páginas 382 -384 del libro Economía del Transporte (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

empresa internalice los costos de una externalidad que está causando a otros agentes, una posibilidad es hacerle pagar un impuesto o tasa que refleje los costes externos no contemplados.

- **Fijación de límites y estándares[23]:** Una segunda forma de intervención por parte de una autoridad reguladora para tratar de solucionar problemas de externalidades es la fijación directa de estándares o límites máximos de producción a los agentes que causan un problema. En el caso del transporte de carga, esta forma de intervención es muy frecuente, y se traduce en normas sobre niveles máximos de emisión de contaminantes o ruido que cada vehículo no debe sobrepasar e incentiva los cambios a tecnología como lo son los camiones a gas o eléctricos.

- **Negociación entre agentes[24]:** Una última forma para tratar de corregir una externalidad negativa es la propuesta por Coase (1960), que consiste en atacar a la base principal del problema: las externalidades aparecen por la utilización de un recurso que tiene características de bien público y cuyos derechos de propiedad no están bien definidos. La solución, por tanto, consiste en una definición precisa de los derechos de propiedad sobre el recurso que es objeto de utilización excesiva por parte de algún agente. Una vez determinado quién es el propietario del recurso, en principio sería posible, al menos teóricamente, que los propios actores resolvieran el problema de la externalidad a partir de un mecanismo de mercado.

Los mecanismos de corrección de los efectos externos del transporte están habitualmente basados en la intervención de autoridades reguladoras que tratan de solucionar los problemas planteados mediante impuestos. Aunque se sabe que este tipo de mecanismos de corrección son imperfectos, al menos se consigue reducir los niveles de productividad para aliviar los problemas de externalidades y se recaudan ingresos que sirven, al menos potencialmente, para realizar compensaciones a los agentes afectados.

[23] Ver página 385 del libro Economía del Transporte (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)
[24] Ver páginas 386 -390 del libro Economía del Transporte (De Rus, Campos, & Nombela, 2003)

4.3 Reducción de las externalidades del transporte de carga con la optimización de la logística metropolitana

A partir del desarrollo de un modelo de estimación y valoración de las externalidades como el desarrollado en la presente investigación, las regiones metropolitanas cuentan con herramientas para la optimización de la logística en función de las externalidades generadas y su contribución al costo social del transporte. De esta manera es posible plantear y evaluar diferentes escenarios en los que puedan revisar el impacto de dichas que busquen corregir o internalizar las externalidades. A continuación, se proponen unos escenarios que se podrían ser sujetos de evaluación, y unos posibles resultados esperados a nivel conceptual para cada uno de estos.

- **Escenario 1: Cambio del tamaño de la flota**

Una evaluación sencilla que se puede realizar dentro del modelo propuesto, es el cambio de las tipologías de vehículos para la movilización de la carga, de manera que se usen vehículos más grandes, con el fin de disminuir los viajes y de esta manera contribuir a la reducción de las externalidades negativas sin afectar la productividad económica. Es así como dentro del modelo planteado la magnitud de las externalidades se encuentra en función de los kilómetros recorridos y el tipo de vehículo, razón por la que optimizarlos tiene consecuencias directas como la reducción de las externalidades negativas.

- **Escenario 2: Reducción de emisiones vía cambio tecnológico**

Teniendo en cuenta que una de las externalidades que más se destacó en magnitud en el modelo planteado fue la contaminación por emisiones, era imprescindible plantear un escenario que se focalice en la reducción de dicha externalidad. En ese sentido, en la revisión de la literatura se encontró que de acuerdo con Marin (2019) a través de la metodología de dinámica de sistemas desarrolló un modelo de simulación para evaluar varias de las políticas y estrategias que pueden ser implementadas en el caso colombiano enfocadas en la reducción de las emisiones del transporte de carga, por lo que formuló cuatro diferentes escenarios (que se pueden evaluar usando el modelo propuesto en la presente investigación), los cuales se muestran en la Figura 4-2.

Figura 4-2: Escenarios para valuación de políticas públicas para reducción de emisiones del transporte de carga carretero en Colombia

Fuente: Tomado de (Marín, 2019)

El escenario base BAU (Business As Usual) o sin cambiar las costumbres de la actualidad, un escenario donde los otros modos de transporte como el férreo y el fluvial tienen mucha más participación en el reparto modal restándole demanda al modo carretero, según las primeras estimaciones que considera el DNP (escenario multimodal), el escenario innovación, en el cual no se favorecerían los otros modos, pero con ayuda de las nuevas tecnologías el modo carretero sería mucho más sostenible y el último el cual se caracterizaría por su eficiencia en el transporte, ya que habría diversidad en los modos para transportar las mercancías y vehículos nuevos mucho menos contaminantes (escenario de alta eficiencia).

- **Escenario 3: Anillo vial o variante**

Lo que se evidenció en el modelo propuesto es como la Ciudad Núcleo de la región metropolitana se ve afectada en mayor magnitud por las externalidades en función de su tamaño y el papel que tiene en sí misma. Por esta razón se propone un esquema en el que se logren disminuir los movimientos de carga que no tienen como origen/destino la Ciudad

Núcleo con el fin de reducir el impacto de las externalidades sobre sus corredores. Esto se podría lograr con la puesta en marcha de un anillo vial o variante que desvié estos flujos. En el modelo propuesto se puede estimar la diferencia en términos de la magnitud de las externalidades entre el escenario base y el escenario 3 que se representaría al eliminar del modelo el porcentaje de viajes sin origen/destino en la Ciudad Núcleo.

- **Escenario 4: Cambios en los patrones de usos del suelo**

Uno de los hallazgos en la representación espacial de las externalidades es la incidencia que tiene la configuración del territorio en los patrones de viaje del transporte de carga. Es así como un escenario que se puede proponer, aunque a largo plazo es la reorganización de la actividad logística e industrial de la Ciudad Núcleo de la región metropolitana ubicándolos en las periferias con el fin de reducir el número de kilómetros recorridos, la población expuesta y la cantidad de vehículos circulando en los corredores metropolitanos en su tramo urbano. Este escenario tiene implicaciones sobre las estrategias de distribución en la logística urbana. Para evaluar este escenario y tener claridad sobre la disminución de las magnitudes de las externalidades a partir de la aplicación del modelo, se debe realizar una aproximación previa a la disminución de viajes por tipología vehicular dentro del modelo.

- **Escenario 5: Modo férreo como estructurador de la logística metropolitana**

Este escenario se plantea tomando como caso específico la Región Metropolitana de Bogotá, que en estos momentos tiene la oportunidad de incorporar el modo férreo a su logística metropolitana con la entrada en funcionamiento de Regiotram del Norte que se incorporaría a la actual operación del Tramo Bogotá - Belencito. En este escenario se propone que el eje estructurador de la logística metropolitana sea el modo férreo y los camiones se incorporen en la logística de última milla, de manera que se podrá evidenciar la reducción de la congestión en el acceso a Bogotá y en consecuencia la disminución de la contaminación por emisiones. Se puede proponer adicional en este escenario que los camiones utilizados en la logística de última milla sean eléctricos

5. Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones resultado de los análisis realizados en el marco del desarrollo de esta investigación.

5.1 Conclusiones

Esta investigación logró desarrollar un modelo conceptual y metodológico que se aplicó para la identificación y estimación de externalidades del transporte de carga a partir de la noción de costo social del transporte para un entorno metropolitano. De esta manera, se aplicó al caso concreto de la Región Metropolitana de Bogotá y se obtuvo una aproximación a la estimación y valoración de externalidades. A partir de lo anterior, se logró validar la hipótesis planteada como punto de partida de la presente investigación, ya que la disertación y los nuevos conceptos presentados en este documento llevan a concluir que en la actualidad el costo social del transporte de carga en los entornos metropolitanos no se está pagando en su totalidad, dado que las externalidades negativas del transporte no son compensadas e internalizadas como sería lo deseable.

Esto se presenta porque no existen mecanismos adecuados de estimación de la magnitud de las externalidades, por lo que cuantificar su costo resulta difícil. De ahí que se evidenció la relevancia y la necesidad de desarrollar modelos conceptuales, metodológicos e instrumentales para medir externalidades con la especificidad del transporte de carga, y para ámbitos metropolitanos con las particularidades expuestas a lo largo del documento. No es lo mismo realizar análisis de externalidades en un ámbito nacional, regional o urbano, a un ámbito metropolitano donde confluyen y se superponen flujos de transporte de distintas escalas territoriales.

Las conclusiones se agruparon según el capítulo en el que se desarrollaron, tal y como se presenta a continuación.

5.1.1 Modelo conceptual

El enfoque desde la geografía económica trata el transporte como una fuente de externalidad, aunque a su vez las dinámicas del transporte de carga generan sus propias externalidades. Esto es básico para entender la manera como se expresan o, para llamarlo de otra manera, el alcance de las externalidades económicas de tipo tecnológico del transporte de carga que se distinguen de otras posibles categorías de externalidades, en los distintos ámbitos territoriales, ya que tradicionalmente se interpreta la externalidad como algo genérico donde la escala geográfica no importa.

Esta tesis buscó introducir el concepto de externalidades como algo asociado a la escala territorial y demostró que la expresión de las externalidades varía y genera transferencias entre jurisdicciones territoriales en el ámbito metropolitano. Por ende, la medida de mitigación no debe surgir de una coyuntura como una emergencia ambiental, sino de un proceso de planificación consensuado del proceso logístico y su relación con la movilidad y el territorio.

5.1.2 Propuesta metodológica

La propuesta metodológica identificó la congestión, la siniestralidad vial, y la contaminación por emisiones como las principales externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos y otras en términos de influencia sobre el territorio. Lo que llama la atención en este caso es que en la actualidad no existe un referente para la medición y valoración económica de estas externalidades, por lo que no existe un mecanismo o herramienta sobre el que haya consenso acerca de su validez para internalizar los costos asociados a las externalidades del transporte de carga.

El modelo metodológico propuesto permitió dar respuesta a la pregunta orientadora de la presente investigación **¿Cómo generar mecanismos para valorar e internalizar los costos asociados a las externalidades negativas del transporte de carga en entornos metropolitanos?** Lo que evidenció esta investigación es que la pregunta se logró resolver de manera precisa y dio origen a otras preguntas que permitieron profundizar los análisis

y que se lograron responder a lo largo de la investigación ¿Cuáles son las características de las externalidades del transporte de carga en entornos metropolitanos? ¿Cómo se expresan o cuál es el alcance de las externalidades en función de cada ámbito geográfico?

La virtud del modelo propuesto es que permite expresar todas las externalidades en términos de costos, de manera que hace comparables sus impactos. Adicionalmente, permite aislar el efecto de los vehículos asociados al transporte de carga en el ámbito metropolitano. Además, el modelo metodológico tiene tres componentes fundamentales: permite estimar la magnitud de las externalidades, evaluar su expresión espacial en el territorio y, finalmente, valorar los efectos de las externalidades, en términos de costos externos que permiten complementar la ecuación ya conocida de costo social del transporte, la cual hasta el momento solo se abordaba incluyendo costos del productor y del usuario.

5.1.3 Estimación y valoración de las externalidades en la Región Metropolitana de Bogotá

El ejercicio de aproximación a la estimación y valoración de externalidades permitió corroborar la **hipótesis** planteada inicialmente ya que particularmente en la Región Metropolitana de Bogotá es creciente el número de centros industriales y logísticos que se han constituido en los últimos 20 años, esto está directamente relacionado con las ventajas que ofrece está localización en términos de costos del transporte para los productores y usuarios, asociadas a las economías de aglomeración, de red y de alcance que se explican desde la teoría de la geografía económica para las regiones o áreas metropolitanas. Sin embargo, estas ventajas para las empresas del sector se presentan a costa de las externalidades del transporte sobre la movilidad cotidiana y la sociedad en la Región Metropolitana de Bogotá, lo que en términos generales no representa un beneficio real para la región.

Un aspecto que no se logró validar de la hipótesis, es el balance entre las externalidades negativas y positivas, ya que a diferencia de lo que se planteó, en el caso específico de la Región Metropolitana de Bogotá y con la metodología utilizada no son mayores las externalidades negativas que las positivas en términos de costos económicos, sin embargo las expresiones de las externalidades negativas del transporte de carga metropolitano si son percibidas como de gran impacto para la sociedad, los tomadores de decisiones, y

para las mismas empresas, que no internalizan estos costos de las externalidades que finalmente son asumidos por la sociedad, los recursos municipales y por ellos mismos, como es el caso de la congestión en los accesos a Bogotá.

El modelo aplicado en el ejercicio para el caso de Bogotá Metropolitana arrojó que los costos de las externalidades asociadas al transporte de carga metropolitano equivalen a un aproximado de $246.993 miles de millones de pesos colombianos de los cuáles el 4% corresponden a externalidades negativas, donde la externalidad que más peso tiene es la contaminación por emisiones atmosféricas. Es así como se evidenció bajo este enfoque con la metodología utilizada para el caso específico de la Región Metropolitana de Bogotá que las externalidades positivas y negativas tienen un desbalance que se inclina hacia las positivas, sin embargo, las negativas tienen una expresión que se percibe como más fuerte en el ámbito metropolitano, sin embargo, es importante aclarar que si se incluyen otras externalidades positivas y negativas y de una manera más precisa el balance puede ser otro.

Con las limitaciones expuestas y las oportunidades de mejora que tiene la aplicación del modelo metodológico propuesto, se logró una estimación y valoración de las externalidades del transporte de carga metropolitano con resultados dicientes, que denotan el vacío que existe, quizás haya otros flujos de movilidad y transporte que estén contribuyendo con mayores externalidades, pero a falta de una herramienta adecuada para evidenciar y cuantificar estos fenómenos para tomar decisiones, se terminan aplicando políticas que pueden resultar regresivas al centrarse solo en la restricción al transporte de carga cuando de reducir externalidades se trata.

5.1.4 Internalización de las externalidades

La decisión sobre cómo y quién debe pagar los costos externos para pagar el costo social del transporte en su totalidad es una de las más trascendentales dentro de la política económica del transporte. En la actualidad, una de las posiciones más comunes es que los costos externos no se internalicen, es decir, que las empresas productoras de transporte que generan externalidades negativas no paguen por los costos que generan a la sociedad. Sin embargo, una posición ideal sería lograr la medición y cuantificación de las externalidades para internalizarlas dentro de los costos del transporte.

El modelo conceptual y metodológico propuesto es un claro ejemplo de las herramientas con las que deben contar las regiones o áreas metropolitanas para la incorporación de la evaluación del costo social del transporte en su perspectiva de planificación del transporte de carga y configuración de la actividad industrial y logística. Es tan importante este elemento que se encuentran situaciones como la que vive Bogotá en cada emergencia ambiental, en la que los diversos actores involucrados en la movilidad entran en conflicto a la hora de defender sus intereses, los cuales son muy válidos.

Contar con herramientas como la aplicación de esta metodología permite que las ciudades tomen decisiones más allá de sus límites administrativos. En particular, para el caso de Bogotá permite repensar la movilidad y la logística como región metropolitana, con el fin de no generar transferencia de externalidades entre las diferentes jurisdicciones territoriales que componen la región.

5.2 Recomendaciones

El desarrollo del modelo conceptual y metodológico que hace parte de este trabajo permitió evidenciar los vacíos que existen en la gestión de medidas para internalización de las externalidades del transporte de carga en la escala metropolitana. Esto recalca la importancia de abordar el transporte de carga reconociendo la variación de su impacto en términos de expresiones de externalidades sobre el territorio y distinguiendo sus efectos en los diferentes ámbitos territoriales. Por esta razón, es importante que las autoridades de movilidad cuenten con una herramienta que permita tomar decisiones que no generen la transferencia de las externalidades entre las diferentes jurisdicciones de una región metropolitana, sino que optimicen la logística y disminuyan o mitiguen las externalidades con estrategias de internalización de las mismas.

Estas reflexiones y hallazgos constituyen una importante base conceptual y metodológica para posteriores investigaciones orientadas a cuantificar de manera más precisa las externalidades del transporte de carga e incluso estimar las de otros modos en entornos metropolitanos y ámbitos territoriales. Con base en la experiencia adquirida durante el desarrollo de esta investigación, se recomienda para futuros trabajos lo siguiente:

- Tomar la base conceptual expuesta en el presente documento para robustecer el análisis de las externalidades bajo la noción de costo social del transporte.

- La base para la aplicación del modelo metodológico propuesto es contar con un modelo de transporte de carga calibrado con diferentes tipologías vehiculares, que permita una estimación de las magnitudes de las externalidades del transporte de carga más exactas, que se reflejen en la valoración económica.
- En el caso del ejercicio de aplicación de la metodología para una mejor estimación de externalidades en el caso de la Región Metropolitana de Bogotá es importante que se pueda contar con los insumos recomendados a lo largo del capítulo 3.
- Esta tesis hace una primera propuesta sobre la medición y valoración de externalidades, sin embargo, cada externalidad puede particularizarse, y alcanzar un análisis más profundo en función de la cantidad y calidad de la información disponible. En ese sentido con respecto a la información adicional a la planteada en el presente documento que sería deseable para el análisis de las externalidades del transporte de carga metropolitano se tiene la siguiente: características del estado de la vía, condiciones operacionales, de tráfico, atmosféricas, urbanas y territoriales, tasa de construcción, consolidación de industria y desarrollo económico. Lo anterior conduce a obtener insumos más representativos en series de tiempo y espacialmente que permiten evaluar con más detalle las causas de las concentraciones de contaminación atmosférica por fuentes móviles para aplicar métodos más complejos que se han desarrollado en otras investigaciones, estudiar más a fondo las causas de los siniestros y determinar con más precisión las condiciones que provocan la congestión.
- Es importante que, a la hora de formular políticas públicas, los tomadores de decisiones cuenten con herramientas sólidas para actuar sobre resultados, de manera que puedan plantear los escenarios que mejor permitan optimizar la logística, contemplando las externalidades como indicadores de seguimiento al desempeño del transporte de carga.

Bibliografía

Al-Haji, G. (2007). *Road Safety Development Index: Theory, Philosophy and Practice.* Norrköping: Sweden.

Arango, M. (2017). *Indicadores de desempeño para empresas del sector logístico: Un enfoque desde el transporte de carga terrestre.* Chile: Revista chilena de Ingeniería.

Boix D., R. (2003). *Redes de ciudades y externalidades.* Barcelona: Universidad Autonoma de Barcelona.

Bull, A. (2003). *Congestión de Transito. El problema y como enfrentarlo.* CEPAL.

Button, K. J. (2010). *Transport economics* (3nd ed.). Edward Elgar Publishing Ltd.

Cabrera, G., & Arango, A. (2015). *Costo de indicentes viales en Medellín 2010-2014.* Retrieved from http://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/629b3ce2-1c54-45de-9671-0bbf65bd01fc/Costo+SeguVial+Med+V8+Febrero+2015.pdf?MOD=AJPERES

Camagni, R. (2005). *Economía Urbana.* Barcelona: Antoni Bosch Editor.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2018). *Observatorio de la Región - Cundinamarca*. Retrieved from https://www.ccb.org.co/observatorio/Economia/Economia-dinamica-incluyente-e-innovadora/Crecimiento-economico/Crecimiento-economico/Bogota-Cundinamarca-es-la-region-con-mayor-participacion-en-el-PIB-nacional

Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional - UNCRD. (2011). *Lineamientos para una política de adapatación a la evolución de los asentamientos productivos en la estructura metropolitana y regional Bogotá - Sabana.* Bogotá D.C.: Secretaria Distrital de Planeación.

DANE. (2018). *PIB por departamento*. Retrieved from https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales

Danese, M. (2016). *Costos externos del transporte de cargas en Argentina: una primera aproximación.* Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

De Rus, G., Campos, J., & Nombela, G. (2003). *Economía del Transporte.* Antonni Bosch.

Delucchi, M., & McCubbin, D. (2011). External costs of transport in the United States. In *A Handbook of Transport Economics* (pp. 341-368). Massachusetts: Edward Elgar Publishing, Inc.

Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Encuesta Nacional Logística ENL 2018.*

Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Nueva Visión de la Política Nacional Logística.* Bogotá.

Díaz, C., A. G., & S. R. (2003). *La regulación del transporte de carga en Santiago: características, evaluación y propuestas.* Santiago de Chile: Sociedad de Fomento Fabril.

División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL. (2010). *Seguridad en la operación del transporte de carga carretero.*

Econometría Consultores. (2018). *Technical Assistance for the Design of Air Pollution Charges and GHG Emission Levies at the Sub-National Level.* Medellín: The World Bank.

Fernández, Y., & Olmedillas Blanco, B. (2001). *Transporte, externalidades y costo social.* Retrieved from Universidad Autonoma de Madrid.

Friedrich, R., & Quinet, E. (2011). External costs of transport in Europe. In *A Handbook of Transport Economics* (pp. 369-395). Massachusetts: Edward Elgar Publishing, Inc.

Fujita, M., & Krugman, P. (2004). *La nueva geografía económica: pasado, presente y futuro.* Retrieved from Investigaciones Regionales: https://www.redalyc.org/pdf/289/28900409.pdf

Fullerton, D. (2001). A framework to compare environmental policies. *Southern Economic Journal*, 224-248.

Gago, A., Labandeira, X., Labeaga, J., & López-Otero, X. (2020). *Pautas para una Reforma de la Fiscalidad del Transporte en España.* Madrid: Enforenergy.

Global Road Safety Partnership. (2008). *Speed management: a road safety manual for decision-makers and practitioners.* Génova: Global Road Safety Partnership.

Gobierno de Aragón. (2009). *Manual para la estimación de los costes externos en el sector del transporte y para la definición de las políticas de internalización de estos costes.*

IDOM. (2018). *Estudio de crecimiento y evolución de la huella urbana Bogotá – Región.*

Kairuz D., K. R. (2014). *Estudio y Aplicación de los Modelos de Transporte de Carga Urbano: Generación, Atracción y Distribución de Transporte de Carga en la Ciudad de Bogotá.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Krugman, P. (1992). *Geografía y comercio.* Barcelona: Antoni Bosch.

Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H., Boon, B., Smokers, R., Schroten, A. (2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector.* Holanda: Delft.

Marín, S. (2019). *Evaluación de políticas para reducir emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte de carga carretera en Colombia.* Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional.

Márquez D., L. G., & Avella A., H. W. (2012). Estimación del valor estadístico de la vida. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 101-112.

Márquez Díaz, L. G., & Cantillo Maza, V. M. (2011). Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia. *Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte, Volumen 29*(2), 286-307.

Ministerio de Ambiente. (2017). *Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas.* Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/GU%C3%8DA_PARA_LA_ELABORACI%C3%93N_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSF%C3%89RICAS.pdf

Mora A., L. A. (2012). *Corredor Industrial de Occidente: Nuevo modelo de industrialización – urbanización – regionalización.* Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Mostert, M., & Limbourg, S. (2004). *External costs as competitiveness factors for freight transport – a state of the art.* Belgium: University of Liege.

Proost, S. (2011). Theory of external costs. In *A Handbook of Transport Economics* (pp. 319-340). Massachusetts: Edward Elgar Publishing, Inc.

Requate, T. (2005). Dynamic incentives by environmental policy instruments: a survey. *Ecological Economics*, 175 - 195.

Ruiz, C. (2015). *Metropolización de las grandes ciudades en Colombia : Una aproximación desde las instituciones subnacionales y el desarrollo económico.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Scitovsky, T. (1959). *Dos conceptos de economías externas.* Retrieved from Desarrollo económico: file:///C:/Users/Win10/Downloads/Dialnet-DosConceptosDeEconomiasExternas-2495980.pdf

Secretaria Distrital de Planeación. (2014). *Región Metropolitana de Bogotá: Una visión de la ocupación del suelo.* Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Silva M., A. (2016). *Transporte y Estructuración Espacial Metropolitana: El caso de la Región Metropolitana de Bogotá.* Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual - SDA. (2019). *Inventario de emisiones de fuentes móviles y fuentes fijas industriales.* Bogotá D.C.: Secretaría Distrital de Ambiente.

Tinoco–López, R., & Jaime P., A. (2006). Métodos de valuación de externalidades ambientales provocadas por obras de ingeniería. *Ingeniería, investigación y tecnología. Universidad Autonoma de México*.

Varian, H. R. (1994). *Microeconomía intermedia: Un enfoque moderno.* Barcelona: Antoni Bosch Editor.

A. Anexo: Matriz de carga metropolitana a partir del RNDC

Consolidado de la matriz de carga construida a partir de la información de viajes y toneladas movilizadas del RNDC del año 2019 para la Región Metropolitana de Bogotá. Estos valores son la base para la estimación de las magnitudes de las externalidades del transporte de carga dentro modelo propuesto que representa las dinámicas metropolitanas de Bogotá identificadas y caracterizadas en el capítulo 3.

Anexo A: Movimiento de carga en la Región Metropolitana de Bogotá

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Tocancipá	Bogotá	915.134	55.379	16,14%	7,14%
Funza	Bogotá	506.224	121.333	8,93%	15,64%
Bogotá	Tocancipá	437.363	26.188	7,71%	3,38%
La Calera	Bogotá	217.397	9.707	3,83%	1,25%
Bogotá	Funza	197.317	41.377	3,48%	5,33%
Cota	Bogotá	190.773	46.659	3,36%	6,02%
Facatativá	Bogotá	172.116	32.169	3,03%	4,15%
Sopó	Bogotá	160.461	11.556	2,83%	1,49%
Cajicá	Bogotá	157.495	17.145	2,78%	2,21%
Madrid	Bogotá	138.406	18.680	2,44%	2,41%
Facatativá	Funza	95.782	4.003	1,69%	0,52%
Tenjo	Bogotá	94.735	26.538	1,67%	3,42%
Bogotá	Cota	87.101	19.901	1,54%	2,57%
Bogotá	Madrid	86.562	13.719	1,53%	1,77%
Soacha	Bogotá	62.882	8.421	1,11%	1,09%
Bogotá	Mosquera	61.777	11.739	1,09%	1,51%
Mosquera	Bogotá	61.557	14.165	1,09%	1,83%
Tenjo	Mosquera	54.216	10.854	0,96%	1,40%
Bogotá	Soacha	53.831	10.856	0,95%	1,40%
Gachancipá	Bogotá	52.032	10.830	0,92%	1,40%
Cota	Funza	49.801	6.036	0,88%	0,78%
Tocancipá	Funza	47.797	5.359	0,84%	0,69%
La Calera	Sibaté	47.677	1.453	0,84%	0,19%
Sibaté	Bogotá	45.483	3.988	0,80%	0,51%
Madrid	Funza	45.297	3.351	0,80%	0,43%
Bogotá	Tenjo	40.908	8.403	0,72%	1,08%
Bogotá	Facatativá	40.182	18.406	0,71%	2,37%
Cajicá	Soacha	40.083	1.416	0,71%	0,18%
Bogotá	Chía	39.364	11.794	0,69%	1,52%
Zipaquirá	Bogotá	38.096	2.980	0,67%	0,38%
Bogotá	Zipaquirá	37.795	11.491	0,67%	1,48%
Sopó	Funza	37.095	1.363	0,65%	0,18%
Cajicá	Cota	36.066	1.814	0,64%	0,23%
Cajicá	Funza	35.434	3.542	0,62%	0,46%
Tocancipá	Cota	32.366	2.040	0,57%	0,26%
Chía	Bogotá	31.846	4.139	0,56%	0,53%
Sopó	Madrid	30.572	1.904	0,54%	0,25%
Funza	Soacha	30.469	5.021	0,54%	0,65%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Mosquera	Funza	30.146	3.332	0,53%	0,43%
Funza	Mosquera	29.853	4.256	0,53%	0,55%
Sibaté	Tocancipá	29.463	1.013	0,52%	0,13%
Cajicá	Tocancipá	26.549	3.365	0,47%	0,43%
Tocancipá	Sibaté	26.388	828	0,47%	0,11%
Bogotá	Cajicá	23.573	6.538	0,42%	0,84%
Madrid	Tocancipá	22.884	1.626	0,40%	0,21%
Funza	Facatativá	22.825	4.224	0,40%	0,54%
Funza	Madrid	22.497	3.022	0,40%	0,39%
Zipaquirá	Mosquera	22.328	1.200	0,39%	0,15%
Cajicá	Zipaquirá	21.628	3.515	0,38%	0,45%
Chía	Mosquera	19.926	629	0,35%	0,08%
Cajicá	Madrid	19.623	658	0,35%	0,08%
Bogotá	Gachancipá	19.416	4.147	0,34%	0,53%
Funza	Cota	19.280	2.638	0,34%	0,34%
Funza	Tenjo	18.871	2.061	0,33%	0,27%
Cajicá	Mosquera	17.753	1.007	0,31%	0,13%
Bogotá	Sibaté	17.496	3.495	0,31%	0,45%
Tocancipá	Soacha	17.347	1.578	0,31%	0,20%
Cajicá	Tenjo	17.260	659	0,30%	0,08%
Madrid	Cota	15.603	1.521	0,28%	0,20%
Funza	Tocancipá	15.535	2.280	0,27%	0,29%
La Calera	Soacha	15.474	540	0,27%	0,07%
Tocancipá	Mosquera	15.391	1.575	0,27%	0,20%
Mosquera	Tenjo	13.523	1.311	0,24%	0,17%
Funza	Chía	12.486	3.641	0,22%	0,47%
La Calera	Madrid	11.680	402	0,21%	0,05%
Zipaquirá	Funza	10.810	573	0,19%	0,07%
Tenjo	Funza	10.805	2.545	0,19%	0,33%
Sibaté	Cota	10.572	413	0,19%	0,05%
Tocancipá	Chía	10.472	1.567	0,18%	0,20%
Funza	Gachancipá	10.232	1.209	0,18%	0,16%
Cota	Tocancipá	10.107	1.489	0,18%	0,19%
Facatativá	Tocancipá	10.061	844	0,18%	0,11%
Soacha	Mosquera	9.977	881	0,18%	0,11%
Tocancipá	Cajicá	9.735	1.100	0,17%	0,14%
Cota	Mosquera	9.484	1.741	0,17%	0,22%
Funza	Zipaquirá	9.409	3.372	0,17%	0,43%
Mosquera	Cota	9.319	2.518	0,16%	0,32%
Tenjo	Chía	9.096	2.566	0,16%	0,33%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Tenjo	Cota	8.883	2.067	0,16%	0,27%
Bogotá	La Calera	8.767	2.548	0,15%	0,33%
Soacha	Funza	8.736	1.047	0,15%	0,13%
Bogotá	Bogotá	8.708	2.056	0,15%	0,27%
Mosquera	Tocancipá	8.665	2.000	0,15%	0,26%
Tocancipá	Madrid	8.547	720	0,15%	0,09%
Cota	Gachancipá	8.169	833	0,14%	0,11%
Madrid	Facatativá	8.158	710	0,14%	0,09%
La Calera	Cajicá	8.015	284	0,14%	0,04%
Madrid	Mosquera	7.978	835	0,14%	0,11%
Mosquera	Facatativá	7.976	1.663	0,14%	0,21%
Funza	Cajicá	7.780	1.662	0,14%	0,21%
Bogotá	Sopó	7.768	2.437	0,14%	0,31%
Cota	Madrid	7.235	1.080	0,13%	0,14%
Soacha	Madrid	6.853	1.017	0,12%	0,13%
Soacha	Zipaquirá	6.288	1.214	0,11%	0,16%
Sopó	Chía	6.251	427	0,11%	0,06%
Tenjo	Facatativá	6.245	2.271	0,11%	0,29%
Cota	Sibaté	6.091	1.782	0,11%	0,23%
Tocancipá	Zipaquirá	6.035	971	0,11%	0,13%
Mosquera	Cajicá	5.830	541	0,10%	0,07%
Cota	Tenjo	5.821	751	0,10%	0,10%
Madrid	Sopó	5.681	529	0,10%	0,07%
Soacha	Tocancipá	5.435	1.135	0,10%	0,15%
Tenjo	Madrid	5.354	1.402	0,09%	0,18%
Cota	Zipaquirá	5.236	943	0,09%	0,12%
Sopó	Soacha	5.184	341	0,09%	0,04%
Cota	Facatativá	5.098	1.092	0,09%	0,14%
Mosquera	Madrid	5.010	1.237	0,09%	0,16%
La Calera	Zipaquirá	4.971	154	0,09%	0,02%
Tenjo	Tocancipá	4.861	1.480	0,09%	0,19%
Soacha	Cota	4.852	461	0,09%	0,06%
Chía	Funza	4.759	444	0,08%	0,06%
Tocancipá	Facatativá	4.739	676	0,08%	0,09%
Madrid	Soacha	4.678	691	0,08%	0,09%
La Calera	Chía	4.658	149	0,08%	0,02%
Cota	Sopó	4.594	670	0,08%	0,09%
Mosquera	Sopó	4.441	877	0,08%	0,11%
Funza	Sibaté	4.363	866	0,08%	0,11%
Mosquera	El Rosal	4.361	1.075	0,08%	0,14%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Soacha	Cajicá	4.359	840	0,08%	0,11%
Tenjo	Gachancipá	4.348	556	0,08%	0,07%
Sopó	Mosquera	4.347	368	0,08%	0,05%
Bogotá	El Rosal	4.260	1.730	0,08%	0,22%
Tenjo	Zipaquirá	4.188	1.602	0,07%	0,21%
Tocancipá	Sopó	4.089	734	0,07%	0,09%
La Calera	Mosquera	4.028	138	0,07%	0,02%
Cajicá	La Calera	3.940	166	0,07%	0,02%
La Calera	Cota	3.937	160	0,07%	0,02%
Gachancipá	Chía	3.865	677	0,07%	0,09%
La Calera	Tocancipá	3.815	192	0,07%	0,02%
Cota	Chía	3.740	637	0,07%	0,08%
Gachancipá	Zipaquirá	3.732	693	0,07%	0,09%
Tocancipá	La Calera	3.713	471	0,07%	0,06%
Mosquera	Soacha	3.678	735	0,06%	0,09%
Cajicá	Tabio	3.678	167	0,06%	0,02%
Sibaté	Mosquera	3.630	262	0,06%	0,03%
Cajicá	El Rosal	3.254	115	0,06%	0,01%
Tenjo	Cajicá	3.240	1.340	0,06%	0,17%
Sopó	Facatativá	3.188	230	0,06%	0,03%
Gachancipá	Tenjo	3.143	450	0,06%	0,06%
Gachancipá	Cajicá	2.935	780	0,05%	0,10%
La Calera	Sopó	2.909	97	0,05%	0,01%
Tocancipá	Gachancipá	2.879	227	0,05%	0,03%
Funza	La Calera	2.857	741	0,05%	0,10%
Tocancipá	Tenjo	2.814	566	0,05%	0,07%
Madrid	Chía	2.795	620	0,05%	0,08%
Funza	Sopó	2.784	814	0,05%	0,10%
Zipaquirá	Cota	2.771	414	0,05%	0,05%
Cajicá	Chía	2.743	461	0,05%	0,06%
Soacha	Chía	2.742	445	0,05%	0,06%
Cajicá	Facatativá	2.728	252	0,05%	0,03%
Gachancipá	Funza	2.702	217	0,05%	0,03%
Cota	Cajicá	2.702	386	0,05%	0,05%
Gachancipá	Cota	2.606	454	0,05%	0,06%
Soacha	Facatativá	2.551	653	0,04%	0,08%
Mosquera	Zipaquirá	2.531	885	0,04%	0,11%
Zipaquirá	Tocancipá	2.526	274	0,04%	0,04%
Cajicá	Gachancipá	2.458	701	0,04%	0,09%
Soacha	Sopó	2.415	235	0,04%	0,03%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Tenjo	Sopó	2.384	443	0,04%	0,06%
Tocancipá	El Rosal	2.377	254	0,04%	0,03%
Cota	El Rosal	2.319	662	0,04%	0,09%
Facatativá	Soacha	2.260	1.029	0,04%	0,13%
Tenjo	Soacha	2.204	812	0,04%	0,10%
La Calera	Funza	2.199	73	0,04%	0,01%
Soacha	Tenjo	2.139	246	0,04%	0,03%
El Rosal	Bogotá	2.095	729	0,04%	0,09%
Gachancipá	Tocancipá	2.079	332	0,04%	0,04%
Facatativá	Mosquera	2.067	1.420	0,04%	0,18%
Sibaté	Soacha	2.039	69	0,04%	0,01%
Madrid	Zipaquirá	2.036	517	0,04%	0,07%
Sibaté	Sopó	2.009	101	0,04%	0,01%
Gachancipá	La Calera	1.982	371	0,03%	0,05%
Chía	Gachancipá	1.954	146	0,03%	0,02%
Funza	El Rosal	1.931	401	0,03%	0,05%
Cota	Soacha	1.905	398	0,03%	0,05%
La Calera	Facatativá	1.839	136	0,03%	0,02%
La Calera	Tenjo	1.810	62	0,03%	0,01%
Mosquera	Sibaté	1.645	173	0,03%	0,02%
Zipaquirá	Soacha	1.640	70	0,03%	0,01%
Sibaté	Chía	1.634	118	0,03%	0,02%
Sibaté	Funza	1.632	131	0,03%	0,02%
Madrid	Tenjo	1.553	287	0,03%	0,04%
Mosquera	Chía	1.523	483	0,03%	0,06%
Madrid	Cajicá	1.438	294	0,03%	0,04%
Tabio	Bogotá	1.426	331	0,03%	0,04%
Bogotá	Tabio	1.403	708	0,02%	0,09%
Chía	Tocancipá	1.399	123	0,02%	0,02%
Sibaté	Cajicá	1.392	136	0,02%	0,02%
Mosquera	Gachancipá	1.268	331	0,02%	0,04%
Mosquera	La Calera	1.266	254	0,02%	0,03%
Zipaquirá	Cajicá	1.235	272	0,02%	0,04%
Zipaquirá	Gachancipá	1.214	164	0,02%	0,02%
Sibaté	Zipaquirá	1.212	105	0,02%	0,01%
La Calera	El Rosal	1.183	36	0,02%	0,001%
Chía	Tenjo	1.181	272	0,02%	0,04%
Facatativá	Sopó	1.178	240	0,02%	0,03%
Gachancipá	Mosquera	1.169	133	0,02%	0,02%
Soacha	El Rosal	1.149	102	0,02%	0,01%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Sopó	Tocancipá	1.130	197	0,02%	0,03%
Gachancipá	Tabio	1.078	182	0,02%	0,02%
Funza	Tabio	1.071	446	0,02%	0,06%
Sopó	Tenjo	1.052	68	0,02%	0,01%
Sibaté	Facatativá	1.020	89	0,02%	0,01%
Sopó	Zipaquirá	1.006	87	0,02%	0,01%
Soacha	La Calera	991	203	0,02%	0,03%
Soacha	Gachancipá	928	238	0,02%	0,03%
Funza	Bojacá	899	215	0,02%	0,03%
Facatativá	Madrid	897	2.049	0,02%	0,26%
Sopó	Cota	895	60	0,02%	0,01%
Zipaquirá	Facatativá	857	164	0,02%	0,02%
Sibaté	Tenjo	855	65	0,02%	0,01%
Facatativá	Tenjo	832	609	0,01%	0,08%
Tenjo	Sibaté	824	405	0,01%	0,05%
Gachancipá	Sopó	820	138	0,01%	0,02%
Facatativá	Cota	805	878	0,01%	0,11%
Facatativá	Zipaquirá	764	333	0,01%	0,04%
Cajicá	Sibaté	756	32	0,01%	0,001%
Tocancipá	Tabio	723	89	0,01%	0,01%
Cajicá	Sopó	671	112	0,01%	0,01%
Cota	La Calera	658	121	0,01%	0,02%
Zipaquirá	Chía	636	304	0,01%	0,04%
Funza	Zipacón	571	73	0,01%	0,01%
Sibaté	Madrid	526	57	0,01%	0,01%
Chía	Sopó	512	45	0,01%	0,01%
Gachancipá	Madrid	508	56	0,01%	0,01%
Chía	Cota	491	101	0,01%	0,01%
Chía	Madrid	487	160	0,01%	0,02%
Mosquera	Tabio	486	157	0,01%	0,02%
Chía	Cajicá	456	54	0,01%	0,01%
Chía	Zipaquirá	447	67	0,01%	0,01%
Sopó	Cajicá	431	57	0,01%	0,01%
Sibaté	Bojacá	431	48	0,01%	0,01%
Tenjo	La Calera	409	203	0,01%	0,03%
Cota	Bojacá	388	67	0,01%	0,01%
Madrid	Sibaté	375	66	0,01%	0,01%
Zipaquirá	Tenjo	366	102	0,01%	0,01%
Bojacá	Bogotá	343	86	0,01%	0,01%
Bogotá	Bojacá	339	166	0,01%	0,02%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Zipaquirá	Sopó	296	62	0,01%	0,01%
Zipaquirá	Madrid	258	56	0,001%	0,01%
Tenjo	Tabio	241	87	0,001%	0,01%
Soacha	Tabio	223	60	0,001%	0,01%
Tenjo	El Rosal	221	73	0,001%	0,01%
Zipaquirá	La Calera	210	36	0,001%	0,01%
Chía	Soacha	195	21	0,001%	0,01%
Chía	Facatativá	191	52	0,001%	0,01%
Madrid	El Rosal	185	40	0,001%	0,01%
Sopó	La Calera	180	31	0,001%	0,01%
El Rosal	Mosquera	177	20	0,001%	0,01%
Madrid	La Calera	170	72	0,001%	0,01%
Facatativá	Gachancipá	162	61	0,001%	0,01%
Chía	La Calera	153	28	0,001%	0,01%
Zipaquirá	Tabio	136	32	0,001%	0,01%
Facatativá	Chía	134	209	0,001%	0,01%
El Rosal	Cota	131	7	0,001%	0,01%
Madrid	Gachancipá	128	26	0,001%	0,01%
Gachancipá	Facatativá	126	48	0,001%	0,01%
Gachancipá	Soacha	122	65	0,001%	0,01%
Chía	El Rosal	121	15	0,001%	0,001%
Zipaquirá	El Rosal	118	18	0,001%	0,001%
Cota	Tabio	116	44	0,001%	0,01%
Sopó	Gachancipá	106	13	0,001%	0,001%
Soacha	Sibaté	105	18	0,001%	0,001%
Chía	Sibaté	94	13	0,001%	0,001%
Bogotá	Zipacón	90	26	0,001%	0,001%
Soacha	Soacha	87	12	0,001%	0,001%
Facatativá	La Calera	76	134	0,001%	0,02%
Mosquera	Bojacá	76	55	0,001%	0,01%
Madrid	Tabio	73	26	0,001%	0,001%
Sibaté	Gachancipá	73	5	0,001%	0,001%
El Rosal	Madrid	70	9	0,001%	0,001%
Sopó	El Rosal	67	9	0,001%	0,001%
El Rosal	Gachancipá	60	6	0,001%	0,001%
Soacha	Bojacá	57	19	0,001%	0,001%
El Rosal	Funza	55	4	0,001%	0,001%
Madrid	Bojacá	54	11	0,001%	0,001%
Sibaté	La Calera	50	12	0,001%	0,001%
Cota	Cota	50	9	0,001%	0,001%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Facatativá	Sibaté	46	27	0,001%	0,001%
El Rosal	Chía	45	9	0,001%	0,001%
Sopó	Tabio	40	5	0,001%	0,001%
Sopó	Sopó	38	2	0,001%	0,001%
La Calera	Gachancipá	37	2	0,001%	0,001%
Tabio	Zipaquirá	36	8	0,001%	0,001%
El Rosal	Facatativá	34	4	0,001%	0,001%
Zipaquirá	Sibaté	33	9	0,001%	0,001%
Facatativá	Cajicá	32	56	0,001%	0,01%
Zipacón	Bogotá	30	9	0,001%	0,001%
Tabio	Gachancipá	28	4	0,001%	0,001%
El Rosal	Soacha	27	4	0,001%	0,001%
El Rosal	Tocancipá	26	3	0,001%	0,001%
Tabio	Tocancipá	26	4	0,001%	0,001%
Bojacá	Soacha	25	1	0,001%	0,001%
Facatativá	Bojacá	24	7	0,001%	0,001%
El Rosal	La Calera	23	2	0,001%	0,001%
Tabio	Cota	23	2	0,001%	0,001%
Sibaté	Tabio	23	3	0,001%	0,001%
El Rosal	Zipaquirá	20	5	0,001%	0,001%
Gachancipá	El Rosal	20	2	0,001%	0,001%
Tabio	Chía	19	3	0,001%	0,001%
Sibaté	El Rosal	17	15	0,001%	0,001%
Sopó	Sibaté	15	1	0,001%	0,001%
Mosquera	Zipacón	15	6	0,001%	0,001%
El Rosal	Sibaté	14	14	0,001%	0,001%
La Calera	Tabio	14	2	0,001%	0,001%
Facatativá	El Rosal	13	52	0,001%	0,01%
Chía	Tabio	10	3	0,001%	0,001%
Mosquera	Mosquera	9	1	0,001%	0,001%
Tabio	La Calera	9	2	0,001%	0,001%
Soacha	Zipacón	9	3	0,001%	0,001%
Tabio	Funza	8	1	0,001%	0,001%
Tabio	Sopó	8	1	0,001%	0,001%
Madrid	Zipacón	7	2	0,001%	0,001%
Gachancipá	Bojacá	7	2	0,001%	0,001%
Tabio	Mosquera	7	5	0,001%	0,001%
Tocancipá	Bojacá	6	2	0,001%	0,001%
Bojacá	Funza	6	1	0,001%	0,001%
Zipacón	El Rosal	6	1	0,001%	0,001%

Origen	Destino	Carga (Ton)	Viajes	% Ton	% Viajes
Facatativá	Tabio	5	1	0,001%	0,001%
Bojacá	Madrid	5	1	0,001%	0,001%
Gachancipá	Zipacón	5	1	0,001%	0,001%
Zipacón	Cota	5	1	0,001%	0,001%
El Rosal	Sopó	4	1	0,001%	0,001%
El Rosal	Tenjo	4	2	0,001%	0,001%
Tabio	Madrid	4	1	0,001%	0,001%
Tenjo	Zipacón	4	1	0,001%	0,001%
Gachancipá	Sibaté	3	1	0,001%	0,001%
Tabio	El Rosal	3	1	0,001%	0,001%
Cajicá	Bojacá	3	1	0,001%	0,001%
Tabio	Soacha	3	1	0,001%	0,001%
Tenjo	Tenjo	3	1	0,001%	0,001%
Bojacá	Facatativá	2	1	0,001%	0,001%
Facatativá	Zipacón	2	2	0,001%	0,001%
Zipacón	Facatativá	2	1	0,001%	0,001%
Tenjo	Bojacá	2	1	0,001%	0,001%
Bojacá	Cota	1	1	0,001%	0,001%
Tabio	Facatativá	1	1	0,001%	0,001%
Tabio	Cajicá	1	1	0,001%	0,001%
Madrid	Madrid	-	7	0,001%	0,001%
TOTAL		5.671.290	775.692	100%	100%

Fuente: Elaboración propia a partir de RNDC 2019

B. Anexo: Análisis de imágenes de corredores metropolitanos

Análisis de imágenes de los corredores metropolitanos de la Calle 80 y Calle 13, donde se identifican las características de cada uno y las variaciones de las expresiones de las externalidades del transporte de carga en la dinámica metropolitana a partir de los cuales se construyó la Figura 3-13, y se plantearon los análisis que permitieron particularizar la expresión de las externalidades del transporte de carga en un entorno metropolitano.

Anexo B: Análisis de corredores metropolitanos

Corredor de la Calle 80

Imagen	Descripción
1. Calle 80 con Carrera 68	Transporte de carga en el centro urbano de Bogotá coexiste en los corredores con el transporte de pasajeros (Intermunicipal, Transmilenio, SITP Provisional y zonal), el transporte privado, peatones y biciusuarios. Además de la infraestrutura aledaña y equipamentos que condicionan la operación del corredor.
2. Calle 80 con Boyacá	Dentro del centro urbano de Bogotá circulan camiones unitarios que hacen procesos de logística de última milla y distribución urbana de mercancías.
	En la medida en la que el corredor se acerca al limite urbano, empieza a aumentar la cantidad de camiones circulando y se evidencia un mayor número de camiones artículados.
3. Calle 80 Puente de Guadua	Una vez se sale del área urbana de Bogotá, disminuye el voumen de vehículos de otras tipologías diferentes a los camiones y se observa infraestructura de servicios asociados al mantenimiento de vehículos de carga.

 4. Cemex Siberia	Entre los limites de los municipios metropolitanos se ubican zonas industriales y logísticas, que generan/atraen viajes para el movimiento de mercancías.
 5. Parque la Florida	En la medida en la que se avanza en este corredor aumentan la cantidad y tipologías de camión, predominando los articulados. Adicionalmente, el flujo vehicular en estas zonas se encuentra afectado en su operación por el acceso a centros logísticos e industriales.
 6. Parque Industrial Celta	El corredor metropolitano llega a un punto en el que los vehículos circulan a flujo libre, al no pasar por centros urbanos, ni estar cerca a centros logísticos e industriales.

Corredor de la Calle 13

Imagen	Descripción
 1. Calle 13 con Carrera 34	Este corredor en particular presenta camiones unitarios y articulados desde el cento urbano de Bogotá.

 2. Calle 13 con carrera 45	En este corredor el flujo de camiones debe coexistir con el transporte público de pasajeros urbano (SITP provisional y zonal), intermunicipal, vehiculos privados y bicicletas.
 3. Centro Comercial multiplaza	A lo largo del corredor se encuentra la zona franca de Bogotá, un importante generador/atractor de viajes en camiones de las diferentes tipologías, además de contar con los centros de servicio asociados a esta operación.
 4. Río Bogotá	En la medida en la que se sale de Bogotá se encuentran diferentes parques industriales, plantas de producción, almacenamiento y demás actividades logísticas de diferentes empresas que generan/atraen viajes en camión.
 5. Parque Industrial San Carlos	La operación de los corredores metropolitanos se ve afectada por el acceso a centros logísticos, por el ingreso y salida de camiones.
 6. Variante Madrid	Los vehículos circulan a flujo libre en ciertos tramos del corredor. Una particularidad en el entorno metropolitano es que se han construido variantes para evitar el paso del transporte de carga por los cascos urbanos de los municipios metropolitanos.