



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE  
DETERMINAN LA ELECCIÓN DE  
TRANSPORTE MULTIMODAL DE  
MERCANCÍAS. APLICACIÓN AL CORREDOR  
FÉRREO TREN DEL CARARE**

**Edinson Antonio Torres Segura**

Universidad Nacional de Colombia  
Maestría en Ingeniería – Transporte, Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia

2023



# **ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE DETERMINAN LA ELECCIÓN DE TRANSPORTE MULTIMODAL DE MERCANCÍAS. APLICACIÓN AL CORREDOR FÉRREO TREN DEL CARARE**

**Edinson Antonio Torres Segura**

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:

**Magister en Ingeniería - Transporte**

Director:

Ingeniero Msc. Carlos Alberto Moncada

Línea de Investigación:

Transporte Intermodal

Universidad Nacional de Colombia

Maestría en Ingeniería – Transporte, Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2023



*“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”*

Aristóteles



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, reading "Edinson A. Torres J.", is written over a horizontal line.

Nombre

Fecha 25/04/2023

## **Agradecimientos**

A Dios, la Virgen María y el divino niño que me dieron fortaleza y permanecieron en mí para enseñarme a ser más fuerte y vencer todas mis dificultades, me cuidaron en cada paso que di en mi vida y me regalaron una familia maravillosa que me permitió cursar este camino con felicidad y me brindaron todo su apoyo 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 mi director Carlos Moncada, sin su orientación y guía no hubiese logrado un proceso de aprendizaje tan enriquecedor y resultados que reflejan su entusiasmo con el ejercicio de la profesión y su dedicación en cada sesión de trabajo.



## Resumen

### **Estudio de los factores que determinan la elección de transporte multimodal de mercancías. Aplicación al corredor férreo Tren del Carare**

La investigación desarrollada en este trabajo final de maestría presenta una aplicación técnica para la estimación de modelos de elección discreta a través del desarrollo de encuestas de Preferencias Declaradas que permitan, finalmente, la construcción de un modelo tipo logit (elección modal) para la estimación del potencial de captación de carga del proyecto Férreo Tren del Carare.

En Colombia los corredores logísticos y proyectos multimodales se evalúan y priorizan principalmente a través de modelos de transporte basados en el vehículo como variable de decisión y funciones de utilidad con parámetros típicos de costo y tiempo. Por lo cual, uno de los aportes más importantes de esta investigación es estimar un modelo de elección discreta con las variables que inciden en la decisión de un medio para el transporte de mercancías, las cuales fueron identificadas a través de acercamientos directos con representantes logísticos de empresas de la región Cundiboyacense y, en donde se determinaron como preponderantes – adicional al costo y tiempo - el número de transferencias multimodales, la confiabilidad del servicio de transporte<sup>1</sup>, frecuencia de envío de productos y propiedad de la flota de transporte (tercerizada o propia).

El estudio de caso estima una captación de carga para el proyecto Tren del Carare de entre 40 y 45% respecto a la carga potencial (carretera) la cual maximiza su viabilidad en

---

<sup>1</sup> Evaluado como el porcentaje de mercancías que llegan a tiempo según los itinerarios previamente pactados entre el generador y el transportador y, sin daños en la integridad de la carga transportada.

las operaciones de exportación e importación que permite la articulación con el Corredor Férreo del Atlántico.

**Palabras clave:** transporte multimodal; logística; modelación de transporte.

## Abstract

**Study of the factors that determine the choice of multimodal freight transport.  
Application to the railway corridor Tren del Carare**

The research developed in this final master's project presents a technical application for the estimation of discrete choice models through the development of Declared Preferences surveys that finally allow the construction of a logit-type model (modal choice) for the estimation of the freight capture potential of the Tren del Carare railway project.

In Colombia, logistics corridors and multimodal projects are evaluated and prioritized mainly through transport models based on the vehicle as a decision variable and utility functions with typical cost and time parameters. Therefore, one of the most important contributions of this research is to estimate a discrete choice model with the variables that affect the decision of a mode of transporting goods, which were identified through direct approaches with logistics representatives of companies in the Cundiboyacense region and, in addition to cost and time, the number of multimodal transfers, the reliability of the transport service<sup>2</sup>, frequency of product shipment and ownership of the transport fleet (outsourced or own) were determined as preponderant.

The case study estimates a load capture for the Tren del Carare project of between 40 and 45% with respect to the potential freight (road), which maximizes its viability in export and import operations that allow the articulation with the Railway Corridor of the Atlantic.

---

<sup>2</sup> Evaluated as the percentage of goods that arrive on time according to the itineraries previously agreed between the generator and the transporter and, without damage to the integrity of the transported good.

**Keywords:** multimodal transport; logistics; transportation modeling.

# Contenido

|   | Pág.         |
|---|--------------|
| <b>Resumen</b> .....  | <b>IX</b>    |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>XI</b>    |
| <b>Lista de figuras</b> .....   | <b>XVI</b>   |
| <b>Lista de tablas</b> .....  | <b>XVIII</b> |
| <b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....                                       | <b>XX</b>    |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>1</b>     |
| 1.1    Objetivos .....  | 5            |
| 1.1.1    Objetivo General.....  | 5            |
| 1.1.2    Objetivos Específicos.....   | 5            |
| 1.2    Pregunta de investigación .....  | 6            |
| 1.3    Hipótesis .....  | 6            |
| 1.4    Metodología .....  | 6            |
| 1.4.1    Benchmarking Nacional .....  | 6            |
| 1.4.2    Identificación de variables de decisión .....                              | 7            |
| 1.4.3    Desarrollo y calibración de un modelo de elección discreta .....           | 7            |
| 1.4.4    Estudio de caso .....  | 8            |
| <b>2. MARCO DE REFERENCIA</b> .....   | <b>10</b>    |
| 2.1    Análisis de la elección de modos para el transporte de carga .....           | 12           |
| 2.2    Modelación de la demanda .....   | 20           |
| 2.2.1    Modelos de elección discreta.....  | 21           |
| 2.2.1.1    Preferencias declaradas .....  | 28           |
| 2.2.2    Elasticidad en la captación de demanda .....                               | 31           |
| <b>3. PROPUESTA DE PROYECTO FÉRREO TREN DEL CARARE</b> .....                        | <b>37</b>    |
| 3.1    Plan Maestro de Transporte Intermodal PMTI .....                             | 37           |
| 3.2    Plan Maestro Ferroviario PMF .....   | 38           |
| 3.3    Plan Estratégico de Infraestructura Intermodal de Transporte PEIIT .....     | 40           |
| 3.4    Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare .....              | 41           |
| 3.5    Trazado adoptado para la investigación .....                                 | 43           |
| <b>4. CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE CARGA A NIVEL NACIONAL Y REGIONAL</b> ..... | <b>45</b>    |
| 4.1    Visión del país en materia de transporte intermodal y logística .....        | 45           |
| 4.2    Articulación con la red multimodal nacional .....                            | 47           |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 4.3       | Caracterización del movimiento de carga por carretera susceptible de utilizar el Tren del Carare .....          | 53         |
| <b>5.</b> | <b>IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FACTORES DE DECISIÓN .....</b>   | <b>60</b>  |
| 5.1       | Búsqueda de variables de elección basados en fuentes de información documental.....                             | 61         |
| 5.2       | Definición de variables preponderantes en la elección de los generadores de carga 70                            |            |
| 5.2.1     | Mesas de trabajo con empresarios generadores de carga .....   | 75         |
| 5.2.2     | Síntesis de los acercamientos .....   | 77         |
| 5.2.3     | Elección de las variables de decisión preponderantes en la elección de los generadores.....                     | 84         |
| <b>6.</b> | <b>FORMULACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL MODELO DE ELECCIÓN DISCRETA .....</b>   | <b>91</b>  |
| 6.1       | Definición de rangos en las variables de elección .....   | 92         |
| 6.2       | Prueba piloto.....  | 96         |
| 6.3       | Diseño de las encuestas de preferencias declaradas .....  | 99         |
| 6.4       | Estimación de los modelos de elección discreta .....  | 103        |
| <b>7.</b> | <b>DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DEL CORREDOR FÉRREO TREN DEL CARARE .....</b>                                    | <b>118</b> |
| 7.1       | Metodología de estimación .....   | 118        |
| 7.2       | Estimación de los valores de las variables de decisión .....  | 120        |
| 7.2.1     | Costo del transporte por carretera .....  | 121        |
| 7.2.2     | Costos de transporte por modo férreo .....  | 122        |
| 7.2.3     | Costo estimado para las maniobras de transferencia .....  | 126        |
| 7.2.4     | Tiempo estimado para maniobras de transferencia .....   | 128        |
| 7.2.5     | Variable confiabilidad y seguridad .....  | 129        |
| 7.2.6     | Variables adicionales de operación .....  | 131        |
| 7.3       | Escenario de evaluación – caso de estudio .....   | 133        |
| 7.4       | Resultados del modelo logit .....   | 136        |
| 7.5       | Análisis de sensibilidad .....  | 140        |
| 7.5.1     | Sensibilidad a la variable costo .....  | 140        |
| 7.5.2     | Sensibilidad a la variable tiempo .....   | 141        |
| 7.5.3     | Sensibilidad al modelo de elección.....   | 142        |
| 7.5.4     | Sensibilidad a la variable confiabilidad .....  | 143        |
| 7.5.5     | Sensibilidad a la variable número de transferencias .....   | 144        |
| 7.5.6     | Sensibilidad a las variables dummy: propiedad de la flota de transporte y frecuencia de envío de la carga ..... | 145        |
| 7.5.7     | Articulación con el proyecto Ferrocarril de Antioquia .....   | 147        |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>150</b> |
| 8.1       | Conclusiones .....  | 150        |
| 8.2       | Recomendaciones .....   | 157        |
| <b>A.</b> | <b>Anexo: Ficha de divulgación del proyecto de investigación .....</b>  | <b>159</b> |
| <b>B.</b> | <b>Anexo: Encuesta de caracterización empresarial y determinación de factores de elección modal .....</b>       | <b>163</b> |
| <b>C.</b> | <b>Anexo: Consolidado de costos férreos México y Brasil .....</b>   | <b>164</b> |

**Bibliografía ..... 167**

## Lista de figuras

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura 3-1:</b> Trazado Tren del Carare propuesto por el PMTI .....  | 38          |
| <b>Figura 3-2:</b> Trazado Tren del Carare propuesto por el PMF .....   | 40          |
| <b>Figura 3-3:</b> Trazado Tren del Carare propuesto por el PEIT .....  | 41          |
| <b>Figura 3-4:</b> Trazado Tren del Carare propuesto por la Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare .....                                   | 42          |
| <b>Figura 3-5:</b> Trazado Tren del Carare propuesto para la investigación .....  | 44          |
| <b>Figura 4-1:</b> Red Multimodal del norte del país (férreo y fluvial) .....   | 48          |
| <b>Figura 4-2:</b> Infraestructura de soporte en la red férrea y fluvial del norte país .....   | 50          |
| <b>Figura 4-3:</b> Volumen máximo de carga movilizado en las estaciones modales del país (2018 – 2021) 51   | 51          |
| <b>Figura 4-4:</b> Movimiento de carga en toneladas del país en el año 2021 .....   | 56          |
| <b>Figura 4-5:</b> Movimiento de carga en toneladas con origen o destino la región Cundiboyacense en el año 2021 (Líneas de deseo) .....                      | 57          |
| <b>Figura 5-1:</b> Mapeo de actores establecida para la etapa de caracterización de la operación logística actual y definición de variables de decisión. .... | 72          |
| <b>Figura 5-2:</b> Metodología de recopilación de información primaria .....  | 76          |
| <b>Figura 5-3:</b> Áreas de actividad de las empresas .....   | 78          |
| <b>Figura 5-4:</b> Clasificación de encuestados según segmentos de demanda.....   | 79          |
| <b>Figura 5-5:</b> Principales conexiones logísticas potenciales para el Tren del Carare... 80  | 80          |
| <b>Figura 5-6:</b> Costo percibido por los generadores para el transporte de sus productos 81   | 81          |
| <b>Figura 5-7:</b> Aspectos relevantes de la logística considerando el modo férreo.....   | 83          |
| <b>Figura 5-8:</b> Grupos de variables de elección .....  | 84          |
| <b>Figura 5-9:</b> Variables elegidas por los generadores de carga de la región Cundiboyacense (Best).....  | 86          |
| <b>Figura 5-10:</b> Variables elegidas con menor preponderancia por los generadores de carga de la región Cundiboyacense (Worst) .....                        | 89          |
| <b>Figura 6-1:</b> Resumen de metodología de trabajo encuesta PD.....   | 92          |
| <b>Figura 6-2:</b> Ejemplo de la tarjeta con las situaciones de elección – Prueba Piloto ....   | 97          |
| <b>Figura 6-3:</b> Programación en Ngene de las encuestas de Preferencias Declaradas 101  | 101         |
| <b>Figura 6-4:</b> Formato tarjetas de elección – Diseño 11 .....   | 102         |
| <b>Figura 6-5:</b> Metodología para la estimación de los valores del tiempo.....  | 106         |
| <b>Figura 6-6:</b> Interpretación de test estadísticos asociados .....  | 114         |
| <b>Figura 7-1:</b> Metodología general del modelo logit de probabilidad de captación.....   | 120         |



---

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>Figura 7-2:</b>  | Flete de transporte por carretera suministrado por generadores de carga<br>121 |
| <b>Figura 7-3:</b>  | Flete del transporte por carretera por segmento de demanda .....122            |
| <b>Figura 7-4:</b>  | Estimación de tarifas para el Tren del Carare .....126                         |
| <b>Figura 7-5:</b>  | Porcentaje de confiabilidad y seguridad por segmento de demanda ....130        |
| <b>Figura 7-6:</b>  | Trazado Tren del Carare propuesto para la investigación.....134                |
| <b>Figura 7-7:</b>  | Conceptualización del escenario de evaluación.....135                          |
| <b>Figura 7-8:</b>  | Relación de porcentaje de captación y longitud de viaje en modo férreo<br>138  |
| <b>Figura 7-9:</b>  | Participación de la captación de demanda por regiones del país.....139         |
| <b>Figura 7-10:</b> | Análisis de sensibilidad a la variable Costo.....141                           |
| <b>Figura 7-11:</b> | Análisis de sensibilidad a la variable tiempo .....142                         |
| <b>Figura 7-12:</b> | Análisis de sensibilidad a la variable Confiabilidad .....144                  |
| <b>Figura 7-13:</b> | Análisis de sensibilidad a la variable Número de Transferencias .....145       |
| <b>Figura 7-14:</b> | Análisis de sensibilidad a la variable propiedad de la flota.....146           |
| <b>Figura 7-15:</b> | Análisis de sensibilidad a la variable frecuencia de envío .....146            |
| <b>Figura 7-16:</b> | Red férrea para el escenario de sensibilidad con FDA .....148                  |

## Lista de tablas

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Tabla 2-1:</b> Resumen métodos existentes para la modelación del transporte de mercancías   | 17   |
| <b>Tabla 4-1:</b> Total de carga nacional por segmento de demanda.....   | 54   |
| <b>Tabla 4-2:</b> Lote promedio - relación toneladas/viaje.....  | 55   |
| <b>Tabla 4-3:</b> Total de la carga generada en la región Cundiboyacense por segmento de demanda   | 58   |
| <b>Tabla 5-1:</b> Consolidado de principales investigaciones documentales en torno a los factores de decisión en el transporte de carga..... | 63   |
| <b>Tabla 5-:</b> Factores de decisión modal para el transporte de carga – Revisión de literatura   | 69   |
| <b>Tabla 5-:</b> Confiabilidad del transporte por segmento de demanda .....  | 82   |
| <b>Tabla 5-:</b> Variables estudiadas en diferentes investigaciones .....  | 90   |
| <b>Tabla 6-1:</b> Rangos elegidos para la variable costo en los modelos PD.....  | 93   |
| <b>Tabla 6-2:</b> Rangos elegidos para la variable tiempo en los modelos PD.....   | 93   |
| <b>Tabla 6-3:</b> Rangos elegidos para la variable confiabilidad en los modelos PD.....  | 94   |
| <b>Tabla 6-4:</b> Rangos para la variable número de transferencias en los modelos PD.....  | 95   |
| <b>Tabla 6-5:</b> Resultados modelo de elección discreta – Modelo general sin segmentación   | 109  |
| <b>Tabla 6-6:</b> Resultados modelo de elección discreta – Modelo Misceláneos.....   | 111  |
| <b>Tabla 6-7:</b> Resultados modelo de elección discreta – Modelo Contenedores .....   | 112  |
| <b>Tabla 6-8:</b> Resultados modelo de elección discreta – Modelo Granel Sólido .....  | 113  |
| <b>Tabla 6-9:</b> Elección de funciones de utilidad para cada segmento de demanda - Principal  | 116  |
| <b>Tabla 6-10:</b> Elección de funciones de utilidad para cada segmento de demanda – Auxiliar  | 116  |
| <b>Tabla 7-1:</b> Valores de referencia costos de transferencia de Carga – CONTECAR ..   | 127  |
| <b>Tabla 7-2:</b> Valores de referencia costos de transferencia de Carga – SPB.....  | 127  |
| <b>Tabla 7-3:</b> Valores de las variables de selección para la evaluación del modelo Logit de carga   | 133  |
| <b>Tabla 7-4:</b> Captación de demanda para el proyecto férreo Tren del Carare.....  | 136  |
| <b>Tabla 7-5:</b> Captación de demanda para el proyecto férreo Tren del Carare – segmentación auxiliar .....                                 | 138  |



# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término                               | Unidad SI      | Definición |
|---------|---------------------------------------|----------------|------------|
| $t$     | Tiempo                                | Minutos, horas | 2.1        |
| $U$     | Utilidad                              | adimensional   | 2.2        |
| $C$     | Costo                                 | \$COP/ton      | 2.2        |
| $Tr$    | Número de Transferencias              | Unitario       | 2.2        |
| $D$     | Confiabilidad del servicio            | Unitario       | 2.2        |
| $P$     | Probabilidad de elección              | porcentaje     | 2.2        |
| $v$     | Utilidad determinística               | adimensional   | 2.2        |
| $e$     | Utilidad aleatorio o término de error | adimensional   | 2.2        |
| $Ep$    | Elasticidad precio demanda            | adimensional   | 2.2        |
| $Q$     | Demanda                               | Toneladas      | 2.2        |
| $F$     | Frecuencia de envío de productos      | 0, 1           | 6.4        |
| $P$     | Propiedad de la flota del generador   | 0, 1           | 6.4        |

## Símbolos con letras griegas

| Símbolo  | Término                  | Unidad SI    | Definición |
|----------|--------------------------|--------------|------------|
| $\alpha$ | Constante Modal          | adimensional | 6.4        |
| $\beta$  | Parámetro de la variable | adimensional | 6.4        |

## Subíndices

| Subíndice | Término                   |
|-----------|---------------------------|
| i         | Alternativa de transporte |

## Superíndices

| Superíndice | Término             |
|-------------|---------------------|
| n           | Exponente, potencia |

## Abreviaturas

| Abreviatura | Término  |
|-------------|--|
| ANDI        | Asociación Nacional de Empresarios de Colombia |

---

| <b>Abreviatura</b> | <b>Término</b>   |
|--------------------|--|
| ANI                | Agencia Nacional de Infraestructura                                |
| ANTT               | Agencia Nacional de Transporte Terrestre                           |
| ARTF               | Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario                       |
| CKD                | Kit para ensamblaje / autopartes                                   |
| CONTECAR           | Sociedad Portuaria Regional de Cartagena                           |
| DIAN               | Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales                        |
| DNP                | Departamento Nacional de Planeación                                |
| DORASAM            | Corredor férreo Dorada – Chiriguana – Santa Marta                  |
| FDA                | Ferrocarril de Antioquia   |
| FDN                | Fondo de Desarrollo Nacional                                       |
| OD                 | Origen - Destino   |
| PD                 | Preferencias Declaradas  |
| PEIIT              | Plan Estratégico de Infraestructura Intermodal de Transporte       |
| PMF                | Plan Maestro Ferroviario   |
| PMTI               | Plan Maestro de Transporte Intermodal                              |
| RNDC               | Registro Nacional de Despachos de Carga                            |
| SEPRO              | Sociedad, Economía, Productividad Universidad Nacional de Colombia |
| SIG                | Sistema de Información Geográfica                                  |
| SPB                | Sociedad Portuaria de Buenaventura                                 |
| VOT                | Valor Subjetivo del Tiempo   |
| VST                | Valor Subjetivo del Tiempo   |



# 1.INTRODUCCIÓN

De acuerdo con cifras del Ministerio de Transporte, para el año 2021 de las cerca de 334 millones de toneladas movilizadas en todo el país (incluyendo los 168 millones de toneladas de tráfico portuario), el 74% de la carga (nacional) se movilizó por modo carretero, seguido por el modo férreo con el 19% (31,9 millones de toneladas aproximadamente con una participación mayoritaria de la red férrea de FENOCO), y el restante 7% por modo aéreo y fluvial (RNDC, 2019). El desequilibrio entre los diferentes modos de transporte de carga del país sugiere la necesidad de promover medios alternativos de transporte para fortalecer la competitividad del país y permitir un adecuado desarrollo económico de las regiones.

La participación principal del modo carretero en el transporte de mercancías del país pone en evidencia la apuesta de la nación hacia este modo de transporte en las últimas décadas impulsando grandes proyectos estratégicos encabezados por las concesiones de 3G y 4G y, en la actualidad, la puesta en marcha de concesiones 5G cuya adjudicación y ejecución total se desarrollará a lo largo del país en el corto y mediano plazo. Consecuentemente, Colombia no cuenta con una red multimodal interna (Inland) debidamente integrada, sino que cuenta con fragmentos de corredores férreos y fluviales desarticulados de la red carretera que restringen la opción más eficiente y eficaz para el transporte de mercancías. En cuanto al sistema ferroviario del país, la red más utilizada corresponde a los 193 km de líneas férreas que son utilizadas por la Compañía Drummond para transportar el carbón de exportación desde las minas a cielo abierto (Mina Pribbenow y El Descanso) en el departamento del Cesar (sector de La Loma) hasta Puerto Drummond ubicado en el departamento del Magdalena y, los 153 km utilizados para el mismo fin y que unen la mina de carbón del Cerrejón hasta su respectivo puerto de embarque en Puerto Bolívar. Contemplando únicamente estos dos corredores férreos mencionados, es evidente el potencial del sistema ferroviario para el transporte de carga en la medida que, con cerca del 1.3% de longitud respecto a la red primaria de la nación (19.306 km) moviliza cerca del 17% de la mercancía, es decir, en un entorno minero y con las particularidades que este

denote, un kilómetro de vía férrea mueve en promedio más de 25 veces la carga movilizada por la red primara carretera en Colombia.

Evidenciada la competitividad del modo férreo y el rezago del país en corredores terrestres multimodales que potencien la eficiencia del transporte de mercancías, desde el año 2018 la nación viene adelantado importantes inversiones para la recuperación y reactivación de corredores logísticos de interés primario, no obstante, éste se vio altamente afectado por el estado de emergencia sanitaria declarado a nivel nacional entre los años 2020 y 2021. Estos corredores requieren de una planificación integral con miras a desarrollar un sistema de transporte más eficiente y competitivo que fomenten la multimodalidad en el país y permita la conectividad entre centros generadores y atractores de viajes de las diferentes regiones y departamentos y, un mejor acceso a los mercados internaciones a través de la conectividad con los puertos del país. En este sentido, la inversión de la nación requiere de una adecuada priorización de proyectos que mayor beneficio traiga para las regiones a través de herramientas de estimación de la demanda que permitan evaluar el transporte desde la perspectiva de los generadores de carga cuyo objetivo sea brindar mejores insumos para los tomadores de decisiones, consultores, entidades públicas e investigaciones.

En los últimos años, se han adelantado diferentes estudios que, a través de la construcción de modelos matemáticos, ponen en evidencia la competitividad y eficiencia de sistemas multimodales para el transporte interno de mercancías reduciendo costos y tiempos de viaje desde los principales centros económicos a los principales puertos del país, sin contar con beneficios adicionales como menor impacto ambiental, disminución de la accidentalidad en las vías (menos vehículos automotores en los ejes viales) y disminución de consumo de combustibles fósiles ( Márquez Díaz, 2011; Larranaga et al., 2017; Cantillo et al., 2018; Vega et al., 2019). En este sentido, en la literatura citada anteriormente los autores desarrollan un proceso metodológico estructurado que permite establecer las preferencias de los generadores de carga en un proceso de elección de un corredor logístico para el transporte de sus mercancías con base en las características propias de la red ofertada y las variables influyentes de cada modo de transporte en la cadena de carga del generador.



Los modelos de elección discreta como el caso del modelo logit postulan que la probabilidad de escoger una cierta opción de transporte es función de las características mismas del individuo (generadores) y de cuan atractiva resulta la alternativa en comparación con las características de las demás alternativas que tenga disponible (Ortuzar & Willumsen, 2011) como: modos de transporte, infraestructura de transporte, infraestructura logística, tiempos de desplazamiento, costos, etc. En este postulado, suponemos que un generador de carga (empresa) toma la decisión de elegir un medio de transporte (o conjunto de medios de transporte) teniendo en cuenta el impacto en su cadena logística y operaciones, en particular en el beneficio esperado por trasladar sus productos desde el lugar de origen hasta el destino final. En este supuesto, es requerido conocer las variables que hacen parte la función de utilidad que permita representar las decisiones de los generadores de carga y las características de cada medio de transporte disponible, tal como es evidenciado por diferentes investigadores que han estimado modelos de elección usando variables cuantitativas y cualitativas, citando a continuación algunos de los investigados.

- Pineda-Jaramillo, J. D. (2014). Railway and road discrete choice model for foreign trade freight. Case study: Medellín – Port of Cartagena corridor.
- Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A. (2017). Encouraging intermodality: A stated preference analysis of freight mode choice in Rio Grande do Sul.
- Rich, Holmblad y Hansen (2009). A weighted logit freight mode-choice model.
- Jiang, Johnson y Calzada (1999), Valuing Freight Transport Time using Transport Demand Modelling: A Bibliographical Review.

En consecuencia, la presente investigación pretende identificar, a través de mesas de trabajo y entrevistas con generadores de la carga, las variables más influyentes en la elección de un modo de transporte o corredor logístico para el transporte de carga en la región Cundiboyacense del territorio nacional. Una vez identificadas las variables más preponderantes en la elección del generador, se procederá a la determinación del potencial de captación de carga doméstica y de comercio exterior para el proyecto Tren del Carare basados en la aplicación de técnicas de preferencias declaradas, cuya finalidad es percibir las preferencias del encuestado acerca de cómo serían sus elecciones frente a situaciones hipotéticas, y el desarrollo de modelos de elección discreta que permitan, en primera medida, simular las preferencias del generador por medio de modelos matemáticos

estadísticamente confiables y, finalmente, determinar la probabilidad de utilización del corredor férreo en estudio.

Este documento se divide en ocho capítulos. El capítulo 2 desarrolla el análisis del marco de referencia de la modelación de la demanda de transporte delimitando los métodos nacionales e internacionales utilizados habitualmente para abordar la modelación del transporte de mercancías con las particularidades que se requieren para representar adecuadamente las necesidades de este segmento de análisis. El capítulo 3 se centra en consolidar, analizar y adoptar uno de los diferentes trazados que se han propuesto desde diferentes organizaciones (públicas y privadas) para el proyecto ferroviario Tren del Carare como estudio de caso de la presente investigación. En el capítulo 4 se realiza un diagnóstico del transporte de carga en el país y la Región Cundiboyacense que determine las principales cadenas logísticas potenciales de ser movilizadas por el proyecto ferroviario Tren del Carare en articulación con la visión del país hacia la generación de una red de transporte intermodal que impulse el desarrollo de las regiones y la competitividad entre modos de transporte.

El capítulo 5 está dedicado a la obtención de los factores más influyentes para un generador de carga al momento de elegir una alternativa de transporte para la movilización de sus mercancías e insumos lo cual se desarrolló a través de la aplicación de encuestas estructuradas a generadores de carga y actores claves en el transporte de mercancías de las empresas del territorio Cundiboyacense y el país. El capítulo 6 toma los factores o variables ponderados en el capítulo anterior y desarrolla, con la aplicación de encuestas de preferencias declaradas a representantes en material logística de empresas generadores de carga, modelos de elección discreta que permitirán la modelación de la demanda del proyecto ferroviario. Finalmente, el capítulo 7 desarrolla un proceso secuencial que permite estimar la demanda del proyecto ferroviario Tren del Carare a través de la caracterización de cada cadena logística en la situación sin (carretera) y con proyecto férreo y el análisis de estas cadenas en un modelo logit nutrido por los modelos de elección determinados.

El documento culmina con la presentación de las principales conclusiones de la presente investigación en las cuales se destaca la obtención integral (cualitativa y cuantitativa en modelos de elección discreta) de cuatro variables adicionales al costo y tiempo (seis en

total) que influyen en la elección de un modo de transporte por parte de los generadores y permiten la determinación de un potencial de captación más preciso en la modelación del transporte de mercancías: confiabilidad, porcentaje de flota propia del generador para la movilización de sus mercancías, frecuencia de envío de la carga y el número directo de transferencias requeridas en una cadena multimodal. Con la estimación de modelos de elección discreta que involucran las variables cuantificadas, se estimó el potencial de captación del Tren del Carare que alcanza las 7.8 millones de toneladas anuales con un análisis de sensibilidad que determina una variación en la captación de hasta el 50% ante cambios en la magnitud de las variables de elección.

## **1.1 Objetivos**

Se presentan a continuación los objetivos de la investigación:

### **1.1.1 Objetivo General**

La presente investigación busca determinar los factores que influyen la escogencia de una alternativa de transporte para las mercancías con aplicación práctica en la determinación del potencial de captación de carga del proyecto Tren del Carare.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Establecer las características del transporte de carga en la región Cundiboyacense y determinar, espacialmente, la demanda potencial susceptible de ser movilizada a través del proyecto férreo “Tren del Carare”.
- Identificar y caracterizar las alternativas multimodales para el transporte de carga que operan en el país como eje estructurante para la evaluación de competitividad entre modos de transporte.
- Identificar los factores más influyentes para un generador de carga en la elección de una alternativa de transporte que le permita movilizar su mercancía.
- Desarrollar un modelo de elección modal que permita simular las preferencias de los generadores de carga en la elección de una alternativa de transporte.
- Estimar, mediante un estudio de caso, el potencial de captación de demanda del proyecto férreo “Tren del Carare” a través de la aplicación práctica del modelo de elección estimado.

## 1.2 Pregunta de investigación

- ¿Cuáles son las variables que influyen en los generadores de carga al momento de elegir una alternativa de transporte para la movilización de mercancías tipo misceláneo y carbón al interior del territorio nacional con potencial de utilizar el proyecto tren del carare en su cadena logística?
- ¿Existe un potencial de captación de carga para el proyecto férreo Tren del Carare como solución al transporte multimodal de mercancías de la región Cundiboyacense y su conexión con los puertos del Caribe Colombiano?

## 1.3 Hipótesis

La elección de una alternativa para el transporte de carga involucra variables adicionales al tiempo y el costo propias de las necesidades particulares de cada generador de la carga y segmento de demanda como frecuencia de envío, confiabilidad en las entregas, flexibilidad, sensibilidad a las transferencias, entre otras. Estas variables complementarias contribuyen en la estimación de la competitividad de proyectos multimodales de interés para el país como medida de su potencial de captación de demanda.

## 1.4 Metodología

La metodología establecida en esta investigación será de tipo descriptivo con un enfoque mixto (cualitativa y cuantitativa). A grandes rasgos, las principales etapas a seguir en investigaciones de este tipo son: examinar las características del tema a investigar, definirlo y formular hipótesis, seleccionar la técnica para la recolección de datos y las fuentes a consultar, analizar los datos recolectados y generar resultados. De acuerdo con eso, se presenta la estructura del proceso de investigación de acuerdo con las principales actividades a desarrollar.

### 1.4.1 Benchmarking Nacional

Se caracterizará el comportamiento de la distribución modal entre los diferentes medios de transporte que operan en el país, realizando especial énfasis en la identificación de los corredores multimodales que operan en el territorio nacional.

- Se caracteriza el transporte de carga a nivel nacional que permita la delimitación y consolidación de las fuentes de información disponibles en el territorio nacional.

- La caracterización nacional comprende el conocimiento de los principales polos generadores y atractores de carga en el territorio nacional al igual que las tipologías de carga y participación de cada modo en el transporte de mercancías del país, permitiendo una transición adecuada entre el conocimiento del movimiento de carga nacional y el específico de la región Cundiboyacense que será el directamente beneficiado por el proyecto Tren del Carare.
- Identificación y caracterización de corredores logísticos del país realizando especial énfasis en los posibles corredores multimodales para el transporte de mercancías que sean competencia para el transporte de mercancías por medio del proyecto Tren del Carare.

### **1.4.2 Identificación de variables de decisión**

Indagar las características operativas actuales de las empresas generadoras de carga en la región Cundiboyacense que permita caracterizar la percepción del transporte multimodal, sus principales parámetros operativos y las variables más influyentes (cuantitativas o latentes) en la elección de una alternativa de transporte.

- Identificación de una base de datos de empresas generadoras de carga (misceláneos y Carbón) en el departamento de Boyacá y Cundinamarca y principales actores del sector transportador que permita un primer acercamiento a los tomadores de decisiones y difusión de la investigación.
- Realización de grupos focales y mesas de trabajo con empresas generadoras de carga que permita el diagnóstico de su operación y la definición de las principales variables que influyen en su escogencia de una alternativa de transporte para sus productos e insumos.
- De las variables que resulten preponderantes en la influencia de elección de los generadores, se realizará una evaluación detallada que permita determinar su viabilidad de estimación en un modelo de transporte y respecto a la información disponible (Etapa 1) y las ventajas competitivas de éstas en el modo carretero y ferroviario.

### **1.4.3 Desarrollo y calibración de un modelo de elección discreta**

La calibración de las variables de decisión se desarrollará bajo un proceso de diseño, aplicación y análisis de técnicas de preferencias declaradas que nos permitan determinar

los modelos de elección discreta que simulen, con mejor grado de precisión, las decisiones de los generadores al momento de elegir entre un conjunto de alternativas para el transporte de sus mercancías.

- Diseño del experimento de encuestas de preferencias declaradas por medio de software Ngene, donde se construyen escenarios hipotéticos de elección en el cual el encuestado (representante de la empresa en materia logística) elige entre una alternativa para el transporte de sus productos por modo carretero y una alternativa a través de un sistema multimodal involucrando, en todo momento, las variables identificadas en el grupo focal.
- Las alternativas a ser presentadas estarán diseñadas de la forma precisa con base en la caracterización realizada a la empresa en el primer acercamiento a razón que éstas hagan sentido con su logística, operación y costos actuales.
- Aplicación del diseño de preferencias declaradas a generadores de carga por medio de visita directa a sus instalaciones o por medio de encuestas digitales que puedan ser diligenciadas de forma controlada por medios electrónicos.
- Depurar y procesar las respuestas de los generadores de carga con el objetivo que puedan ser analizadas por medio de paquetes estadísticos como Panda Biogeme para la generación y calibración de modelos de elección discreta (logit Multinomial).

#### **1.4.4 Estudio de caso**

La determinación del potencial de captación de demanda para el proyecto férreo Tren del Carare se realizará como un proceso secuencial de actividades que inició en el primer paso con la caracterización de la carga de la región Cundiboyacense y la estimación de los modelos de elección discreta que permita simular las elecciones de los generadores de carga en materia de transporte.

- Determinación de los flujos de carga potenciales para el proyecto férreo Tren del Carare basados en los flujos de carga que originados o atraídos por la región Cundiboyacense pueden incorporar el proyecto en su cadena de viaje de forma natural.
- Construcción de una matriz de carga potencial que permita la caracterización operacional de cada par origen destino y la valoración de cada variable de elección en la situación actual de transporte.

- Caracterización de la(s) alternativa(s) multimodal(es) que permitiría a cada par origen destino en la matriz de carga potencial complementar su cadena de viaje a través del proyecto ferroviario.
- Desarrollo y aplicación de un modelo logit para determinar el potencial de captación de demanda de carga del proyecto Tren del Carare.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

Como se ha mencionado a lo largo de la historia, Colombia tiene un lugar privilegiado geográficamente por ser el único país en América del Sur con puertos tanto en el mar Caribe como en el mar Pacífico y así, una amplia posibilidad de rutas marítimas para el comercio internacional. A pesar de esta posición privilegiada, se han estudiado y evaluado diferentes factores que disminuyen la eficiencia del transporte de mercancías al interior del país y que finalmente restan competitividad en la movilización de la carga y la conexión de los principales centros económicos con los puertos y destinos internacionales. Algunas de estas dificultades, que se pueden encontrar en la literatura, corresponde a las altas tarifas de transporte terrestre basados principalmente en el modo carretero, la limitada red ferroviaria y fluvial operativa del país, las condiciones topográficas que incrementan los costos de las soluciones de infraestructura para la movilidad de personas y de mercancías y, las restricciones ambientales para la protección de flora, fauna y comunidades étnicas a lo largo del territorio nacional (Banco Interamericano de Desarrollo; Jorge Kohon; Jorge Champin; Manuel Rodríguez; René Cortés, 2016; Financiera de Desarrollo Nacional, 2018; Vega et al., 2019). El Foro Económico Mundial (WEF por sus siglas en inglés) mide la competitividad de un país a través de diferentes factores o pilares (12 pilares en total) que impulsan la productividad, el desarrollo económico de sus ciudadanos y el desarrollo sostenible e innovador. Colombia para el año 2019 obtuvo el puesto 57 entre 141 economías, aumentando 3 posiciones frente al año anterior (posición 60 entre 140 el año pasado). En específico, el pilar que valora la competitividad del país en términos de infraestructura obtuvo el puesto 81 de las 141 economías evaluados, siendo las principales dificultades la conectividad de las carretas (97°), Calidad de la infraestructura (104°), densidad de corredores férreos (89°) y eficiencia del servicio de trenes (99°) denotando la deficiencia de la red logística del país (Foro Económico Mundial, 2019).

Identificada esta área de oportunidad de crecimiento para el país, desde el año 2018 se vienen adelantado importantes avances en la reactivación de los principales ejes



---

ferroviarios y fluviales que conecten el centro del país con la costa caribe a través, principalmente, de la red férrea central entre La Dorada y Chiriguana. Esta conexión se consolida al interior del territorio nacional como una apuesta para potencializar el comercio exterior del país y principalmente de Bogotá D.C

El Plan Maestro Ferroviario 2020, reconoce la importancia de desarrollar políticas que promuevan la intermodalidad e implementar una red de transporte estratégica que permita la reducción de costos de transporte, promover la sostenibilidad a través de modos de transporte que sean más amigables con el medio ambiente y diversificar los materiales transportados por modo ferroviario.

Complementariamente, la nación ha priorizado cada uno de estos corredores férreos de importancia para la nación por medio del Fondo de Desarrollo Nacional (FDN) y un estudio desarrollado para determinar el potencial de captación de demanda de carga en cada corredor. La metodología utilizada por este estudio, partió de la construcción de matrices origen destino con base en registros del Ministerio de Transporte que alberga los manifiestos de carga de los principales movimientos de mercancías realizados en el país; el diseño conceptual de cada uno de los corredores con el fin de evaluar un esquema de operación integrado física, operacional y tarifariamente entre modos y, finalmente la determinación de la demanda captada a través de la aplicación de filtros “blandos” y “duros” directamente sobre las alternativas de transporte: alternativa actual (por modo carretero) y alternativa con sistema férreo.

Si bien, la metodología adelantada en dicho estudio es conceptualmente válida y presenta un análisis muy importante en la determinación y evaluación de diferentes variables cuantitativas y cualitativas (variables latentes) que hacen parte de la elección real de los generadores al momento de evaluar las alternativas para la movilización de sus productos e insumos, es realmente importante desarrollar herramientas cada vez más precisas que permitan estimar la demanda a ser movilizada por un nuevo proyecto multimodal y tomar las mejores decisiones en los proyectos de inversión.

Una herramienta más robusta para la estimación de la demanda de proyectos futuros corresponde a modelos de elección tipo logit que enuncian como premisa la elección de una alternativa de acuerdo a las características de la misma y de lo atractiva que esta

resulte frente a las demás posibilidades. Lo atractivo de las diferentes alternativas se presenta como la utilidad de su elección, esta función de utilidad incorpora las diferentes características o variables de la alternativa que el individuo desea maximizar o minimizar dependiendo de la manera en cómo lo afecten. Estos modelos tienen amplio reconocimiento y uso en el área de transporte, particularmente cuando se desea estimar cambios modales.

Los atributos que se incorporan en los modelos de elección como variables de decisión, generalmente están acompañados de coeficientes que representan la influencia o el peso relativo del atributo. Los modelos de elección consideran la existencia de por lo menos dos alternativas, que tienen diferente posibilidad de ser escogidas, en el contexto anterior es necesario transformar la utilidad de las diferentes alternativas en un valor de probabilidad. Para la transformación de la utilidad que representa una alternativa en la probabilidad de su elección, se deben considerar las características de las demás alternativas que conforman el conjunto de elección.

Finalmente, los modelos desagregados se calibran partiendo de la observación de la conducta de los individuos cuando se tiene conocimiento de las alternativas. Este proceso de calibración se realiza a través de la aplicación de encuestas de preferencias declaradas que permiten observar y posteriormente, calibrar la conducta del individuo por medio de funciones de utilidad que representen, tanto las variables más importantes en la elección de modo por parte de los generadores y el peso específico de dichas variables en la función de utilidad a ser maximizada.

## **2.1 Análisis de la elección de modos para el transporte de carga**

El análisis probabilístico para la elección de una alternativa de transporte sobre un grupo de alternativas posibles (reales o hipotéticas) basados en modelos tipo logit, permiten relacionar diferentes variables cuantitativas y/o cualitativas con el objetivo último de representar el comportamiento de los individuos (en este caso generadores de carga) ante la posibilidad de elegir la alternativa que mejor satisfaga sus necesidades de transporte dadas las características propias de la oferta de cada alternativa (modos de transporte, infraestructura de transporte, infraestructura logística, tiempos de desplazamiento, costos,

etc.) y la forma en que el individuo pondere cada una de esas características. El uso de estas técnicas puede aportar herramientas importantes para la estimación de la demanda en proyectos logísticos de interés futuro para el país y enfocar los recursos escasos en los que mayor beneficio traigan para la competitividad del transporte de mercancías.

Los estudios e investigaciones desarrolladas en el país que permitan determinar las variables más influyentes en la elección de una cadena logística para el transporte de mercancías son escasos en el contexto colombiano y, las existentes, se han desarrollado bajo diferentes enfoques como la elección de puerto para la carga de comercio exterior, modelos de transporte multimodal utilizando costos externos marginales y la evaluación de viabilidad de proyectos carreteros con parámetros de costo y tiempo de viaje (Cantillo et al., 2018; Torres, 2017; Vega et al., 2019).

Un estudio académico que busca la determinación de variables adicionales al costo y tiempo en la elección de alternativas de transporte de carga en el territorio nacional corresponde al trabajo de tesis para optar por el título de maestría de Juan Diego Pineda en el año 2014 en la Universidad Nacional de Colombia y cuyo objetivo principal consistió en la determinación de las variables influyentes en la elección de modo en el transporte de carga en el departamento de Antioquia y la determinación del potencial de carga sobre el corredor Medellín – Puerto Cartagena (Pineda Jaramillo, J. D., 2014). En este estudio, por medio de un grupo focal en el cual participaron representantes de 4 empresas que generan/reciben carga de comercio exterior, se identificaron y calibraron (por medio de modelos de elección discreta y aplicación de encuestas de preferencias declaradas) las variables costo y frecuencia de envío como las más influyentes en la elección. De allí, las áreas de oportunidad para la presente investigación corresponden a identificar y evaluar otras variables que influyan en la elección de una alternativa para el transporte de mercancías como la confiabilidad en la entrega, el número de maniobras de transferencia en un sistema multimodal, la protección de la carga frente a daños y, como variable típica, el tiempo de viaje que permita estimar un Valor Subjetivo del Tiempo (VST) en corredores que permitan la complementariedad del transporte de carga por medio de sistemas ferroviarios en Colombia. Otros estudios adelantados en el caso colombiano corresponden a:

- Vega, L., Cantillo, V., & Arellana, J. (2019). *Assessing the impact of major infrastructure projects on port choice decision: The Colombian case*. En esta investigación se realiza una evaluación de variables en modelos de elección que juegan un papel clave en los procesos de selección de puerto para las cadenas logísticas de comercio exterior de Colombia. Allí, se establece que “(...) grandes proyectos de infraestructura influyen en la elección del puerto a través principalmente de su impacto en los costos percibidos (...)”. Estos proyectos no solo hacen alusión a proyectos portuarios, sino que de igual forma son equiparables a proyectos que mejoren las condiciones del transporte interno del país y brinden competitividad en las conexiones con las salidas internacionales.
- Cantillo, J., Cantillo, V., & Arellana, J. (2018). *Modelling with joint choice of ports and countries of origin and destination: application to Colombian ports*. El estudio propone la hipótesis que la elección de puerto depende del país de origen/destino de la carga y de las características de toda la cadena logística de la carga. Los resultados del estudio sugieren que “(...) para las importaciones y exportaciones, la tasa de flete nacional es la variable más importante para el proceso de elección conjunta.”. Esta conclusión representa una oportunidad de la presente investigación para determinar el potencial de captación de un nuevo corredor multimodal con reducción de costos en el transporte de mercancías.
- Cabas Torres, E.P. (2017), Universidad de la Costa. *Disposición a pagar por ahorros en el tiempo de viaje del transporte de carga en Medellín*. El estudio determino la disposición a pagar por reducir el tiempo de viaje en el transporte de mercancías en el contexto local de Medellín, no obstante, evaluó únicamente las dos variables típicas de tiempo y costo en la elección de la alternativa de transporte.
- Márquez Díaz, L. (2011). *Estimación de costos externos marginales de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario en Colombia*. La investigación propone una modelación alterna para la red de transporte de Colombia incorporando los costos de externalidades que se generan por diferentes modos de transporte y la estimación empírica de las variables de elección.

Se puede observar que existen investigaciones y desarrollos académicos con diferentes metodologías para determinar beneficios en la utilización de sistemas multimodales y la elección de alternativas para el transporte de mercancías, sin embargo, no hay evidencias claras, de estudios que logren articular la determinación de un Valor Subjetivo del Tiempo

de viaje para el transporte de mercancías y la evaluación conjunta de variables influyentes en la elección de los generadores de carga, más aún en la región cundiboyacense cuya participación en la economía del país es importante<sup>3</sup>.

En otros países el marco conceptual es mucho más rico en investigaciones para la estimación de modelos de elección usando variables cuantitativas y cualitativas, citando a continuación algunos de los investigados.

- Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A. (2017). *Encouraging intermodality: A stated preference analysis of freight mode choice in Rio Grande do Sul*. La investigación se desarrolló sobre la necesidad de identificar las preferencias de los gerentes de logística y evaluar las decisiones de elección de diferentes alternativas de transporte de carga con atributos de costo, tiempo y confiabilidad del sistema.
- Rich, Holmblad y Hansen (2009). *A weighted logit freight mode-choice model*. El documento desarrolla un modelo de elección discreta ponderado para analizar la elección de modo en la región de Oresund, Dinamarca. El documento presenta las elasticidades de la demanda con respecto al costo monetario y el tiempo de viaje, así como estimaciones del valor del tiempo para cinco modos y trece grupos de productos básicos.
- Jiang, Johnson y Calzada (1999), *Valuing Freight Transport Time using Transport Demand Modelling: A Bibliographical Review*. La investigación realiza una revisión importante de bibliografía en la cual identifican aspectos críticos a la hora de modelar la demanda del transporte de mercancías y la incorporación de variables de elección como accesibilidad, distancia, oferta de instalaciones multimodales y embalaje de la mercancía.

El marco conceptual analizado hasta el momento permite identificar diferentes atributos, métodos y prácticas utilizadas en la modelación transporte de carga con visiones interdisciplinarias de académicos, estudiantes y consultores en diferentes periodos de tiempo.

---

<sup>3</sup> Según cifras de la Cámara de Comercio de Bogotá, Bogotá representa el 25.6% del PIB de Colombia que, junto con Cundinamarca y Boyacá representa el 34.5% del PIB Nacional.

Finalmente, en el documento *Freight Travel Demand Modeling: Synthesis of Approaches and Development of a Framework* (Pendyala, R. M., Shankar, V. N., & McCullough, R. G., 2000), los autores realizan una recopilación de las metodologías más utilizadas en los Estados Unidos para la modelación y planificación del transporte de mercancías.

Se distinguen tres macro metodologías para el análisis de la demanda de carga que se han desarrollado a lo largo del territorio Americano: i) La primera corresponde al pronóstico de los flujos de mercancías con base en el comportamiento histórico de la participación de los diferentes modos en el transporte de mercancías y la utilización de los mismos por los centros de producción; ii) la segunda macro metodología se centra en el desarrollo de modelos de división modal tipo logit que permita determinar el comportamiento de elección de una cadena logística basados en atributos del modo de transporte, la red de infraestructura, el generador y/o la carga; iii) la tercer y última macro metodología implementa por completo las estructura del modelo clásico de transporte de cuatro etapas y, adicionalmente, afecta el tránsito de la carga por modo carretero con la congestión medida en las zonas urbanas y metropolitanas.

**Tabla 2-1:** Resumen métodos existentes para la modelación del transporte de mercancías

| METODOLOGÍA  | SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA  | VENTAJAS  | DESVENTAJAS   |
|--|---|---|---|
| Análisis de flujos de productos                                    | Se desarrolla un modelo de generación y atracción con base en información primaria de flujos de mercancías y, un modelo de gravedad para distribuir los viajes en las zonas de análisis.  | Utiliza la metodología tradicional de un modelo de transporte de 4 etapas; permite evaluar desarrollos industriales, comerciales y residenciales futuros.                       | Requiere información primaria robusta del movimiento de mercancías en la zona de estudio. Requiere de información previa de operación multimodal.   |
| Método de proyección de tendencias                                 | Desagrega los flujos de productos básicos en los modos carretera y ferrocarril, estima las tendencias y proyecta los flujos futuros.  | Permite una estimación acertada en las cadenas logísticas del estado y los cambios modales generados por nuevas infraestructuras logísticas o modificaciones en las existentes. | Requiere información primaria robusta del movimiento de mercancías en la zona de estudio. Requiere de información previa de operación multimodal.   |
| Modelo clásico de 4 Etapas<br>Estado de Florida,<br>Estados Unidos | Aplicación de un modelo de generación y atracción de viajes basado en factores de crecimiento de consumo por zonas y distribución en modos competitivos a través de modelos de división modal.  | Utiliza la metodología tradicional de un modelo de transporte de 4 etapas; permite evaluar desarrollos industriales, comerciales y residenciales futuros.                       | Necesidad de datos desglosados por modo, tipo de carga y funciones de división modal robustas.  |
| Análisis de tendencias y series de tiempo                          | Extrapolación longitudinal de tendencias históricas pasadas en la actividad del transporte de mercancías.   | Métodos simples de aplicar basados en las tendencias históricas del transporte en la zona de estudio (ciudad, región país).   | Requieren información desagregada de la distribución de mercancías en modos de transporte. De igual forma requieren de una operación multimodal consolidada y no incorporan explícitamente variables importantes. |
| Métodos de Elasticidad   | Por medio del análisis en las tendencias del transporte de carga y/o observaciones en tiempo real de cambios en la demanda que ocurren por cambio en factores de oferta, se estiman medidas de elasticidad en las variables observadas. | Útiles para evaluar conceptualmente las variaciones en la demanda y oferta de un modo u otro ante ajustes en variables estratégicas.  | No permiten, de una forma directa, tener en cuenta múltiples variables de forma simultánea. El alcance del método tiene una limitación en análisis de redes integrales y complejas.                               |

| METODOLOGÍA  | SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA  | VENTAJAS  | DESVENTAJAS  |
|--|---|---|--|
| Modelos de red logística   | Modela el comportamiento del productor y transportista, capturando así las relaciones de oferta y demanda que impulsan los movimientos de carga. Los productores y transportistas intentan encontrar rutas de costo mínimo en una red donde el "costo" es una combinación de precio, tiempo y uso de energía. | Permite determinar la competitividad de un corredor logístico unimodal o multimodal sobre una red de transporte determinada basados en atributos típicos y directos del corredor y el (los) modos(s) de transporte que involucra.   | Requiere de una caracterización detallada de la red de transporte que se requiere analizar, para determinar adecuadamente las distancias y tiempos de transporte entre pares origen destino al igual que los procesos logísticos que se deben desarrollar en nodos de transferencia modal.                                     |
| Modelo de equilibrio de la red de carga (FNEM)                   | Modela las decisiones para una red de carga intermodal con funciones de demora y costos variables de acuerdo con la congestión de la red.   | Permite tener en cuenta la congestión de las redes urbanas y la interacción con otros modos de transporte para determinar los flujos de carga en áreas metropolitanas.  | Si no se combina con otras variables de elección (diferentes al tiempo) no permiten la evaluación de redes multimodales o regionales sino se centra en la distribución urbana o de última milla  |
| Modelo de equilibrio de precios espaciales (SPEM)                | Se centra en las interacciones productor-consumidor-transportador. Los costos de transporte se expresan como valores fijos o como funciones de los flujos de red definiendo una función de oferta y demanda para cada zona de estudio.  | Incluye variables que afectan a todos los actores de la cadena logística y permite la evaluación comparativa de varias alternativas de transporte unimodal y multimodal.  | Requiere la construcción y caracterización de una red de transporte suficientemente detallada para comparar las alternativas de transporte entre un origen y destino de la carga. Requiere la determinación y calibración de funciones de decisión.  |
| Modelo de equilibrio de precios espaciales generalizados (GSPEM) | Combina los conceptos de FNEM y SPEM para predecir simultáneamente la producción y consumo de un bien, las alternativas disponibles de transporte, los costos de cada alternativa y el costo asociado a la congestión.  | Incluye variables que afectan a todos los actores de la cadena logística y permite la evaluación comparativa de varias alternativas de transporte unimodal y multimodal teniendo en cuenta adicionalmente la congestión en la distribución de última milla en los camiones. | Requiere la construcción y caracterización de una red de transporte suficientemente detallada para comparar las alternativas de transporte entre un origen y destino de la carga. Requiere la determinación y calibración de funciones de decisión y una red detallada en las zonas metropolitanas para simular la congestión. |



| METODOLOGÍA                                    | SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA  | VENTAJAS   | DESVENTAJAS   |
|--|---|--|---|
| Modelos de demanda agregada                    | Estiman flujos de volúmenes de carga sin desagregar en el número particular de viajes individuales en las unidades transportadoras, tipología de carga o generador de la misma. Puede utilizar metodologías basadas en regresiones, ecuaciones simultáneas o modelos de división modal básicos. | Permite estimar demanda de corredores logísticos por modos de transporte basados en la experiencia de una región y estimar divisiones modales globales de forma ágil.    | Requiere de una operación multimodal consolidada que permita un conocimiento de la distribución modal en la zona de estudio; de igual forma, requiere datos globales de flujos en la red o matrices origen destino de carga.                  |
| Modelos desagregados                           | Se centran en el comportamiento de elección de modo y la estimación de modelos de división modal (logit) basados en características explicativas importantes que afectan la toma de decisiones sobre el transporte, como los atributos del modo, la red, la carga, la empresa y el generador.   | Permite modelar decisiones más acertadas respecto a las variables que determinan la elección de un modo o corredor por parte de los involucrados en la cadena logística. | La dificultad con la implementación de modelos desagregados es la adquisición de datos adecuados. Se deben hacer varias aproximaciones para estimar los costos y tiempos logísticos totales y su papel en el comportamiento de elección modal |
| Modelos desagregados:<br>Enfoque de inventario | Integra la elección de modo y las decisiones de producción tomadas por una empresa. En este enfoque las variables relacionadas con la producción, como el tamaño del envío y la frecuencia de los envíos, se tratan como decisiones endógenas junto con la elección del modo.                   |  |   |

Fuente: Elaboración propia basado en Pendyala, R. M., Shankar, V. N., & McCullough, R. G., 2000

Sobre los modelos de transporte presentados anteriormente se desarrollan diferentes fundamentos teóricos con los cuales se desarrollará la presente investigación los cuales se abordarán a continuación iniciando por un elemento transversal que define el concepto más amplio de la investigación y corresponde a la modelación de la demanda.

## 2.2 Modelación de la demanda

Según Ortúzar y Román (2003) el problema de modelar la demanda de transporte se fue resolviendo progresivamente en forma más satisfactoria a través de las cuatro últimas décadas, hasta establecer una metodología a la que generalmente se reconoce como enfoque clásico. Según los autores esta metodología considera el problema del transporte como un proceso secuencial en que interactúan diferentes submodelos: generación-atracción de viajes, distribución, reparto modal y asignación de tráfico a la red (últimamente se ha añadido, al menos en concepto, la elección de la hora del viaje). Estas herramientas de la modelación de la demanda involucran diferentes variables que representan el comportamiento agregado de un conjunto de individuos o segmentos de demanda y, permite la estimación de variables tipo continuo como, para nuestro caso de investigación, el número de viajes que se producen entre dos zonas (regiones) y la distribución modal de estos.

Ante la necesidad de superar las deficiencias del enfoque clásico de modelación como la poca flexibilidad, escasa precisión, elevado costo y a su débil orientación a la toma de decisiones políticas (Ortúzar & Willumsen, 1994), en las últimas décadas se han desarrollado grandes avances en el enfoque de una modelación a nivel desagregado (segunda generación) los cuales definen el problema de la modelación de la demanda como el resultado de una serie de decisiones que toma un individuo (y no un conjunto de estos) dadas las alternativas que disponga para realizar su viaje y las restricciones o limitaciones que este tenga (costo, tiempo, accesibilidad, etc). Finalmente, el individuo optara por la alternativa que maximice su utilidad particular.

Los modelos de este tipo son denominados por Domencich y McFadden (1975) "*modelos de comportamiento*", los cuales buscan modelar la demanda del transporte representando de una forma particular las decisiones y/o características de cada individuo de la red o zona de análisis lo cual brinda mayor precisión en los resultados a ser obtenidos.

## 2.2.1 Modelos de elección discreta

Los modelos de elección discreta han sido usados en el área de la modelación del transporte, con el fin de representar el comportamiento de un individuo o empresa que realiza una elección dentro de un conjunto de alternativas (por ejemplo autobús, metro, taxi o coche o en el caso del transporte de carga como es el objeto de la presente investigación por modo carretero, férreo, fluvial, aéreo y/o marítimo) para efectuar un desplazamiento/entrega. La práctica común, principalmente en el contexto urbano, que permite representar este comportamiento es analizar conjuntamente variables tanto del individuo (sexo, edad, estrato, disponibilidad de automóvil, etc.) como de los modos de transporte disponibles (tiempo de viaje, costo, tiempo de espera, etc.) y estimar el modelo matemático que permita representar de mejor manera la relación entre ambos componentes (individuos o demanda y modos de transporte u oferta).

Para lograr representar matemáticamente esta relación demanda-oferta se utiliza el enfoque habitual de la maximización de la utilidad aleatoria el cual postula que un individuo siempre escogerá la alternativa que le brinde la mayor utilidad.

Los modelos de elección discreta como el caso del modelo logit desarrollado para la estimación de la captación de la demanda del proyecto férreo, postulan, en concordancia con el enfoque de maximización de la utilidad, que la probabilidad de escoger cierta opción de transporte es función de las características mismas del individuo y de cuan atractiva resulta la alternativa en comparación con las demás alternativas que tenga disponible (Ortuzar & Willumsen, 2011).

La estimación de los modelos de elecciones discretas, usualmente se realiza con base en la Teoría de Utilidad Aleatoria, que establece los siguientes supuestos expuestos adecuadamente por autores como Ortuzar & Willumsen (2011), Moreno Quintero (2011), Williams & Ortuzar (1982), Williams & Senior (1977) y McFadden & Domencich (1975), así:

Existe un conjunto de alternativas disponibles: "A", tal que  $A = \{A_1, A_2, A_j, A_N\}$ , y una población homogénea, racional "Q", que posee información perfecta acerca de las alternativas "A" y se establece un grupo de vectores de atributos de las alternativas y los individuos "X". En este sentido, cada individuo "q" asocia una utilidad  $U_{jq}$  a cada alternativa  $A_j$ , a partir de la valoración de los atributos que

componen dicha alternativa. No obstante, existen dos puntos de vista: **i)** el del individuo que pondera todos los elementos de cada alternativa disponible y establece una utilidad en cada caso, con lo que determina la mejor opción y, **ii)** el del modelador que observa el comportamiento de los individuos, obteniendo algunos elementos que influyen en la toma de decisión, pero no todos ellos.

Es así como se especifica una función de utilidad sistemática o representativa  $V_{jq}$ , tal como se expresa en la siguiente expresión matemática, que integra los elementos medibles y sistemáticos.

$$V_{jq} = \alpha + \sum_k \theta_{kj} * X_{jkq} \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es la constante específica y se recogen de manera agregada el efecto de las variables no agregadas y  $\theta$  es el ponderador del atributo y se asume constante para todos los individuos, pero no necesariamente para todas las alternativas. La estimación de la utilidad  $U_{jq}$ , agrega a la función  $V_{jq}$ , un error aleatorio  $\varepsilon_{jq}$  que abarca todos los atributos no medibles, que incluye la idiosincrasia y las preferencias particulares de los individuos no capturados en la función de utilidad sistemática (Williams & Ortuzar, 1982, pp 167 – 219).

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad (2)$$

El capítulo 6 y en específico los desarrollado en el literal 6.4 tiene como objetivo la estimación de una función de utilidad “ $U_{jq}$ ” que permita representar el comportamiento de los generadores de carga al momento de elegir una alternativa “ $A_j$ ” para el transporte de sus mercancías considerando que “ $A$ ” corresponde a los modos disponibles en los escenarios futuros (camión, tren, transporte fluvial), “ $Q$ ” es la población o empresas generadoras de carga que requieren o demandan un servicio de transporte y “ $X$ ” el conjunto de variables explicativas de las elecciones de las empresas que es objeto de investigación.

De la Ecuación 2, Train (2003) complementa el entendimiento de la misma describiendo que, descomponer la utilidad en una componente determinista “ $V$ ” y un error aleatorio es una especificación general, ya que se define “ $\varepsilon$ ” como la diferencia entre el valor real de la

utilidad y el valor que observa el analista es decir todo aquello que el modelador no es capaz de observar pero que influye en la utilidad. De este modo, las características de “ $\varepsilon$ ” van a depender de la forma en la que el analista haya representado la elección. Si el analista fuese capaz de determinar con absoluta precisión el valor de todas las variables que explican la conducta del elector, así como la forma precisa en la que influyen, el valor del error sería cero.

Así, Para la aplicación de esta teoría se requiere que se establezca cierta homogeneidad en la población de estudio y que todos los individuos tengan las mismas alternativas disponibles, con las mismas características (Williams & Ortuzar, 1982) con lo cual se logra minimizar el peso del componente de error en el modelo de elección a ser estimado.

Ortúzar & Willumsen (2006) continúan con el desarrollo de la Ecuación 2 incorporando el concepto de Maximización de la Utilidad estableciendo que:

Cada usuario escogerá la alternativa que máxime su utilidad, por tanto, un individuo  $q$  elegirá la alternativa  $A_j$  si y solo si:

$$U_{jq} \geq U_{iq}, \forall A_i \in A_q \quad (3)$$

Lo que indica que:

$$V_{ij} - V_{iq} \geq \varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq} \quad (4)$$

Debido a que se desconoce los valores de error y por tanto su diferencia, no se logra determinar si la anterior expresión es realmente cierta, por lo que solo se puede establecer la probabilidad de escoger  $A_j$ , así:

$$P_{jq} = Prob \{ \varepsilon_{iq} \leq \varepsilon_{jq} + (V_{jq} - V_{iq}), \forall A_i \in A_q \} \quad (5)$$

Si  $f(\varepsilon) = f(\varepsilon_1 \dots \varepsilon_N)$  es la función distribución de las variables aleatorias, se tiene:

$$P_{jq} = \int_{\varepsilon_{jq} = -\infty}^{\infty} \int_{\varepsilon_{jq} = -\infty}^{V_{iq} - V_{Nq} + \varepsilon_{jq}} \dots \int_{\varepsilon_{jq} = -\infty}^{V_{iq} - V_{Nq} + \varepsilon_{jq}} f(\varepsilon_{1q}, \varepsilon_{2q}, \dots, \varepsilon_{Nq}) d_{\varepsilon_{1q}} \dots d_{\varepsilon_{Nq}} \quad (6)$$

La probabilidad de elección es una integral multidimensional sobre la distribución de la parte no observada de la función de utilidad. Es importante señalar que pueden obtenerse diferentes modelos dependiendo de los supuestos sobre la distribución de los  $\varepsilon$  (errores aleatorios). Así, por ejemplo si los errores se distribuyen de forma independiente e idéntica (IID) de acuerdo a la distribución de Gumbel con media cero y varianza  $\sigma^2$ , la probabilidad de elección está dada por:

$$P_{iq} = \frac{\exp(\beta V_{iq})}{\sum_{Aj \in A(q)} \exp(\beta V_{jq})} \quad (7)$$

Dicha función de probabilidad corresponde al modelo Logit Simple o Multinomial (MNL), donde  $\beta$  es un parámetro de escala relacionado con la desviación estándar común de la variable Gumble mediante:

$$\beta^2 = \frac{\pi^2}{6\sigma^2} \quad (8)$$

No obstante, en la práctica este parámetro se estima de manera conjunta con el parámetro  $\theta$ , por lo que usualmente se asume  $\beta=1$ .

Con el modelo calibrado se puede construir la función de log – verosimilitud, dada por:

$$l(\theta) = \sum_{q=1}^Q \sum_{Aj \in A(q)} g_{iq} \log(P_{iq}) \quad (9)$$

Donde  $g_{iq}$  es uno (1) si el individuo “q” escoge la alternativa  $A_i$  y cero (0) si no, por tanto existe un conjunto de estimadores  $\theta^*$ , cuya estimación indica el comportamiento esperado de la mayoría de la población estudiada, por tanto al maximizar la función de verosimilitud se obtiene el conjunto de estimadores verosímiles  $\theta^*$ , que distribuyen asintóticamente  $N(\theta, S^2)$  (Ortúzar & Willumsen, 2006, pp 227 - 235)

$$S^2 = - \left[ E \left( \frac{\delta^2 l(\theta)}{\delta \theta^2} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

Esta expresión es válida siempre y cuando las alternativas sean excluyentes y haya ortogonalidad entre ellas. En caso de que exista correlación entre las alternativas un modelo anidado o jerárquico son más apropiados (Williams & Senior, 1977).

Siguiendo el principio de maximización de la utilidad expresado por Ortúzar & Willumsen (2006), se puede esperar que:

El individuo elija la opción  $i$  que perciba como la de mayor utilidad, y esto se refleja por el hecho de que el valor de  $U(i)$  es mayor que cualquier otro valor  $U(j)$  para cualquier otra opción  $j$  disponible en el conjunto  $A$  de alternativas.

$$P(i) = P[U_j < U_i] \text{ para } j \neq i \quad (11)$$

$$P(i) = [e_j - e_i < V_j - V_i]; e = c. \text{ error} \quad (12)$$

$$P(i) = [e_j < V_i - V_j + e_i] \text{ para } j \neq i \quad (13)$$

Considerando la distribución de probabilidad conjunta  $F(\cdot)$  de las componentes aleatorias  $e(1), e(2), \dots, e(i), \dots, e(N)$ , para  $N$  opciones disponibles, así como la función de densidad marginal de la componente aleatoria  $i$ ,  $f_i(\cdot)$ , la probabilidad anterior puede ser calculada como:

$$P(i) = \int F[V_i - V_j + e_i] f_i(\theta) d\theta \text{ para } j \neq i \quad (14)$$

Para hacer manejable la expresión anterior, se necesitan hipótesis sobre la distribución de probabilidad conjunta de los errores  $e(i)$ . La primera hipótesis es considerarlos independientes e idénticamente distribuidos (IID) y la segunda, se refiere a la forma de su distribución de probabilidad (Ortúzar & Willumsen, 2006, pp 269 - 331).

El modelo logit es una forma que ha sido muy utilizada para la distribución de la probabilidad de las diferencias  $e(j) - e(i)$  y supone que los errores tienen una distribución

Gumbel por lo cual se puede demostrar que las diferencias de probabilidad tienen una distribución logística (Ben-Akiva & Lerman, 1985). La probabilidad de elegir la opción “i” en el modelo logit viene dado por la densidad logística:

$$P(i) = \frac{e^{Vi}}{e^{Vi} + e^{Vj}} = \frac{1}{1 + e^{-(Vi - Vj)}} \quad (15)$$

EL principio de el modelo logit desarrollado en el Capítulo 7.3 y 7.4 de la presenta investigación basa su estructura en la Ecuación 15 en donde se determina la probabilidad “P(i)” de elegir una alternativa por carretera o una alternativa considerando multimodalidad (Carretera – Tren) de acuerdo a los modelos de elección discreta “V” determinados en el Capítulo 6.4 y las características propias de las alternativas estimadas en el Capitulo 7.2.

Para representar que tan atractiva resulta una alternativa se utiliza el concepto de: **i)** utilidad como la variable a ser maximizada por el individuo que requiere realizar la elección y, generalmente, se define como combinación lineal de los atributos o variables de elección estimados y, **ii)** la formulación de un modelo Logit Multinomial que corresponde a un modelo de elección discreta cuyo fundamento consiste en aceptar que los residuos aleatorios “ε” distribuyen Gumble IID (McFadden & Domencich, 1975). De esta forma, la función de utilidad “U”, en su componente sistemático, se puede expresar de una forma práctica respecto a algunos parámetros típicos del transporte de carga de la siguiente forma:

$$U = -2.54 - 0.000109 * C - 0.314 * T - 1.62 * Tr + 0.0991 * D \quad (16)$$

En la anterior ecuación representa un ejemplo de la forma de representar la función de utilidad en un modelo de elección que se expresa teniendo en cuenta los valores o mediciones de cuatro variables en cada alternativa evaluada: C igual a costo de transporte, T igual al tiempo de viaje, Tr equivalente al número de Transferencias modales de y D equivalente al “Deliver” o confiabilidad de entrega. La influencia relativa de cada una de las variables está dada por su coeficiente y este a la vez está influenciado por las unidades con las cuales se determinó; por ejemplo, en la expresión anterior un cambio unitario en el tiempo de viaje (T) tiene un impacto tres veces mayor que un cambio unitario en la Deliver (D). La constante modal específica (-2.54 en la ecuación) se interpreta como una



representación de la influencia neta de todas aquellas características no incluidas explícitamente en la función de utilidad de cada alternativa o segmento de demanda para el caso de estudio.

La estructura de la función de utilidad definida en la Ecuación 16 es la misma desarrollada en la presente investigación en diferentes segmentos de demanda analizados y las cuales se presentan a lo largo del Capítulo 6.4. desde su formulación en diferentes modelos matemáticos hasta la elección de los más significantes estadísticamente y que mejor representen las elecciones de los generadores de carga (Tabla 6.9 y Tabla 6.10).

Los modelos Logit son una familia de modelos de elección discreta; de los más conocidos están los siguientes: Cuando sólo hay dos elecciones posibles, tenemos un modelo Logit Binario; si hay más de dos opciones, se tiene el modelo Logit Multinomial; y si existen semejanzas en algunas opciones que se puedan “anidar” en una clasificación común (p. ej. autobús urbano y taxi colectivo como opciones de “transporte público”) se obtiene un modelo Logit Anidado (Ortuzar & Willumsen, 1994).

Como se puede apreciar, en la aplicación de los modelos de elección discreta prevalece el enfoque de la teoría de la utilidad que hace referencia a las elecciones hechas por consumidores, productores, gobiernos y en nuestro caso particular los generadores de la carga. La teoría de la utilidad o del consumidor supone la existencia de consumidores racionales que toman decisiones maximizando su utilidad y con conocimiento completo acerca de todo lo que se relacione con su decisión de consumo, por tanto, la actitud de consumo de bienes será diferente para cada individuo de acuerdo con sus propias características, gustos y la capacidad de satisfacer sus necesidades particulares (González Maria, 2020).

En los últimos años las grandes contribuciones en la construcción de modelos de elección discreta se realizan a través de la incorporación de variables latentes como los aportes de Muñoz, C., Pineda Uribe. et al. (2022) incorporando variables seguridad y comodidad, Guajardo María (2022) incorporando las variables uso de tecnología e interacciones humanas, Agudelo Laura (2019) evaluado la percepción de seguridad de entorno a través de escenarios de realidad virtual, Díaz Sergio (2021) con las variables latentes inseguridad y desorientación, entre otros grandes aportes de investigadores.

### 2.2.1.1 Preferencias declaradas

Las técnicas se desarrollaron originalmente para estudios de marketing (Green and Rao, 1971) y desde principio de los años 80 se ha desarrollado de manera creciente en los estudios de transportes (Louviere, 1988).

En este contexto, Ortuzar y Willumsen (2011) denominan técnicas de preferencias declaradas a un conjunto de metodologías que se basan en juicios (datos) declarados por individuos, acerca de cómo actuarían frente a diferentes situaciones hipotéticas que le son presentadas y que deben ser lo más aproximadas a la realidad. Estas técnicas utilizan diseños experimentales para construir las alternativas hipotéticas presentadas a los encuestados, las cuales describen situaciones o contextos que se diferencian a través del valor que toman sus atributos o variables.

Los datos recopilados a partir de las encuestas de Preferencia Declarada tienen como objetivo simular el comportamiento de los individuos (encuestados) ante distintas alternativas de precio y ahorros en tiempos de viaje, transferencias, nivel de servicio, confiabilidad del servicio, etc. En este sentido, el individuo (encuestado) puede realizar una importante cantidad de juicios en un solo experimento de preferencias declaradas y el investigador o consultor (quien diseña el experimento) puede evaluar efectos sobre una sola variable (manteniendo las demás variables de elección constantes). El concepto de la técnica de Preferencia Declarada y su aplicación a los individuos (generadores de carga en nuestra investigación) es la base conceptual para el desarrollo del Capítulo 6.1 y 6.3 de la presente investigación que permite su diseño, aplicación y posterior análisis matemático y estadístico.

Con estas posibilidades, la forma funcional para modelar la situación de elección de la población en estudio puede evaluarse de una forma más detallada ya que el investigador puede rastrear la forma de la respuesta con respecto a cada variable. Un hallazgo muy interesante de los estudios de Preferencia Declarada es que, para cualquier decisión particular, las formas funcionales tienden a ser bastante estables en toda la población, aunque los valores de sus parámetros pueden variar ampliamente (Ortúzar y Willumsen, 2011).

Ortuzar y Willumsen (2011) en el libro *Modelling Transport* postulan que:

El comportamiento de los viajes esta influenciado entonces por variables o factores que pueden ser medibles o cuantitativos “G” y otros cualitativos “H” y cuyo conjunto de factores “Xi” es “Di” y “Ei” respectivamente. De igual forma, cada factor tiene asociado un cierto valor (que puede obtenerse mediante técnicas de preferencias declaradas) y que la utilidad de esta cantidad tal como la percibe el individuo es  $U_i = f_i(X_i)$ , donde  $f$  es la función de percepción.

En el desarrollo de un experimento en el cual un conjunto de individuos elige una alternativa respecto a un conjunto de posibilidades hipotéticas - respondiendo a una combinación de factores “G” y “H” – como una expresión de sus utilidades personales, tenemos:

$$U_i = p_i(u_{1i}, \dots, u_{ki}) \quad (17)$$

Los Autores postulan que el vector de respuestas “U” = {U<sub>i</sub>} está conectado a un comportamiento no experimental (observado) “B” con la siguiente expresión algebraica:

$$B = w(U) \quad (18)$$

$$B = w\{p[f(D, E)]\} \quad (19)$$

Dada la generalidad de la función para efectos de modelación se deben hacer suposiciones explícitas acerca de las funciones  $f$ ,  $p$  y  $w$  con las consecuencias que esto implique. Formas alternativas como las lineales que son altamente utilizadas para expresar las funciones de utilidad a través de técnicas de preferencias declaradas, pueden probarse y seleccionarse mediante análisis de varianza cumpliendo con dos condiciones: **i)** el patrón de significancia estadística de las respuestas de utilidad a varias combinaciones de las variables independientes “Xi” debe ser de naturaleza específica para permitir el diagnóstico o la prueba de la forma del modelo y, **ii)** la evidencia gráfica correspondiente debe respaldar el diagnóstico o la prueba.

En la literatura asociada a la aplicación de técnicas de preferencias declaradas en la modelación del transporte se observan cuatro grandes grupos de estimación: **i)** Métodos ingenuos o gráficos, **ii)** ajuste de mínimos cuadrados – regresión lineal, **iii)** escala no métrica y, **iv)** análisis logit y probit. En todos los casos se busca establecer los pesos asignados “Coeficientes” a cada atributo o factor “Xi” en función de la utilidad de las respuestas de los individuos que quiere representar con el mayor grado de confianza en una sola ecuación de utilidad para cada medio o servicio investigado con los siguientes aportes a la investigación:

- Determinar la importancia relativa de los atributos incluidos en el experimento.
- Una extensión de esto es la estimación de la tasa a la que un atributo se intercambia con otro (e.j. Valor del Tiempo (VOT) que corresponde a la relación entre el parámetro del atributo tiempo y el parámetro del atributo costo); también es posible estimar el valor de atributos más cualitativos como confiabilidad, niveles de seguridad, etc.
- Especificar funciones de utilidad para modelos de pronóstico, incluidas cuestiones de estructura del modelo.

La conceptualización de los diseños de experimentos de preferencias declaradas en la presente investigación persigue un doble objetivo. Por un lado, incluir las principales variables que influyen en la elección de una alternativa de transporte de mercancías, y por otro, basados en las observaciones de los generadores de carga, determinar las funciones de utilidad que mejor simulen las elecciones en materia de transporte de mercancías en el contexto Nacional, tal como se desarrolla en el Capítulo 6.4.

### **Grupos focales**

Un punto importante de cualquier experimento de PD es la selección de los atributos a considerar en cada alternativa del ejercicio. Una forma de identificar los atributos más relevantes es realizando un grupo de discusión (focus group) con una muestra representativa de individuos que tengan un adecuado conocimiento de la pregunta de investigación que se desee investigar, por ejemplo, para la presente investigación se delimita como grupo focal representantes en material logística de empresas generadoras

de carga cuyo conocimiento de sus cadenas logísticas, costos y necesidades es integral. Estos grupos permiten a los participantes hablar, a través de un moderador, sobre el tema investigado y dar al investigador una comprensión más realista del problema investigado y consolidar variables, parámetros e información precisa para la aplicación de las encuestas finales.

### **2.2.2 Elasticidad en la captación de demanda**

Uno de los conceptos más importantes para la evaluación de nuevos proyectos, tanto de ingeniería civil como de infraestructura para la movilidad de bienes y servicios o la irrupción de un nuevo producto en el mercado, tiene que ver con la elasticidad de la demanda que establece cuanto varía la cantidad de demanda captada por el proyecto (en el caso del proyecto de investigación un nuevo sistema multimodal para el transporte de mercancías) frente a cambios en la estructura de sus variables de decisión (costo, tiempo, ubicación, tecnología, confiabilidad de entrega, etc.). Entender que tan elástico es el proyecto, es decir que tan susceptible es de perder o ganar demanda frente a un cambio en las variables que hacen más o menos atractivo el proyecto frente a las alternativas con las que compete en el mercado, permitirá establecer rangos de confiabilidad del potencial de captación de demanda del proyecto al ser implementado en el territorio y, la priorización ciertas características o variables de operación que, en los proyectos de transporte de mercancías, permita mayores niveles de captación respecto a mejoras porcentuales de la variable.

Existen bienes/servicios que son realmente sensibles a los cambios en su estructura de costos y variables de elección en el mercado a tal magnitud que un simple aumento unitario en alguna de sus variables genera una baja considerable en las cantidades de captación de dicho producto. Así mismo, una baja poco significativa en sus variables que la hace menos significativa en el mercado causará un fuerte aumento en la captación de la demanda. Por el contrario, existen otros bienes/servicios, en menor proporción, que poseen un cambio mínimo de captación de demanda frente a una variación en sus parámetros de elección.

La sensibilidad o elasticidad de un bien o servicio (en nuestro caso de investigación el transporte de mercancías desde un origen a un destino) está determinada por una combinación de características individuales que determinan la disponibilidad de la

población, mercado o tomadores de decisiones en materia de transporte en consumir o utilizar este bien/servicio en el momento de modificar su estructura de parámetros o variables ofertadas.

Bajo este contexto, es necesario determinar las características por las cuales se puede ver afectada la elasticidad del proyecto frente a un cambio en las variables que la gobiernan. El transporte de mercancías es un servicio de primera necesidad para los generadores de carga en la medida que les permite establecer la conexión desde sus centros de producción al consumidor final, no obstante, existe una competencia directa del modo de transporte carretero. En términos monetarios, el transporte constituye un rubro importante en la estructura de costos de la cadena de producción y distribución de cualquier producto o insumo, es por esto por lo que cualquier estrategia o acción que permita reducir significativamente los costos será altamente considerada por los generadores al momento de elegir el modo o secuencia de modos de transporte para la movilización de la carga.

De igual forma, paso del tiempo es sin duda una característica a tener en cuenta; en la actualidad el transporte ferroviario se encuentra en una nueva etapa de reactivación y promulgación, por lo tanto, es muy probable que en los primeros años de operación la captación de la demanda sea escasa, no obstante, en la medida que se estructuren nuevos proyectos que amplíen la red ferroviaria del país y se consoliden políticas públicas que garanticen la multimodalidad, el proyecto podrá captar una demanda adecuada para su sostenibilidad.

Finalmente, la elasticidad en la captación de demanda se conceptualiza como la variación porcentual de la cantidad de demanda de un bien/servicio dividido entre la variación porcentual de la variable analizada y se puede expresar de la siguiente expresión matemática.

$$Ep = \frac{\% \text{ variación en la captación de demanda}}{\% \text{ variación en la variable}} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (20)$$

Donde:  $\Delta Q$  = cambio absoluto en las cantidades de captación de demanda;  $Q$  = La cantidad base de comparación de la demanda;  $\Delta V$  = Cambio absoluto en la magnitud de la variable  $y$ ;  $V$  = magnitud base de comparación de la variable.

---

Considerando la variable más mencionada en los artículos económicos asociados al sector de transporte “elasticidad precio demanda”, bastaría conocer el incremento en precio y cantidad, y los correspondientes niveles iniciales, para calcular la elasticidad implícita en un cambio de precio.

Es adecuado considerar que la elasticidad es un concepto negativo, es decir, se asume que los incrementos en precio o efectos negativos en una variable de elección tienen un efecto negativo en la cantidad demandada, y que los decrementos de precio ocasionarán un aumento la demanda. El anterior es un método para medir la elasticidad en forma directa. Al comparar o estimar dos puntos o combinaciones de estimaciones de elasticidad se construye la curva de demanda o “arco de elasticidad”, no obstante, esta “curva” no siempre es lineal, por lo que considerar esta condición de linealidad es riesgoso para el tomador de decisiones, por lo tanto, es más aconsejable, a través de la función de demanda (modelo logit), estimar tantos puntos o rangos de elasticidad como rangos probables de variación de los factores que pueden afectar la demanda del servicio/modo que se esté evaluando y aplicar los conceptos del cálculo diferencial.

Existen bienes/servicios que son realmente sensibles a los cambios en los precios a tal magnitud que un pequeño aumento en su precio o variable de decisión genera una baja considerable en las cantidades de captación de dicho producto. Así mismo, una baja poco significativa en su precio o tarifa causará un fuerte aumento en la captación de la demanda. Por el contrario, existen otros bienes/servicios, en menor proporción, que poseen un cambio mínimo de captación de demanda frente a una variación en sus costos.

La sensibilidad o elasticidad de un bien o servicio (en nuestro caso el proyecto férreo corresponde a un servicio para el transporte de mercancías desde un origen a un destino) está determinada por una combinación de características individuales que determinan la disponibilidad de la población o mercado en continuar consumiendo o utilizando este bien/servicio en el momento de aumentar sus precios. Los principales factores que influyen en que la demanda de un producto/servicio sean más o menos elásticos son descritas en Eumed.net, *La elasticidad de la demanda*, así:

- Tipo de necesidades que satisface. Si el bien/servicio es de primera necesidad la demanda es inelástica, se adquiere sea cual sea el precio; en cambio si el bien es de lujo la demanda será elástica ya que si el precio aumenta un poco muchos consumidores podrán prescindir de él.
- Existencia de bienes/servicios sustitutivos. Si existen buenos sustitutos la demanda del bien será muy elástica. Por ejemplo, un pequeño aumento en el precio del aceite de oliva puede provocar que un gran número de amas de casa se decida por usar el de girasol.
- Importancia del bien en términos de costo. Si el gasto en ese bien supone un porcentaje muy pequeño de la renta de los individuos, su demanda será inelástica. Por ejemplo, el lápiz. Las variaciones en su precio influyen muy poco en las decisiones de los consumidores que desean adquirirlos.
- El paso del tiempo. Para casi todos los bienes, cuanto mayor sea el período de tiempo considerado mayor será la elasticidad de la demanda. Puede ser que, al aumentar el precio de la gasolina, su consumo no varíe mucho, pero al pasar el tiempo podrá ser substituida en algunos de sus usos por energías alternativas como solar o gas, de forma que la disminución en la demanda sólo se nota cuando pasa el tiempo.
- El precio. Finalmente hay que tener en cuenta que la elasticidad de la demanda no es la misma a lo largo de toda la curva. Es posible que para precios altos la demanda sea menos elástica que cuando los precios son más bajos o al revés, dependiendo del producto de que se trate.

Bajo este contexto, es necesario determinar las características por las cuales se puede ver afectada la elasticidad del proyecto frente a un cambio en las tarifas preestablecidas. El transporte de mercancías es un servicio de primera necesidad para los generadores de carga en la medida que les permite establecer la conexión desde sus centros de producción al consumidor final, no obstante, existe una competencia directa del modo de transporte carretero.



En términos monetarios, el transporte constituye un rubro importante en la estructura de tarifas de la cadena de producción y distribución de cualquier producto o insumo, es por esto por lo que cualquier estrategia o acción que permita reducir significativamente los costos será altamente considerada por los generadores al momento de elegir el modo o secuencia de modos de transporte para la movilización de la carga.

Finalmente, el paso del tiempo es sin duda una característica a tener en cuenta; en la actualidad el transporte ferroviario se encuentra en una nueva etapa de reactivación y promulgación, por lo tanto, es muy probable que en los primeros años de operación la captación de la demanda sea escasa, no obstante, en la medida que se estructuren nuevos proyectos que amplíen la red ferroviaria del país y se consoliden políticas públicas que garanticen la multimodalidad, el proyecto podrá captar una demanda adecuada para su sostenibilidad.

Por este tipo de características se intuye que el proyecto ferroviario sea altamente elástico, no obstante, para ser más preciso debemos determinar el grado de elasticidad de acuerdo con la siguiente clasificación desarrollada en SumUp Limited en su artículo *Elasticidad precio de la demanda ¿Qué es la elasticidad precio de la demanda?*:

- Demanda perfectamente inelástica. Esto se da cuando ante un cambio significativo del precio la cantidad demandada se mantiene constante; no presenta ningún cambio.  $EPD = 0$ .
- Demanda inelástica: La demanda de un bien es inelástica cuando la variación de la demanda ante un cambio en el precio no es significativa. Esto se da cuando  $0 < EPD < 1$ .
- Demanda de elasticidad unitaria. Esto ocurre cuando la relación entre el porcentaje de variación en el precio es equivalente a la variación en porcentaje de la demanda.  $EPD=1$
- Demanda elástica: La demanda de un bien es elástica cuando la variación de la demanda ante un cambio en el precio es significativa. Esto se da cuando  $EPD > 1$ .

- Demanda perfectamente elástica. Esto se da cuando a cierto precio dado, los consumidores compran cualquier cantidad, por encima de este precio, la cantidad demandada es cero y por debajo es infinita.  $EPD = \infty$ .

Este concepto de elasticidad y la clasificación según el grado de elasticidad de las variables se utilizará en el capítulo 7.5 para determinar el grado de elasticidad o sensibilidad en la captación de la demanda del proyecto ferroviario Tren del Carare ante variaciones en los parámetros de las funciones de utilidad o modelos de elección discreta que mejor representen las decisiones de los generadores de carga.

### **Tipos de Elasticidades**

Víctor M Islas, Rivera César et al (2002) definen dos tipos de elasticidades precio demanda entre aquellas que se refieren a cambios en la demanda para un modo en particular, ocasionados por cambios en las variables asociadas con ese modo (llamadas elasticidades propias o directas), y aquellas que se refieren a cambios en la demanda para un modo en particular, ocasionados por cambios en las variables asociadas con otros modos que compiten en el mercado (llamadas elasticidades cruzadas) (Víctor M Islas, Rivera César et al, 2002, pp 20-21).

La elasticidad directa corresponde a cambios en el consumo o demanda de un de un servicio ante cambios en el precio o factores de este servicio (ej. cambios en la demanda de transporte público respecto a cambios en la tarifa del transporte público). Estas elasticidades son las principalmente desarrolladas en el Capítulo 7.5 de la presente investigación para las variables seleccionadas e incorporadas en el modelo Logit.

Por su parte, la elasticidad cruzada mide el efecto en el cambio del uso o demanda de un servicio o medio de transporte debido a cambios en la tarifa o estándares del servicio de otro medio de transporte (ej. efectos en la demanda del transporte carretero debido a cambios – aumentos o disminución – en las tarifas del transporte ferroviario).

## **3. PROPUESTA DE PROYECTO FÉRREO TREN DEL CARARE**

El proyecto férreo conocido como “Tren del Carare” se ha estudiado tanto desde el sector privado como público (gobierno) desde hace varias décadas. Con estos estudios, que son en muchos casos conceptuales y en algunos otros mucho más específicos, se han planteado trazados aproximados, sin embargo, no se tiene un diseño definitivo del mismo.

Las diferentes propuestas que se han planteado para el trazado del proyecto - con un margen adecuado de detalle para su futura materialización en archivos SIG - se muestran a continuación; de estas se elegirá la que mayor beneficio traiga para la estimación de demanda potencial, es decir, en términos generales, la que mayores centros de consumo y producción (ciudades/municipios) conecte en su trazado.

### **3.1 Plan Maestro de Transporte Intermodal PMTI**

El Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI) representa la visión a largo plazo del gobierno nacional de manera que permita lograr una operación del transporte óptima, con menores tiempos de viaje, menores tiempos logísticos y costos competitivos bajo una política transversal que promueva la inversión de recursos públicos y privados.

*El PMTI parte de reconocer el rezago en dotación y calidad de la infraestructura, e implementa una metodología y una hoja de ruta de proyectos que, con una visión de largo plazo, pretenden hacer de Colombia un país más competitivo y conectado (PMTI 2015).*

En esta hoja de ruta se incluye el proyecto Tren del carare dentro de la segunda década de infraestructura o red básica. El trazado no presenta mucho detalle de las poblaciones a ser conectadas, no obstante, se identifican los extremos en la ciudad de Belencito del

departamento de Boyacá que brinda articulación con la red férrea Bogotá - Belencito y, la vereda Vizcaína del departamento de Santander que permite, a través del nodo logístico de Barrancabermeja, articular el proyecto con el corredor férreo central. Con una longitud total de 420 km y una inversión prevista 5,00 billones de pesos a continuación se presenta el trazado propuesto por el PMTI.

**Figura 3-1:** Trazado Tren del Carare propuesto por el PMTI



Fuente: Ministerio de Transporte (2015). Plan Maestro de Transporte Intermodal.

### 3.2 Plan Maestro Ferroviario PMF

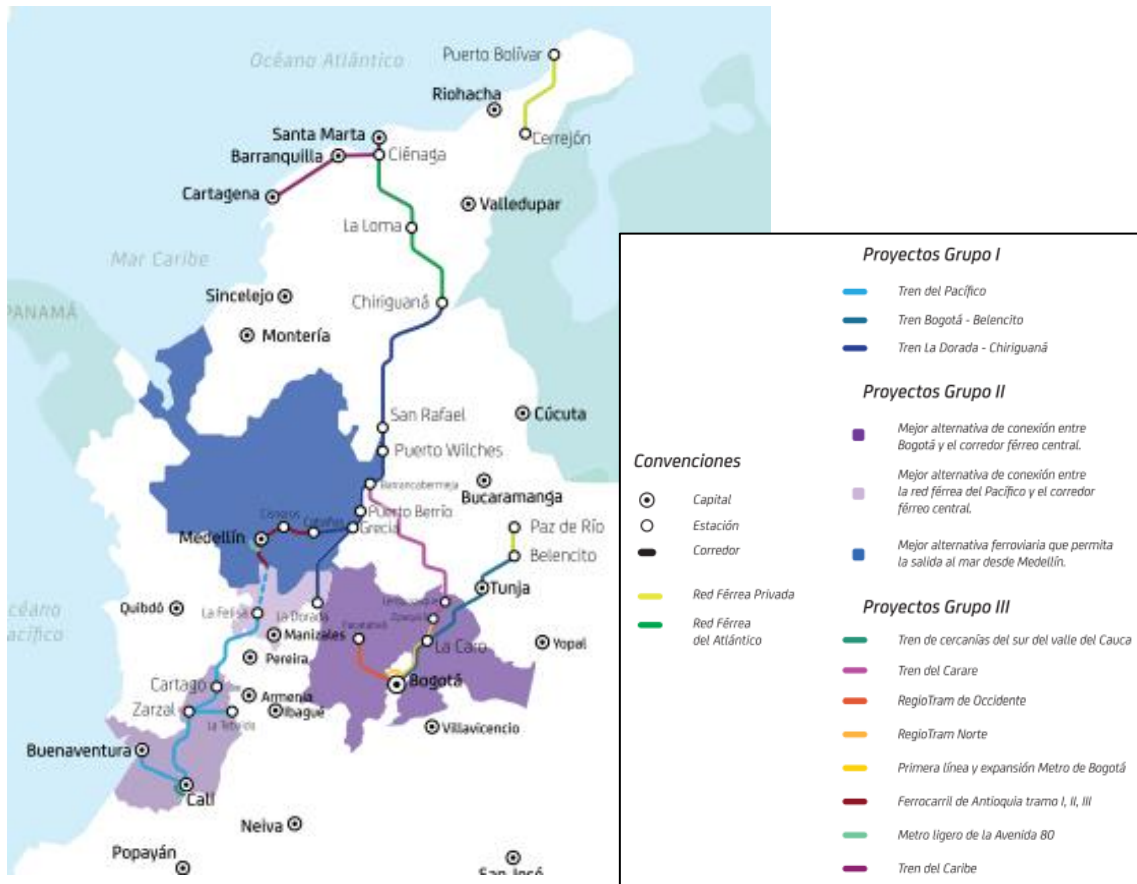
El Plan Maestro Ferroviario (PMF) surge como una estrategia para la reactivación y consolidación de la operación ferroviaria en el país. El PMF, fundamentado en las consideraciones realizadas en el Plan Maestro de Transporte Multimodal (PMTI), establece

los lineamientos técnicos y la hoja de ruta de los componentes normativos, institucionales, regulatorios, de financiación y de planeación de proyectos que contribuyan al desarrollo económico y social del país (PMF, 2020). El PMF se conforma en cinco (5) grandes componentes: proyectos, institucionalidad, regulación técnica, regulación económica y ambiente y social.

En el componente de proyectos se realiza una priorización de ejes ferroviarios que contribuirán a la reactivación del modo a través de tres grupos debidamente definidos en los cuales el grupo uno (1) corresponde a proyectos de escala nacional que en la actualidad se encuentran en operación total o parcial y que, desde el año 2018, han permitido la reactivación de transporte férreo y la multimodalidad en el país. En el grupo dos (2) se encuentran proyectos denominados de conexión interoceánica la cual permitirá conectar los principales distritos financieros y económicos del país con las zonas costeras a través de su articulación con los proyectos del grupo uno; en este grupo se encuentra enmarcado el proyecto Tren del Carare objeto de la presente investigación. Finalmente, en el grupo tres (3) se encuentran los proyectos de importancia estratégica que impulsarán el desarrollo económico de las regiones.

*Uno de los proyectos ferroviarios de mayor importancia es la conexión de Bogotá con el sistema férreo colombiano. Bogotá es uno de los principales generadores de carga de productos no mineros de Colombia; sin embargo, quedó aislada del sistema, debido a la progresiva decadencia del ferrocarril (PMF, 2020).*

En este caso, se identifica una red de 477 kilómetros (403 km de vía nueva) que conecta principalmente el distrito capital de Bogotá con la red férrea central, a través de la continuidad de la actual red Bogotá – Zipaquirá que actualmente opera para el transporte de pasajeros.

**Figura 3-2:** Trazado Tren del Carare propuesto por el PMF

Fuente: Ministerio de Transporte (2015). Plan Maestro Férreo

### 3.3 Plan Estratégico de Infraestructura Intermodal de Transporte PEIT

El Plan Estratégico de Infraestructura Intermodal de Transporte (PEIT) se estructuró en el año 2013 como un primer documento en donde se realizó, en una primera etapa, el diagnóstico e inventario de la infraestructura nacional por modo de transporte y, la estimación del reparto modal de la demanda de carga que circula en el interior del territorio nacional (carretera, férrea y fluvial). Posteriormente, la segunda etapa correspondió a la formulación del plan estratégico en el cual se planteó un escenario tendencial que priorizó el transporte de carga por modo carretero y un escenario de intermodalidad en el cual se “supone el desarrollo a gran escala de los modos de transportes masivos (ferroviario y fluvial), acompañado de infraestructura vial y logística (PEIT, 2013)”

La red planteada para el proyecto Tren del Carare, propone un trazado de dos cuencas de operación y que, a través de más de 523 kilómetros de vías férreas, permite la conexión tanto del departamento de Boyacá (Belencito) como del Distrito capital de Bogotá, transcurriendo, en ambos casos, por la ciudad de Barbosa y conectado en Vizcaína con la red férrea central.

**Figura 3-3:** Trazado Tren del Carare propuesto por el PEIT



Fuente: Epypsa (2013), Plan Estratégico de Infraestructura Intermodal de Transporte

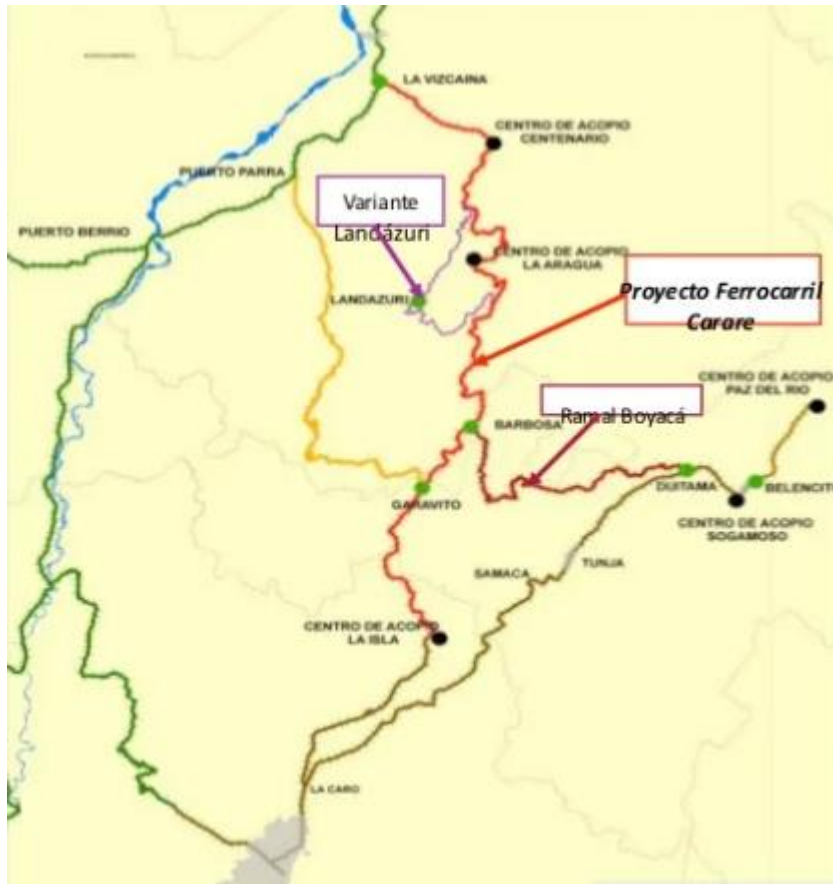
### 3.4 Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare

La corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare es una corporación creada para promover, gestionar y ejecutar el proyecto férreo que ofrecerá una infraestructura logística competitiva que, inicialmente, permitiría a los productores de carbón de la región

Cundiboyacense tener una salida más eficiente a los mercados internacionales, pero que en la actualidad serviría para el transporte de todas las mercancías de la región a través de un sistema logístico multimodal.

Con una longitud total de 397 kilómetros, el trazado propuesto por la corporación guarda concordancia con lo propuesto por el PEIT denotando dos ramales que permitan la conexión total del territorio Cundiboyacense y su posterior articulación con el ferrocarril central a la altura de la vereda la Vizcaína. El trazado se ha subdividido en tres cuencas de operación: La Isla (Cundinamarca) – Barbosa (Santander): 63,5 km; Tibasosa (Boyacá) – Santa Sofía (Boyacá): 219,1 km y; Barbosa (Santander) – La Vizcaína (Santander): 114,0 km.

**Figura 3-4:** Trazado Tren del Carare propuesto por la Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare



Fuente: Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare, 2011.



### 3.5 Trazado adoptado para la investigación

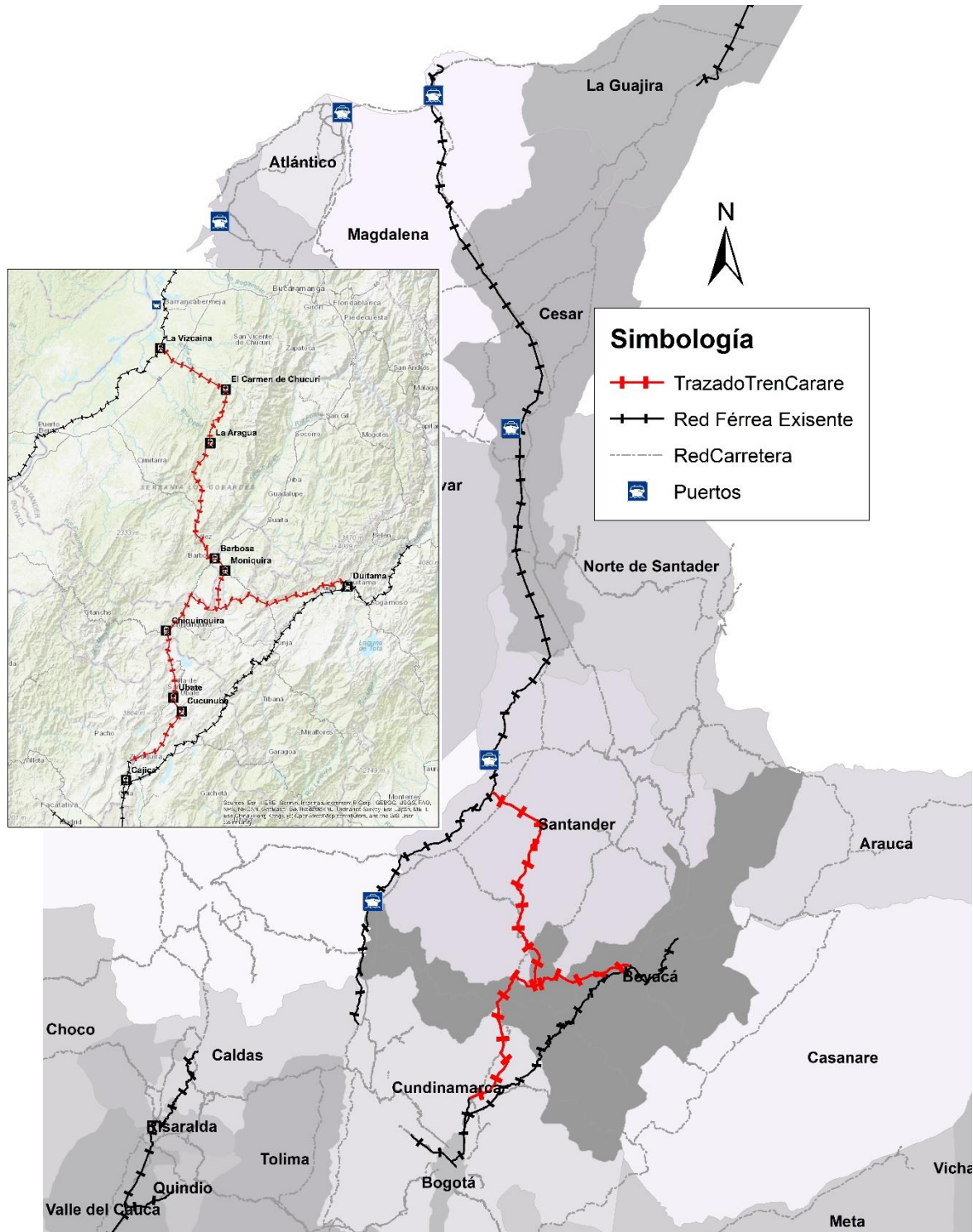
Las cuatro propuestas de trazado expuestas anteriormente es posible unificarlas tomando como referencia lo planteado por la Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare debido a que esta propuesta transita por las diferentes poblaciones mencionadas en los documentos de política nacional.

Se adopta un trazado que incorpora el ramal oriental que permite conectividad y desarrollo al departamento de Boyacá en la conexión con el municipio de Duitama y continuidad hasta Belencito lo cual se articula con lo establecido PMTI; complementariamente se incorpora el ramal occidental que permite conectividad a la Región Metropolitana de Cundinamarca a través de los municipios de Zipaquirá y continuidad hasta Bogotá en correlación con lo planeado por el PMF y, en conjunto, los dos ramales proyectados para el trazado de la investigación dan cobertura adecuada a los poblaciones y zona de generación y atracción de carga que mayor diversidad y beneficio traería al proyecto de acuerdo con los previsto por La Corporación para el Desarrollo del Ferrocarril del Carare y el PEIT.

Así, el trazado adoptado para la presente investigación cuenta con una longitud total de 360,4 kilómetros, adicional a los 19 kilómetros del actual ramal férreo que conecta el municipio de Zipaquirá con la estación de La Caro lo que permitiría articulación con la línea férrea de Bogotá – Belencito. Las poblaciones directamente conectadas por el trazado corresponden a **Duitama** como extremo suroriental del corredor, Sotaquirá, Arcabuco, Santa Sofía, Moniquirá, Chiquinquirá, Ubaté y **Zipaquirá** (extremo suroccidental del corredor) que permite el cierre del ramal “Boyacá”; posteriormente, se dirige hacia el norte del territorio nacional a través de los municipios de Barbosa, Vélez, La Vizcaína y la conexión al Sur del municipio de **Barrancabermeja** para brindar articulación con la red férrea central. A continuación se detalle geográficamente el recorrido mencionado.

El trazado a ser evaluado como estudio de caso en la presente investigación a través de la aplicación de los modelos de elección discreta en un modelo logit, genera la mayor conectividad a poblaciones a través de su recorrido y, por ende, maximiza la demanda potencial de mercancías del proyecto férreo.

**Figura 3-5:** Trazado Tren del Carare propuesto para la investigación



Fuente: Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare, 2011.

---

## **4. CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE DE CARGA A NIVEL NACIONAL Y REGIONAL**

Un diagnóstico adecuado del transporte de carga y logística para la región Cundiboyacense, y en lo específico para el corredor objeto de caso de estudio, parte del entendimiento de la visión del país en esta materia a través de programas, planes y documentos de política pública propendiendo por contribuir a un mejor posicionamiento en el contexto regional e internacional, específicamente aquellos relacionados con el transporte y comercialización de mercancías, y en mayor detalle lo concerniente a los proyectos de promoción del transporte multimodal, dadas sus importantes ventajas competitivas y complementarias frente al transporte exclusivo por carretera.

### **4.1 Visión del país en materia de transporte intermodal y logística**

El Plan Maestro Ferroviario (PMF) es el documento de política más reciente generado por el gobierno nacional como una estrategia para la reactivación y consolidación de la operación ferroviaria en el país. El PMF, fundamentado en las consideraciones realizadas en el Plan Maestro de Transporte Multimodal (PMTI), establece los lineamientos técnicos y la hoja de ruta de los componentes normativos, institucionales, regulatorios, de financiación y de planeación de proyectos que contribuyan al desarrollo económico y social del país (PMF, 2020), no obstante, como se ha mencionado anteriormente, dentro de este documento, no se ha priorizado el corredor férreo Tren del Carare rezagándolo a una tercera fase de ejecución de proyectos lo cual aplaza la consolidación de un sistema multimodal y complementario al transporte carretero que permita conexión del interior del país con la red férrea de la nación y potencie la economía de la región a través de la conexión con los puertos del Caribe y los nodos productores y consumidores del norte y occidente del país como Santander y Antioquia (articulación con Ferrocarril de Antioquia).

El PMF surge como respuesta a la continua visión del país en la reactivación económica a través de la intermodalidad y el desarrollo del sector ferroviario; para llegar a este documento se parte del documento CONPES 2776 del 26 de abril de 1995, en el cual se diseñó una política para la modernización de la red férrea considerando su papel fundamental para facilitar la comunicación entre los principales centros de producción y los puertos marítimos. Posteriormente, se crea el CONPES 3547 del 27 de octubre de 2008 “Política Nacional Logística” a través del cual se buscan articular iniciativas que faciliten el comercio y el transporte a través del fortalecimiento subsectorial y su inserción en la cadena de abastecimiento como eslabón estratégico para el desarrollo económico del país.

El Documento CONPES 3547, partiendo de la necesidad de mejorar la competitividad del país, identifica el mejoramiento de la operación logística del país como un pilar estratégico para lograr suplir esta necesidad. Para lograrlo se establecieron las siguientes estrategias: *(i) corredores logísticos articulados, (ii) facilitación del comercio, (iii) entorno institucional, (iv) información en logística, (v) uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) al servicio de la logística y (vi) provisión de servicios de calidad en logística y transporte.* Sin embargo, estas estrategias fueron insuficientes para consolidar un plan logístico, por esto, nace la necesidad de replantear y actualizar el documento a través del CONPES 3982 de enero de 2020 orientándolo a tres acciones principales:

- **Promover la intermodalidad en el país:** Se proponen mecanismos para la modernización de la infraestructura y la productividad en la prestación de los servicios de transporte de carga por los modos carretero, férreo, fluvial, aéreo y marítimo nacional; así como el desarrollo de conexiones eficientes entre estos modos, mediante el desarrollo de infraestructura logística especializada (ILE) para la provisión de valor agregado de servicios logísticos en las diversas apuestas productivas del país.
- **Estrategias para la optimización de la oferta de infraestructura:** En materia de eficiencia y competitividad de los nodos de comercio internacional, se proponen terminales de intercambio comercial y la optimización de los trámites de importación y exportación a través de la implementación de las herramientas de facilitación del comercio.

- **Estrategias transversales para mejorar la oferta institucional:** Contar con información en logística para la toma de decisiones y formar capital humano bajo principios de calidad y pertinencia en los procesos de la cadena logística.

## 4.2 Articulación con la red multimodal nacional

En Colombia el modo de transporte predominante es el carretero, convirtiéndose en el más importante para la conexión entre los principales centros de consumo y de producción del territorio nacional. Sin embargo, es importante mencionar que el país cuenta con infraestructura para la movilización de carga por medio de otros modos como lo son el férreo, marítimo, fluvial, aéreo y ductos. No obstante, entre estos modos de transporte que transitan por un medio terrestre suficientes estaciones de intercambio modal o centros de transferencia son limitadas o no tienen una infraestructura óptima que permita dicha actividad de forma eficiente, trayendo consigo como consecuencia la dificultad de implementar operaciones logísticas multimodales para el transporte de carga en el país, siendo ésta una importante oportunidad de mejora en la optimización de la operación en las cadenas logísticas.

En este sentido, el primer análisis a nivel nacional que permite diagnosticar la actual operación logística del país corresponde a realizar un análisis detallado de los nodos que permitan el intercambio modal y en los cuales podría articularse el proyecto férreo en estudio. La zona sur del país presenta una importante oferta de servicios fluviales para el transporte de mercancías y personas, no obstante, estas no son abordadas en el presente análisis debido a que la implementación del Tren del Carare no permitiría articulación con estas regiones del Meta, Vichada, Guainía, etc, y por ende no cambiaría el comportamiento del movimiento de carga actual. De igual forma, la red de ductos y área no se considera como potencial de articulación con el proyecto debido a la naturaleza y particularidades de las mercancías que allí se transportan: alto valor comercial como crudo y diamantes, carga perecedera como flores y, necesidades de transporte en tiempos cortos que solo el transporte aéreo logra brindar.

Así, la oferta actual de servicios de transporte de carga complementarios al transporte carretero se encuentra principalmente operando sobre nueve (9) proyectos al norte del país, así:

### Fluvial

- Río Magdalena: 1
- Río San Juan (Costa Pacífica): 2
- Río Atrato (Costa Pacífica): 3
- Orinoquía y Amazonía: 4

### Férreo

- Bogotá – Belencito: 5
- La Dorada – Chiriguana (Red Férrea Central): 6
- Chiriquaná – Santa Marta (Red del Atlántico): 7
- Red Férrea del Pacífico (Felisa – Buenaventura): 8
- Red Privada del Cerrejón: 9

De forma geográfica, la siguiente figura nos permite observar la cobertura del mismo y la interconectividad que existe en dicha red.

**Figura 4-1:** Red Multimodal del norte del país (férreo y fluvial)



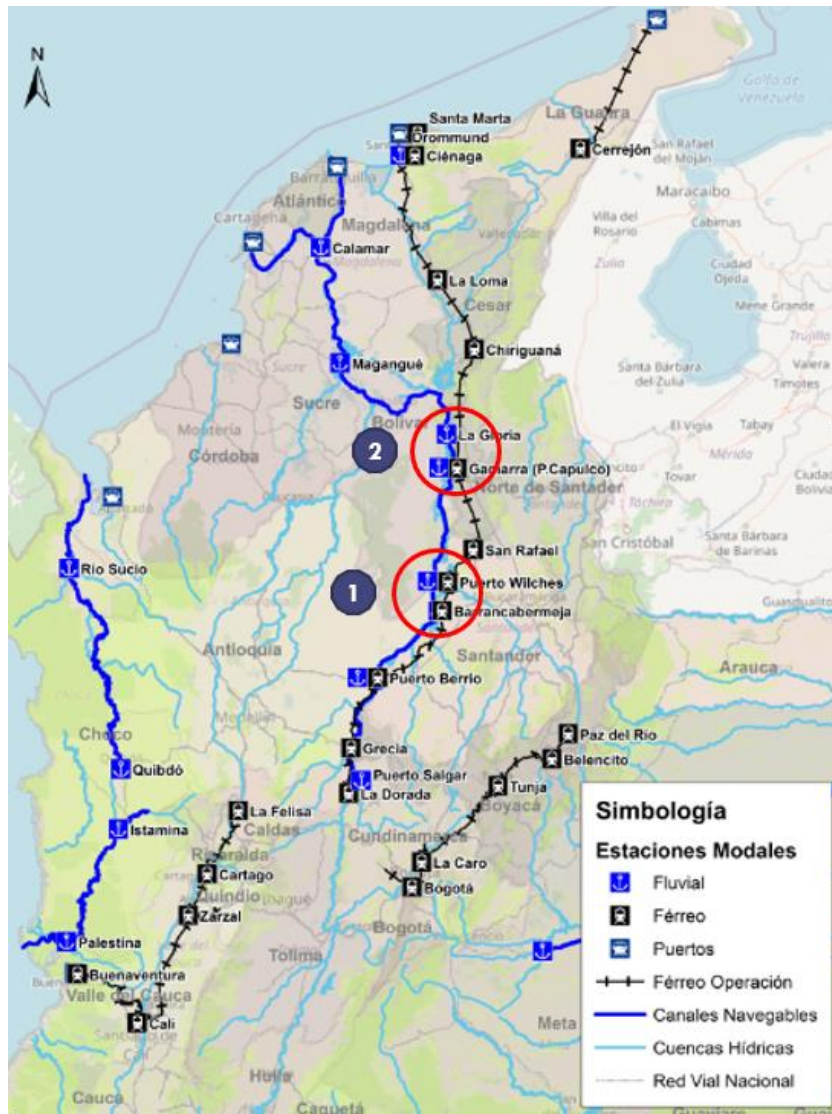
Fuente: Elaboración propia con base en Plan Maestro Fluvial, 2015 y Plan Maestro Férreo, 2020

La figura mostrada, nos permite identificar el objetivo principal de la red multimodal de los años 60s y 70s en donde se buscaba conectar los principales centros de producción y consumo de mercancías de una forma ágil con los nodos de comercio exterior de la costa Caribe y Pacífica del país, no obstante, si nos concentramos en la red operativa actual del país en materia de infraestructura férrea y fluvial y la actualidad del transporte de mercancías de estos modos de transporte encontramos una desconexión importante (y casi total) de este objetivo por la que fue implementada en donde los grandes distritos comerciales y financieros del interior del país: Bogotá, Medellín, Cali y Cúcuta carecen de la infraestructura de “última milla” para abordar sus productos directamente desde el origen de la carga hasta su destino final (puertos). Esta condición, genera una nueva necesidad en materia logística que posibilite la multimodalidad en el territorio y permita complementariedad en los modos de transporte, en este caso particular, utilizar las facilidades de permeabilidad y accesibilidad del transporte carretero en las urbes e integrar con la red férrea y/o fluvial en los tramos regionales donde estos tienen ventajas competitivas por economías de escala en su capacidad de transporte.

Ante esta nueva necesidad, que en la actualidad es la apuesta de la nación en materia de logística y transporte de carga, es adecuado realizar un análisis de detalle que permita reconocer las facilidades (infraestructura de soporte) con la que cuentan los operadores de la red (férrea y fluvial) - y en este mismo sentido los generadores de la carga – para articular la operación carretera con los medios de transporte complementarios, tal como se muestra en la **Figura 4-2**.

La oferta de nodos logísticos del país (norte) consolida un total de 21 estaciones férreas y 16 estaciones fluviales que están dispuestas para generar la articulación y complementariedad de modos de transporte que permitiría a los generadores tener a disposición una red integrada y no proyectos individuales, sin embargo, en la realidad operativa el territorio nacional se tiene una limitante de únicamente dos (2) nodos multimodales que permite una integración física de los modos carretero, férreo, fluvial e inclusive, en el caso de Barrancabermeja, por oleoductos. Los dos nodos multimodales mencionados se presentan en la **Figura 4-2** y corresponden a los centros de operación en: Barrancabermeja – Puerto Wilches del departamento de Santander (1) y Puerto Capulco – La Gloria (2) en el departamento de Cesar, ambos sobre el corredor La Dorada – Chiriguana.

**Figura 4-2:** Infraestructura de soporte en la red férrea y fluvial del norte país



Fuente: Elaboración propia con base en Plan Maestro Fluvial, 2015 y Plan Maestro Férreo, 2020

En este orden de ideas, el proyecto férreo Tren del Carare, permitiría a la región Cundiboyacense dar conexión con el nodo multimodal de Barrancabermeja y brindar conexión continua con el norte del país y los servicios portuarios de la Costa Caribe.

Finalmente, los acercamientos que se realizaron con actores claves en la operación de sistema férreo y multimodal del país, en especial con funcionarios de la ANI y el antiguo operador férreo Ibines Férreo S.A. en el marco de la presente investigación, entrevistó una condición adicional de la infraestructura de soporte actual que ha limitado el



reposicionamiento del modo férreo y su conexión con el canal navegable del Río Magdalena y corresponde al estado físico y operativo de las estaciones de transferencia las cuales en su gran mayoría se encuentran en regular y mal estado generando ineficiencias en la operación de transferencia de mercancías y la negativa de un gran número de empresarios para apostar por el multimodalismo. Para entender dicha condición la figura a continuación presenta el movimiento máximo de carga que se ha reportado desde el 2019 al 2021 en cada una de las estaciones modales del norte del país.

**Figura 4-3:** Volumen máximo de carga movilizado en las estaciones modales del país (2018 – 2021)



Fuente: Elaboración propia con base en cifras del Ministerio de Transporte “Transporte en Cifras” de los años 2018 a 2021

Es indudable que los nodos que mayor volumen de carga movilizada por modo férreo y fluvial son las operaciones portuarias de los tres principales puertos de la Costa Caribe y las operaciones privadas del Cerrejón y Puerto Drummond (La Loma – Santa Marta), sin embargo, al observar la generalidad de la red se puede evidenciar las limitantes mencionadas por la ANI e Ibines Férreo S.A. en donde primeramente la totalidad de la red del Pacífico se encuentra inoperativa comercialmente limitándose a segmentos de uso privado de baja magnitud y en segundo lugar se depura la infraestructura que permite multimodalidad real con las siguientes características:

**Férreo:**

- **Belencito:** estación utilizada por las empresas Argos S.A. y Acerías Paz del Río usuarios mayoritarios en el corredor y cuya ventaja reside en que la estación del tren (argos) y el corredor férreo (Paz del Río) se encuentra en sus instalaciones reduciendo la necesidad de primera milla.
- **Estación KM 5 (Bogotá):** cuenta con instalaciones adecuadas para la recepción de mercancías provenientes de Boyacá con una bodega (propiedad de Argos S.A.) para el almacenamiento y distribución final.
- **La Dorada:** Conexión más próxima a Bogotá en donde se ha desarrollado operación multimodal con gran iniciativa del gobierno nacional; no cuenta con servicios logísticos especializados por lo cual el recurso humano y de maquinaria es importante.
- **Gamarra:** Al igual que la estación de la Dorada, este nodo ha permitido movimiento de mercancía con conexión desde Barranquilla hasta Bogotá por el Río Magdalena, sin embargo, carece de infraestructura logística especializada.
- **Chiriguana:** Si bien no es un nodo en donde se genere/atraiga gran cantidad de mercancía, representa la continuidad y articulación de la totalidad del corredor central.

En general, las demás estaciones férreas, carecen de infraestructura logística que permita a sus usuarios optar por una operación multimodal de forma eficiente y están dispuestas en gran medida para realizar servicios de inspección de la carga y control de la operación férrea.

## Fluvial

- **Barrancabermeja:** Brinda servicio al transporte del producto de la explotación petrolera de la región, a través de una operación coordinada que ha desarrollado la empresa Ecopetrol en las últimas décadas (fluvial – oleoductos), no obstante, no presenta facilidades para una conexión eficiente con el modo férreo ni carretero.
- **Puerto Capulco (Gamarra):** En articulación con lo mencionado en la estación férrea, el puerto ha permitido una operación multimodal en el país liderada por el gobierno nacional que permite el transporte de mercancías desde Barranquilla hasta Bogotá, no obstante, aún existen grandes oportunidades de optimización en esta cadena de abastecimiento que permita una operación continua (canal navegable) y eficiente (tiempos y costos)

Las particularidades de estos corredores multimodales se abordará como conclusiones de las encuestas y mesas de trabajo con los diferentes Stakeholders en donde se identificaran algunas particularidades de esta red, no obstante, se puede observar que la articulación entre proyectos modales para el transporte de mercancías no se define únicamente por la longitud de sus corredores y la implementación o rehabilitación de sus tramos sino que requiere la inversión en la infraestructura de soporte y la facilidades (operativas, tecnológicas y de instalaciones) que permitan una realidad multimodal en el país.

### 4.3 Caracterización del movimiento de carga por carretera susceptible de utilizar el Tren del Carare

Si bien el contexto nacional, en toda su extensión, desborda el impacto que pueda tener el proyecto Tren del Carare, es importante conocer las dinámicas de movilidad del país en materia de transporte de carga con el fin de percibir las magnitudes de los flujos de transporte y la participación de la región Cundiboyacense en la generación y atracción de mercancías. Para este fin, se toma como información primaria para el análisis de las dinámicas de movilidad las bases de datos del Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC) el cual es un sistema o plataforma disponible en la página del Ministerio de Transporte que permite recibir, validar y transmitir la información generada en las operaciones del Servicio Público de Transporte de Carga por Carretera.

Al respecto es importante precisar que después de indagar distintas fuentes de información, se considera esta como la más pertinente como base para la estimación de los patrones de viaje de carga ya que el RNDG considera toda la carga reportada por las Empresas de Transporte habilitadas por el Ministerio de Transporte para prestar el Servicio Público de Transporte de Carga por Carretera en el territorio nacional ya que estas deben registrar obligatoriamente sus operaciones.

Para la caracterización del movimiento de carga nacional se construyó una base de datos con los registros disponibles en la plataforma para la totalidad del año 2021 en donde es posible analizar variables como tipologías vehiculares, municipio de origen y destino, descripción de la mercancía, operación con contenedor y las toneladas movilizadas en el viaje. Es así como en la **Tabla 4-1** se presentan el total de los 127 millones de toneladas que se movilizaron en cerca de 9,5 millones viajes en el país clasificadas en los diferentes segmentos establecidos, llama la atención que cerca del 61% de la carga que se mueve en el país se concentra en carga general (incluye materiales de construcción) y granel sólido, y que tan sólo el 2,8% de la carga que se mueve en el país sea contenerizada.

**Tabla 4-1:** Total de carga nacional por segmento de demanda

| Segmento             | Subsegmento                        | Carga (Ton/Año) | %      |
|----------------------|------------------------------------|-----------------|--------|
| Carga general        | Misceláneos                        | 35.953.480      | 28,24% |
| Granel sólido        | Materiales de construcción         | 27.628.923      | 21,70% |
| Granel sólido        | Cereales y tortas                  | 14.506.506      | 11,39% |
| Carga general        | Alimentos                          | 10.491.517      | 8,24%  |
| Carga general        | Carga peligrosa                    | 6.802.618       | 5,34%  |
| Granel sólido        | Carbón                             | 6.177.784       | 4,85%  |
| Granel sólido        | Minerales                          | 5.594.650       | 4,39%  |
| Granel líquido       | Hidrocarburos                      | 4.390.015       | 3,45%  |
| Carga general        | Productos químicos                 | 3.705.825       | 2,91%  |
| Contenedores         | Productos varios                   | 2.457.339       | 1,93%  |
| Carga general        | Refrigerados                       | 2.236.897       | 1,76%  |
| Industria automotriz | Vehículos y CDK                    | 1.848.403       | 1,45%  |
| Carga general        | Maquinaria                         | 1.533.577       | 1,20%  |
| Carga general        | Textiles y sus Manufacturas        | 1.276.675       | 1,00%  |
| Contenedores         | Contenedores vacíos (compensación) | 1.190.901       | 0,94%  |
|                      | Granel líquido                     | 1.048.647       | 0,82%  |
| Carga general        | Animales vivos                     | 468.784         | 0,37%  |
| Contenedores         | Contenedores cisterna              | 3.795           | 0,00%  |

| Segmento     | Subsegmento | Carga (Ton/Año)    | % |
|--------------|-------------|--------------------|---|
| <b>Total</b> |             | <b>127.316.338</b> |   |

Fuente: Elaboración propia con base en RNDC, 2021

Por otro lado, un aspecto importante a la hora de caracterizar el movimiento de carga del país se puede realizar evaluando la relación toneladas/viaje de manera que se establezca el lote promedio, que determinará indirectamente la participación de las tipologías vehiculares que realizan con mayor significancia el transporte de mercancías a nivel nacional. Tal y como se presenta en la **Tabla 4-2** se evidencia que la mayor cantidad de la carga, un 53% se concentra en lotes promedio de 30 – 40 toneladas, lo que corresponde a la capacidad típica de una tractomula, sin embargo, no es despreciable la carga que se moviliza en lotes inferiores a las 30 toneladas y en especial el porcentaje de carga movilizada en lotes menores de 15 toneladas equivalentes a un 22% y representan un movimiento de carga en vehículos de baja capacidad que no son, en términos de costo, los más eficientes para transitar en largos recorridos.

**Tabla 4-2:** Lote promedio - relación toneladas/viaje

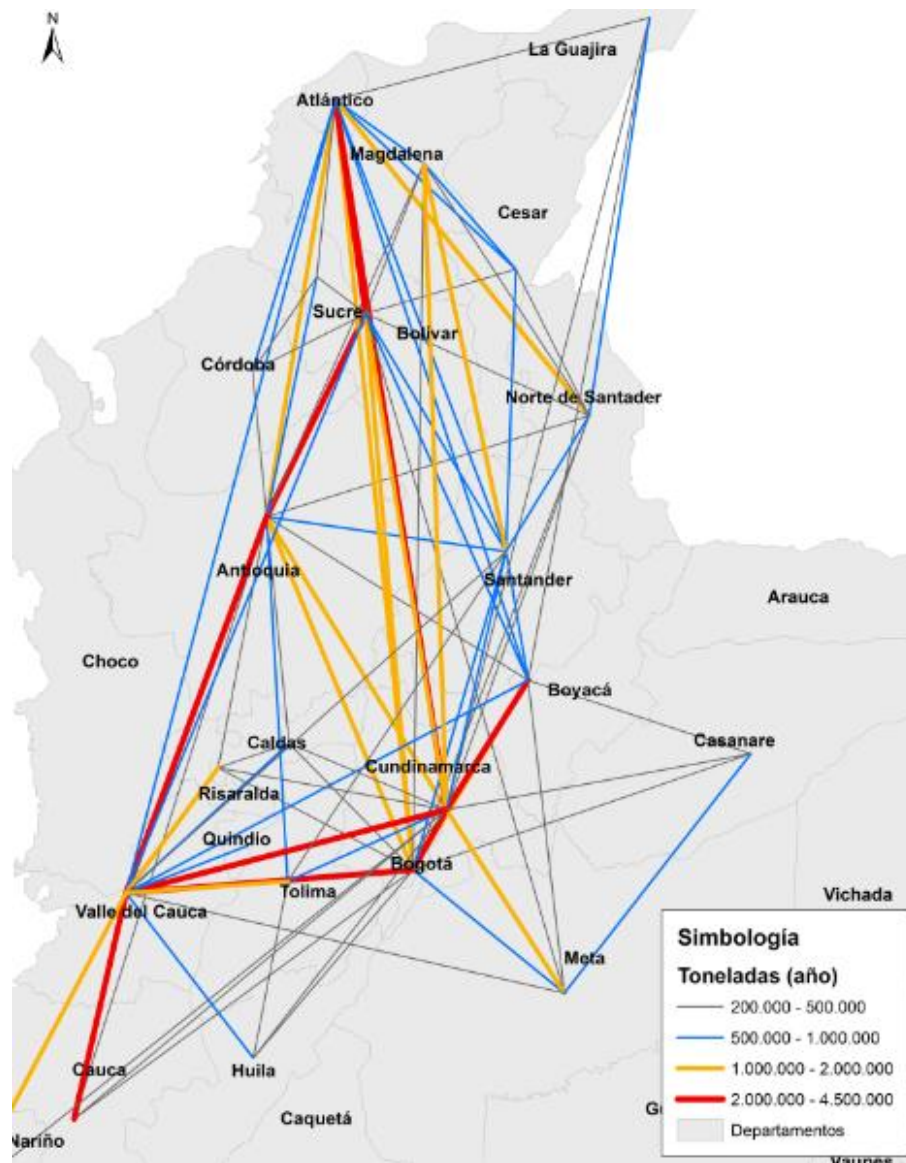
| Ton promedio por lote | Carga (Ton)        | %      |
|-----------------------|--------------------|--------|
| 0-5                   | 9.333.036          | 7,33%  |
| 5-10                  | 11.988.896         | 9,42%  |
| 10-15                 | 6.944.996          | 5,45%  |
| 15-20                 | 7.692.121          | 6,04%  |
| 20-25                 | 6.039.559          | 4,74%  |
| 25-30                 | 8.532.458          | 6,70%  |
| 30-35                 | 68.027.300         | 53,43% |
| 35-40                 | 8.743.320          | 6,87%  |
| 40-45                 | 168                | 0,00%  |
| 45-50                 | 2.141              | 0,00%  |
| 50-55                 | 5.935              | 0,00%  |
| >=60                  | 6.408              | 0,01%  |
| <b>Total</b>          | <b>127.316.338</b> |        |

Fuente: Elaboración propia con base en RNDC, 2021

Para enfocar el diagnóstico nacional al corredor de influencia del caso de estudio, se desarrollaron líneas de deseo que permiten observar la relación de la región Cundiboyacense con las diferentes zonas o regiones del país. En la **Figura 4-4** se evidencian los principales nodos de generación y atracción de viajes en donde sobresalen los departamentos de Cundinamarca (incluida Bogotá D.C.), Antioquia, Valle del Cauca y

Atlántico y en donde la suma de la carga generada por los departamentos de Cundinamarca (incluye Bogotá D.C.) y Boyacá suman un total de 30.6 millones de toneladas anuales generadas (producción) y 30.0 millones de toneladas atridas (consumo) equivalentes al 24,7% y 24,2% del total nacional respectivamente. Cabe la pena resaltar que estas cifras incluyen los cerca de 1,46 y 1,93 millones de toneladas de carbón producidos en Boyacá y Cundinamarca en el año 2021 y que guardan adecuada relación con lo reportado por el Ministerio de Minas y Energía “Minería de Carbón en Colombia Transformando el Futuro de la Industria, 2021”

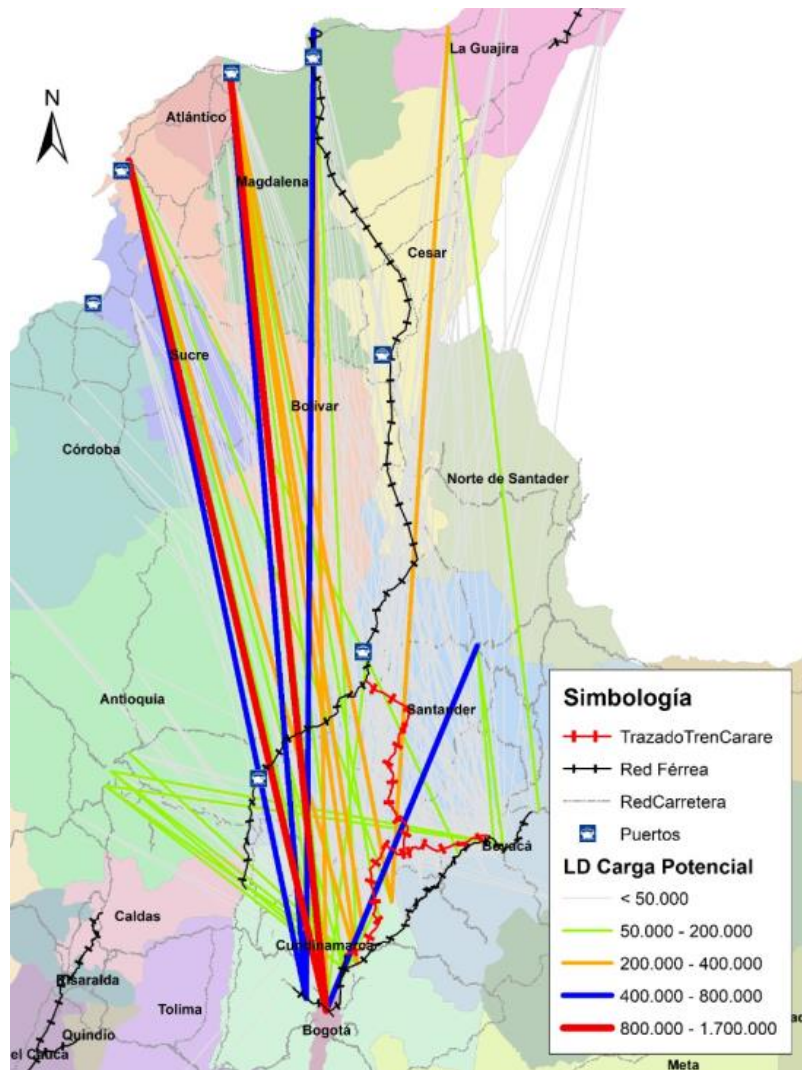
**Figura 4-4:** Movimiento de carga en toneladas del país en el año 2021



Fuente: Elaboración propia con base en RNDC, 2021

Las conexiones o líneas de deseo más significativas para la región que se verá impactada por la implementación del Tren del Carare corresponden a la carga de Bogotá, Cundinamarca y Boyacá con los departamentos Atlántico y Magdalena buscando una salida ágil de comercio exterior y de forma conjunta todas las diferentes conexiones hacia el departamento de Bolívar y Santander que si bien no presentan la misma magnitud de carga, son igualmente importantes para el desarrollo económico de las regiones. La conexión con Antioquia desde Bogotá y Cundinamarca ha de ser evaluada con detalle en el capítulo del estudio de caso debido a que podría tener un potencial de captación adicional para el proyecto.

**Figura 4-5:** Movimiento de carga en toneladas con origen o destino la región Cundiboyacense en el año 2021 (Líneas de deseo)



Fuente: Elaboración propia con base en RNDC, 2021

La **Figura 4-5**, presenta las líneas de deseo únicamente de aquellas conexiones que tiene la región Cundiboyacense con las demás regiones del país, corroborando el gran diamante Caribe como aquellos con mayor interacción comercial para la exportación e importación de insumos y productos reportando líneas de deseo por encima de 1 millón de toneladas anuales (a nivel de municipios) y, adicionalmente, los departamentos de Antioquia y Santander como ejes de comercio domestico entre las regiones.

Desde la Figura anterior se puede acotar el diagnóstico del movimiento de carga, desde lo general del país a lo particular de la zona de estudio a través de la delimitación de los patrones de carga en el departamento de Cundinamarca y Boyacá establecidos en la base de datos del RNDC para el año 2021. En este sentido, la **Tabla 4-3** presenta la clasificación de la carga que tiene como origen o destino la región Cundiboyacense.

**Tabla 4-3:** Total de la carga generada en la región Cundiboyacense por segmento de demanda

| Segmento             | Subsegmento                        | Carga (Ton/Año)   | %      |
|----------------------|------------------------------------|-------------------|--------|
| Carga general        | Misceláneos                        | 6.017.063         | 29,42% |
| Granel sólido        | Materiales de construcción         | 3.617.774         | 17,69% |
| Granel sólido        | Carbón                             | 2.568.171         | 12,56% |
| Granel sólido        | Cereales y tortas                  | 2.097.698         | 10,26% |
| Carga general        | Alimentos                          | 1.229.382         | 6,01%  |
| Carga general        | Carga peligrosa                    | 978.948           | 4,79%  |
| Granel líquido       | Hidrocarburos                      | 902.459           | 4,41%  |
| Carga general        | Productos químicos                 | 612.057           | 2,99%  |
| Granel sólido        | Minerales                          | 565.054           | 2,76%  |
| Industria automotriz | Vehículos y CDK                    | 385.872           | 1,89%  |
| Carga general        | Refrigerados                       | 365.209           | 1,79%  |
| Contenedores         | Productos varios                   | 314.401           | 1,54%  |
| Contenedores         | Contenedores vacíos (compensación) | 226.754           | 1,11%  |
| Carga general        | Maquinaria                         | 193.607           | 0,95%  |
|                      | Granel líquido                     | 191.892           | 0,94%  |
| Carga general        | Textiles y sus Manufacturas        | 173.451           | 0,85%  |
| Carga general        | Animales vivos                     | 8.529             | 0,04%  |
| Contenedores         | Contenedores cisterna              | 2.632             | 0,01%  |
| <b>Total</b>         |                                    | <b>20.450.951</b> |        |

Fuente: Elaboración propia con base en RNDC, 2021



La tabla nos permite delimitar el potencial de captación de carga del Tren del Carare el cual alcanza los 20,4 millones de toneladas anuales de los cuales el 70% se concentra en carga general, productos de construcción, carbón/minerales y carga a granel (cereales y tortas) siendo los segmentos de carga de mayor interés para la aplicación de los instrumentos de captura de información relacionada a las variables de decisión. De las 20,4 millones de toneladas, 12,6 millones son directamente potenciales en cuanto a que su origen y/o destino se encuentra en la zona de influencia directa del proyecto férreo, es decir el nodo de producción o consumo de la carga se próximo a la estación de transferencia del proyecto Tren del Carare y permite realizar de una forma más eficiente los trayectos de última milla o prescindir de ellos en una operación logística integral; los restantes 7,9 millones de toneladas anuales requieren de una evaluación más detallada y de estrategias comerciales innovadoras por parte del operador de la red férrea debido a que sus zonas de producción o consumo requiere de entre uno (1) o dos (2) trayectos de última milla en su cadena logística para dar conexión a la(s) estación(es) férreas más cercanas y por ende los costos y tiempos asociados al trayecto carretero y cargue/descargue de mercancías deben ser competitivos para que no desborden los beneficios de la multimodalidad.

Finalmente, en cuanto a lote promedio de transporte existe una equivalencia importante respecto al análisis nacional realizado a la totalidad de la carga reportada en el RNDC 2021 distinguiendo una mayoritaria participación (60,4%) de vehículos de alta capacidad de transporte lo cual representa una alta vocación para sistemas multimodales. Por el contrario, la baja participación de la carga contenerizada denota un área de oportunidad muy amplia para el proyecto y para la nación debido a que internacionalmente corresponde a la forma de transporte de carga (embalaje) más eficiente para operaciones multimodales por las facilidades y homogenización de maniobra y manipulación, no obstante, su baja participación en el país y la zona de estudio es marcada y limitada menos del 2% en ambos casos.

## 5. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FACTORES DE DECISIÓN

Posterior a la selección de los usuarios potenciales del proyecto, como una identificación de las cadenas logísticas (líneas de deseo) que son susceptibles de complementar sus deseos de viaje a través del proyecto Tren del Carare, es procedente la identificación y cuantificación de las variables que inciden en la elección de las cadenas logísticas empleadas por los generadores de cada segmento de mercado y, por medio de su comparación con las características de las alternativas utilizadas actualmente por modo carretero, determinar la probabilidad de atracción de toneladas al corredor férreo analizado, empleando un modelo logit de elección discreta (Capítulo 7).

Para el desarrollo de este segmento de la investigación cuyo objetivo es la identificación de las variables de elección preponderantes que consideran los diferentes tomadores de decisiones de las cadenas logísticas, así como todos los actores relacionados, se contemplaron tres etapas fundamentales para su desarrollo:

- i. Los generadores de carga, y sus representantes en materia logística, perciben los procesos de la cadena de abastecimiento de una forma natural desarrollada a través de la experiencia del sector, motivo por el cual, la primera etapa del desarrollo del objetivo corresponde a la búsqueda de información documental relacionada con la modelación del transporte de carga, las variables que se han utilizado para la estimación de modelos de elección discreta y selección de alternativas logísticas y, parámetros de referencia en cada una de las variables indagadas en los procesos logísticos que permita acercamientos más fluidos y que logren el mayor provecho para la investigación.
- ii. Posterior al análisis de la información documental y la consolidación de una base de variables de elección, se realizó una campaña masiva de acercamiento con

stakeholders del sector logístico de la región Cundiboyacense y Santander, adelantando un proceso de interacción con agremiaciones como la ANDI, cámaras de comercio, entidades gubernamentales tales como Procolombia, Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) con su experiencia en la operación de la red férrea la Dorada – Santa Marta, grandes, medianos pequeños generadores de diferentes tipos de carga de interés para el proyecto; así mismo, se realizó un acercamiento a la academia mediante el contacto con instituciones como la Universidad Nacional de Colombia en su grupo de investigación SEPRO y, finalmente, el acercamiento con el antiguo operador férreo Ibines Férreo S.A. cuyo conocimiento particular del modo de transporte constituye una de las principales fuentes de información para la cuantificación de las variables de decisión y del análisis logístico del proyecto estudio de caso. Con el fin anterior, se identificaron las empresas y actores relacionados en la región a quienes se les aplicó una entrevista de caracterización dirigida a los gerentes, jefes, coordinadores o directores de logística.

- iii. Esta etapa consistió en el análisis conjunto de la información recolectada en las diferentes mesas de trabajo desarrolladas lo cual permitió reconocer el proceso logístico actual de las empresas de la región, las necesidades para la optimización de la logística, la percepción del modo férreo y del proyecto e, identificar a nivel cualitativo, y posteriormente cuantitativo (Capítulo 6.4), variables de decisión en materia logística de los usuarios potenciales del proyecto.

## **5.1 Búsqueda de variables de elección basados en fuentes de información documental**

En esta primera etapa se acudió al análisis detallado y estructurado de información documental (artículos, posts, libros, tesis, etc.) que permitiera consolidar una base de posibles variables de elección modal cuya evaluación sea susceptible de incorporarse en una herramienta de modelación discreta. La búsqueda de información se desarrolló de forma controlada en la cual, para cada información consultada, se generaron ficheros con información general como título, autores y fecha de publicación, pero también con información específica que permitió definir y delimitar su uso en fases posteriores de la presente investigación.

En la primera etapa de la investigación se realizó la búsqueda de variables inherentes al transporte de carga utilizadas o investigadas por diferentes autores, desde el postulado que el transporte de carga, a diferencia de la modelación típica del transporte de vehículos, requiere del uso de parámetros adicionales al tiempo y costo que permitan una representación más precisa de los flujos de mercancías y, en consecuencia, insumos de mayor exactitud para los tomadores de decisiones en materia de logística y transporte en el territorio nacional.

Las diferencias metodológicas aplicadas por diferentes investigadores en torno a la búsqueda de nuevas y mejores técnicas para modelar la demanda de viajes de carga en las diferentes etapas del modelo clásico de transporte: generación, distribución, selección modal o de ruta y asignación en la red de transporte, al igual que la variabilidad aplicativa de estas investigaciones a lo largo de la cadena de abastecimiento de pequeñas, medianas y grandes superficies o empresas, permiten delimitar, de igual forma, una gran cantidad de factores que pueden explicar en mayor y menor proporción los factores que determinan la selección de un medio o un conjunto de medios de transporte para movilizar mercancías desde un origen a su destino.

La **Tabla 5-1** resume los principales hallazgos de la investigación documental realizada y determina el punto de partida para la consolidación de los factores a ser presentados a los generadores de carga en las encuestas y mesas de trabajo a ser desarrolladas como parte de la toma de información primaria de la presente investigación.

**Tabla 5-1:** Consolidado de principales investigaciones documentales en torno a los factores de decisión en el transporte de carga

| <b>Investigación</b>  | <b>Autor(es)</b>   | <b>Factores de decisión</b>   | <b>Contexto de la investigación</b>  |
|---|--|---|--|
| Valuing freight transport time using transport demand modelling (2011)  | Feo-Valero, M., García-Menéndez, L., & Garrido-Hidalgo, R. | Modo de transporte, Región geográfica, Distancia Origen Destino, Valor comercial de la carga, perecibilidad de la mercancía.  | Investiga la heterogeneidad que se presenta en los flujos de mercancías de acuerdo a factores que intervienen en el proceso de transporte considerando dos segmentos de demanda: pescado fresco y pescado congelado en el cual el primero da lugar a un Valor del Tiempo mayor.  |
| A disaggregate model of the demand for intercity freight transportation (1981).                                 | Winston, C   | Tamaño de la empresa (# empleados), Actividad comercial principal, Frecuencia de envío de productos, Tipo de mercancía  | Desarrolla un modelo tipo Logit para determinar la demanda de carga entre diferentes ciudades de Estados Unidos considerando características propias de la empresa y su actividad comercial y diferentes tipos de mercancías.  |
| European Common Transport Policy and Short-Sea Shipping: Empirical evidence based on modal choice models (2009) | García - Menéndez, L., & Feo- Valero, M.                   | Costo y Tiempo, Frecuencia de envío, Flexibilidad del sistema (accesibilidad), Fiabilidad en los tiempos de entrega, Perdidas de mercancía, tamaño del envío, propiedad de flota de transporte. | Estimación de un modelo de elección considerando variables que van más allá del costo y el tiempo de viaje y que dan respuesta a la creciente complejidad de las cadenas logísticas sectoriales. La investigación tiene como objetivo encontrar los determinantes de las decisiones de elección de modo para los españoles |
| Optimization of a combined export coal transport network from the interior of Colombia                          | Márquez, Luis Gabriel                                      | Costos de operación, velocidad de operación (red), medios de transporte disponibles, Costos de transferencia (cargue, descargue, almacenamiento y manejo).                                      | La investigación tiene el propósito de identificar las rutas óptimas del carbón desde los distritos de producción localizados en el interior del país hasta los puertos marítimos de exportación, basados en la solución de un problema de mínimo costo considerando la  |

| Investigación  | Autor(es)                                | Factores de decisión  | Contexto de la investigación   |
|--|--|---|--|
|  |  |   | totalidad de las interacciones necesarias en un sistema multimodal: carretero, férreo y fluvial.   |
| Modelo de Transporte de Mercancías para la Planificación de Sistemas Multimodales (2015)           | García del Valle, A., Crespo Pereira, D. | <p>SIMILE+<br/>Valor comercial de la mercancía, tamaño y frecuencia del envío, acceso a vías principales, capacidad del medio de transporte.</p> <p>Investigación<br/>Tiempo y costo, número de transferencias, costo manipulación de la carga en nodos, restricciones de circulación de carga, sostenibilidad del medio de transporte, porcentaje de retrasos en la entrega, frecuencia de servicio.</p> | La investigación busca desarrollar un modelo completo de transporte de mercancías que permita la evaluación de diferentes sistemas multimodales basados en simulación.   |
| Evaluación Multicriterio: Multiactor de estrategias de transporte de carga en La Candelaria (2015) | Rubio Villamil, R.                       | Tiempo, costo, emisiones contaminantes, esquema actual de operación, calidad del manejo de la mercancía en la entrega (daños y tiempo), seguridad de los vehículos (robo).  | El objetivo de la investigación fue <i>"evaluar estrategias de transporte de carga desde el punto de vista de los actores involucrados, con el fin de determinar los factores que hacen que una estrategia sea exitosa y resulte eficiente para las operaciones logísticas del transporte de carga a nivel local."</i> |

| Investigación   | Autor(es)  | Factores de decisión   | Contexto de la investigación   |
|---|--|--|--|
| An Experimental Economics Investigation of Shipper-carrier Interactions in the Choice of Mode and Shipment Size in Freight Transport (2009) | Jose Holguín-Veras & Ning Xu & Gerard de Jong & Hedi Maurer.   | Tamaño del envío, capacidad del medio de transporte, medios de transporte disponibles, frecuencia de entrega, confiabilidad del servicio, accesibilidad a los centros de producción, seguridad (integralidad) de la carga, costo.                                      | La investigación evalúa las interacciones entre el generador de la carga y el transportador como medida de elección del modo (conjunto de modos) para movilizar la carga en una operación totalmente coordinada entre los dos actores de mayor preponderancia en la cadena de abastecimiento.  |
| Freight mode choice: Results from a nationwide qualitative and quantitative research effort (2021).   | José Holguín-Veras, Lokesh Kalahasthi, Shama Campbell, Carlos A. González-Calderón, Xiaokun (Cara) Wang. | Frecuencia de pedidos, costo logístico total, costo de pérdidas o daños en la mercancía, confiabilidad en el tiempo de entrega, tiempo de tránsito, valor comercial del envío, accesibilidad a terminales o nodos intermodales, tamaño del envío, calidad del servicio | La investigación se centró en estudiar aspectos fundamentales en la elección del modo para el transporte de carga en los Estados Unidos, a través de entrevistas con generadores, transportistas y receptores de las mercancías. La investigación utilizó técnicas cualitativas y cuantitativas en las cuales se determinaba información sobre los factores que influyen en la elección de modo y su implementación a través de modelos econométricos. |
| Freight Generation Models Comparative Analysis of Regression Models and Multiple Classification Analysis (2009).                            | Carlos Bastida., José Holguín-Veras.   | Costo de transporte, tamaño y tipo de establecimiento comercial (receptor), tipo de producto, Tipo de embalaje.  | La investigación realiza un análisis comparativo de dos enfoques alternativos para el modelado de generación de carga: mínimos cuadrados ordinarios (OLS) y clasificación cruzada basados en la relación entre el número de entregas y un conjunto de atributos asociados, principalmente, a las empresas como variables dependientes de las ciudades de Manhattan y Brooklyn, Nueva York en Estados Unidos.   |

| Investigación   | Autor(es)  | Factores de decisión   | Contexto de la investigación   |
|---|--|--|--|
| Investigation of Attributes Determining Trip Chaining Behavior in Hybrid Microsimulation Urban Freight Models (2008).             | Qian Wang, José Holguín-Veras.   | Duración del viaje, distancia OD, disponibilidad de carga en el destino (compensación).  | La investigación propone <i>"un marco de modelado híbrido de microsimulación para construir recorridos de vehículos relacionados con mercancías que satisfagan una matriz conocida de origen-destino (OD) de flujo de mercancías en una red urbana de carga."</i>  |
| Modelling urban freight generation: A case study of seven cities in Kerala, India (2018).   | Agnivesh Pani, Prasanta K. Sahu, Gopal R. Patil, Ashoke K. Sarkar.                           | Tamaño de la empresa (# empleados), esquema de operación,  | La investigación se centra en el primer paso del modelo de transporte correspondiente a la generación de viajes (en este caso generación de carga) para siete ciudades en Kerala, India. Los hallazgos estadísticos de estos modelos sugieren que las actividades de carga están influenciadas por la interacción de las características del establecimiento y su ubicación. |
| State of the art and practice of urban freight management Part II: Financial approaches, logistics, and demand management (2020). | José Holguín-Veras, Johanna Amaya Leal, Ivan Sanchez-Diaz, Michael Browne, Jeffrey Wojtowicz | Tamaño de los establecimientos comerciales (receptores), distancia de conexión con vías principales (autopistas), Flete, confiabilidad de las entregas (tiempo y accidentes), tercerización de transporte. | La investigación analiza la atracción de viajes de carga en el contexto urbano y su relación con las características del entorno urbano, la red de transporte y los usos de suelo del área de estudio en la ciudad de Nueva York.  |
| Encouraging intermodality: A stated preference analysis of freight mode choice in Rio Grande do Sul (2017).                       | Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A.   | Costo total de transporte incluyendo costos asociados a las maniobras de transferencia, tiempo total de transporte, porcentaje de entregas a tiempo, porcentaje de envíos con retrasos de más de dos días. | La investigación se desarrolló sobre la necesidad de identificar las preferencias de los gerentes de logística y evaluar las decisiones de elección de diferentes alternativas de transporte de carga con atributos de costo, tiempo y confiabilidad del sistema.  |



| Investigación  | Autor(es)                                  | Factores de decisión   | Contexto de la investigación  |
|--|--|--|---|
| Modelling with joint choice of ports and countries of origin and destination: application to Colombian ports (2018).                   | Cantillo, J., Cantillo, V., & Arellana, J. | Costo de accesibilidad, frecuencia de servicio, tiempo, flete, distancia, tipo de carga, costos en nodos logísticos, disponibilidad de equipos de transferencia, desempeño de pérdidas y daños, información envío (TIC), tamaño del envío. | El estudio propone la hipótesis que la elección de elección de puerto depende del país de origen/destino de la carga y de las características de toda la cadena logística de la carga. Los resultados del estudio sugieren que “(...) <i>para las importaciones y exportaciones, la tasa de flete nacional es la variable más importante para el proceso de elección conjunta.</i> ”. |
| Modelo de elección de modo de transporte entre carretera y ferrocarril para carga general susceptible a exportación-importación (2013) | Pineda Jaramillo, J.P.                     | Costo de transporte, nodos de transferencia, frecuencia de servicio, seguridad vial, costos por contaminación, propiedad de los vehículos para el transporte, características de la empresa encuestada.                                    | El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal la determinación de las variables influyentes en la elección de modo en el transporte de carga en el departamento de Antioquia y la determinación del potencial de carga sobre el corredor Medellín – Puerto Cartagena   |

Fuente: Elaboración propia



Con el conocimiento desarrollado de la revisión de literatura especializada en la modelación de las decisiones de elección en el transporte de mercancías, la **Tabla 5-2** representa las variables con mayor número de menciones en artículos científicos y literatura de transporte en donde se representa con tonalidades más oscuras las más investigadas y reiterativas en la bibliografía consultada.

**Tabla 5-2:** Factores de decisión modal para el transporte de carga – Revisión de literatura

| Niveles de Análisis           | Criterio                                       |
|-------------------------------|--|
| Análisis logístico            | Tarifa de transporte                           |
|                               | Valor de las mercancías                        |
|                               | Confiabilidad del servicio                     |
| Características modales       | Tiempo de viaje                                |
| Análisis de producto          | Tamaño de embarque                             |
|                               | Tipo de emabalaje                              |
|                               | Tiempo de vida de la mercancía                 |
| Análisis geográfico           | Distancia (O-D)                                |
| características del generador | Conexión con autopista                         |
|                               | Esquema actual de operación                    |
|                               | Frecuencia de servicio/envío                   |
| Características modales       | Capacidad de Transporte                        |
|                               | Disponibilidad de equipos                      |
|                               | Calidad de manejo /reputación daños y pérdidas |
| Análisis operativo            | Costos y Tiempo de transacción y manejo        |
|                               | Costo de pérdidas y daños                      |

Fuente: Elaboración propia

Las variables más utilizadas en investigaciones y modelos de elección discreta para el transporte de carga en efecto corresponden a la tarifa de transporte, el tiempo de viaje y la distancia de la cadena logística, no obstante, variables adicionales cobran relevancia en la búsqueda documental y postulan decisiones más complejas en los tomadores de decisiones en materia logística y en la selección de medios de transporte que maximicen los beneficios esperados en la cadena de abastecimiento.

Dentro de estas variables se destaca la confiabilidad del servicio y la calidad de manejo y traslado de las mercancías. Estas dos variables juegan un papel importante en el transporte de mercancías en donde, la primera variable relaciona el cumplimiento de itinerarios preestablecidos en los generadores de carga como una necesidad de alta

relevancia no solo para la cadena de suministro sino también para la cadena de producción de las empresas y sus clientes y, la segunda variable afecta directamente el desempeño final del medio de transporte elegido (o secuencia de medios en una red multimodal) midiendo directamente el número de piezas o productos que han sufrido daño en el proceso de transporte o, en el caso de mercancías a granel y particulados, el porcentaje de pérdida (volumétrica y en peso) de lote enviado. En lo referente a la confiabilidad del servicio, en el territorio nacional se ve significativamente afectado el transporte de mercancías por carretera debido a frecuentes cierres en los corredores logísticos debido a causas como deslizamientos, protestas, accidentes viales, restricción de circulación, entre otras, tomando relevancia la complementariedad de medios de transporte como el ferrocarril cuya operación esta menos afectada por estos factores.

En una tercera categoría (tonalidad) se encuentran otras variables como la frecuencia de envío de productos en las empresas y, en conjunto con el tamaño del lote o volumen de la carga, permiten establecer la disponibilidad de medio de transporte que debe ofertar un operador logístico a una empresa según sus necesidades particulares de producción como, por ejemplo, disponer de un contenedor cada dos días para el transporte de los productos. Costos asociados a manejo de la mercancía en nodos de transferencia modal y aquellos costos asociados a las pérdidas de mercancía en el proceso de transporte y multas asociadas a el no cumplimiento de itinerarios preestablecidos con clientes son otros costos que evalúan los generadores de carga (empresas) al momento de elegir un medio de transporte o proveedor del servicio de transporte por lo cual deben ser puestas a consideración en las herramientas de modelación y priorización de proyectos logísticos en el país.

## **5.2 Definición de variables preponderantes en la elección de los generadores de carga**

Con la consolidación de las variables presentadas anteriormente producto de la revisión documental, se procedió a indagar directamente con los generadores de carga las variables que más influyen en la elección de sus cadenas logísticas a través de la aplicación de encuestas en mesas de trabajo, adicional a su percepción y posición frente al proyecto y en general del movimiento de carga por los sistemas multimodales actuales que se ofertan en el país.

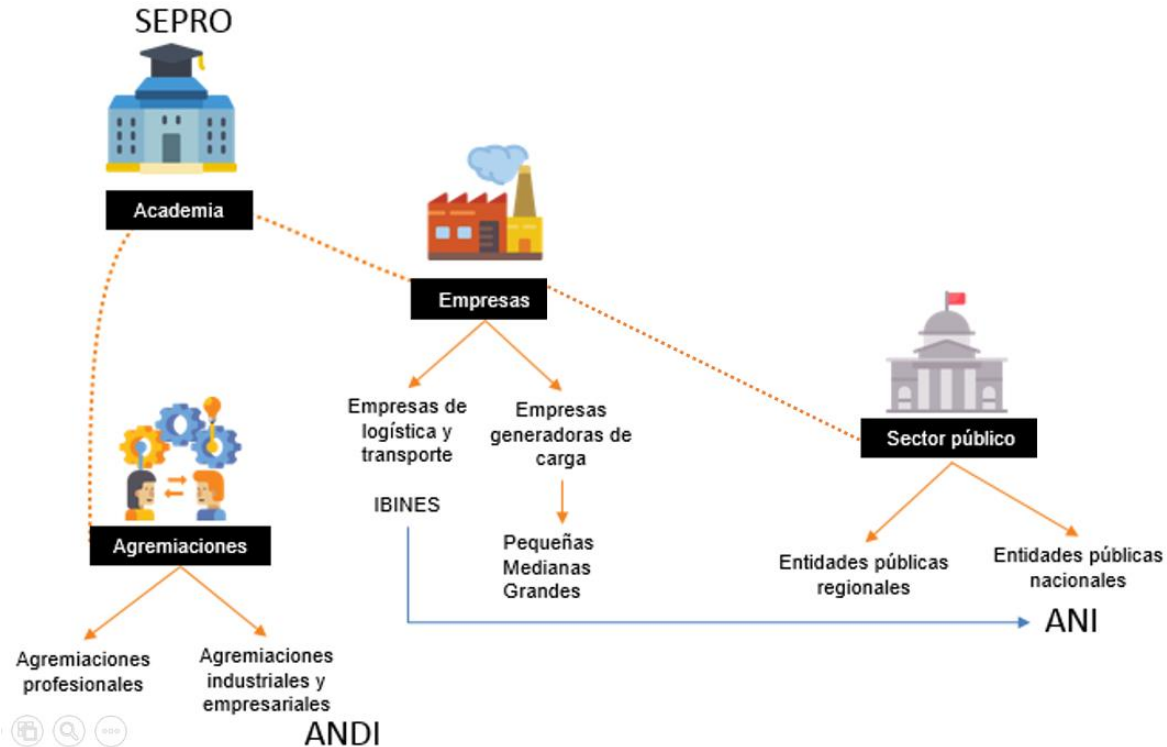
En este punto, es importante describir la articulación del desarrollo práctico de este apartado con lo definido en el Marco de Referencia y en especial con lo dispuesto en el Capítulo 2.2.1 reconociendo en este punto la contribución de dos componentes de la teoría de la utilidad aleatoria: **i)** la población homogénea “Q” que tiene perfecto conocimiento de las alternativas (medios de transporte de mercancías) lo cual se logra con el desarrollo de encuestas directamente a representantes en materia logística de las empresas generadoras y, **ii)** la búsqueda y consolidación de los atributos (o variables) “X” que influyen en la decisión de elección de una alternativa de transporte sobre un conjunto de alternativas disponibles “A” lo cual es fundamento de la Ecuación 1 en el Capítulo 2.2.1.

Lograr un acercamiento a los stakeholders de los diferentes niveles de participación en la cadena logística de las mercancías es fundamental en la etapa de diagnóstico de un proyecto de naturaleza multimodal. El conocer de primera mano las expectativas y las necesidades de los diferentes actores sin duda es una condición que determina el éxito del proyecto una vez se encuentre implementado y permiten marcar una pauta para la estrategia de modelación a aplicar, por esta razón el proceso de recopilación de información primaria toma una connotación más amplia hasta el punto de convertirse por sí sola en un detonante de la aprobación de un nuevo proyecto en la región.

Es así como la recopilación de la información primaria se realizó utilizando dos enfoques, el primero las reuniones con stakeholders de índole gubernamental y gremial dada la necesidad de conocer la perspectiva que tienen acerca de las necesidades de sus asociados y, en segunda instancia la realización de mesas de trabajo con empresarios generadores de carga y prestadores de servicios de transporte y logística.

La metodología para establecer los actores más representativos del sector del transporte y movimiento de mercancías de la región consistió en establecer una red de conocimiento alrededor del proyecto que permita identificar diferentes conceptos acerca de la implementación de un sistema de transporte multimodal. La red establecida se muestra a continuación en la **Figura 5-1**.

**Figura 5-1:** Mapeo de actores establecida para la etapa de caracterización de la operación logística actual y definición de variables de decisión.



Fuente: Elaboración propia

Se puede conceptualizar entonces cuatro (4) actores de alta relevancia hacia los cuales se enfocó los esfuerzos de acercamiento respecto de entidades y agremiaciones de la actividad de transporte debido a sus posibles aportes tanto técnicos como conceptuales, así:

- Academia - Sociedad, Economía, Productividad Universidad Nacional de Colombia (SEPRO):** Es un grupo de investigación en la línea de Supply Chain Management - Logística de la Universidad Nacional de Colombia. Su conocimiento y participación en proyectos de investigación y desarrollo de la administración de la cadena de abastecimiento nos permitió definir aspectos prácticos para la conceptualización de la prestación del servicio del nuevo proyecto y, conocer el estado de arte alrededor de proyectos de transporte de mercancías en el ámbito metropolitano.

Al respecto del proyecto estudio de caso, se considera adecuado que, para el Tren del Carare, al igual que la actual línea Bogotá - Belencito se debe mirar más allá del origen - destino, esto incluye cuestionar cómo se va a prestar el servicio y en especial cómo articular el tren a la logística de primera-última milla, en ese sentido el reto es el modelo de negocio haciendo referencia al tema logístico y al movimiento de carga interciudad. De igual forma, cualquier proyecto multimodal se debe tener una concepción de servicio completo para el generador, es decir, un servicio integral que aporte en: tiempo, ahorro e infraestructura, por tal motivo, es indispensable la coexistencia de los diferentes medios de transporte para exaltar sus ventajas competitivas en la cadena logística.

- **Sector público - Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y Agencia Nacional de Infraestructura (ANI):** Dos de las entidades gubernamentales que mayor contacto tienen con los diferentes actores de la cadena de abastecimiento (generadores y transportadores) son la Agencia Nacional de Infraestructura y la Asociación Nacional de Industriales. La ANI es la entidad encargada de la planificación y seguimiento de los diferentes proyectos de movilidad nacional y, a su vez representa el conocimiento pleno de la actividad de transporte en cada modo ofertado en el país para el transporte de mercancías y los nuevos objetivos de la nación para reactivar los subsectores del transporte y aumentar la competitividad de este. Por su parte la ANDI corresponde a un fuerte vínculo entre la academia, el sector transportador y los generadores de carga de la región; actualmente, la entidad lleva a cabo continuamente diferentes encuentros donde se exponen nuevos proyectos para la movilidad bienes y servicios y por medio de estos se exponen las percepciones de los actores directamente beneficiados o perjudicados.

En total se desarrollaron 3 encuentros con la participación activa de las dos entidades mencionadas: **i)** Reunión Asociación Nacional de Empresarios de Colombia la cual se constituyó como el primer acercamiento a los empresarios de la región a través de la ANDI en donde se precisaron aspectos importantes de la logística metropolitana y regional, se compartió la experiencia, desafíos y condiciones de la operación Bogotá – Belencito y se identificaron generadores clave a quienes se debía presentar el proyecto; **ii)** Comité de Logística Conjunto de

la ANDI en el cual se tuvo la oportunidad de socializar el proyecto con cerca de 80 empresarios de diversos sectores de la economía entre los que se destacan generadores de carga (principalmente materiales de construcción, alimentos y carga misceláneos). Resultado de la socialización del proyecto, se lograron responder algunas preguntas generales sobre la actual actividad logística carretera y la baja incorporación del modo férreo en sus cadenas logísticas, además del contacto directo con algunos empresarios con los que posteriormente se realizaron mesas de trabajo; **iii) Mesa de trabajo Ibines Férreo S.A. – ANI** donde se lograron conocer algunos aspectos de la operación actual del corredor Bogotá – Belencito y la Dorada - Chiriguana, en la que se destacó a Argos como el principal usuario ya que moviliza el 60% del total de la carga que actualmente movilizan los corredores.

- **Estado de la operación (IBINES Férreo S.A.):** La empresa Ibines Férreo S.A. fue durante el año 2018 al 2021 el operador del corredor férreo Bogotá – Belencito y La Dorada – Chiriguana y, por ende, es el actor idóneo para establecer conocimiento de la actual operación del sector ferroviario del país. El conocimiento de la operación de los corredores permitió detallar aspectos técnicos de la operación del sistema férreo como: estado de las estaciones del tren, tarifas al generador, principales usuarios, volumen de carga movilizada, maniobras de transferencia, entre otras.

Así mismo IBINES realizó un recuento de las dificultades en cuanto a infraestructura logística a lo largo del corredor, en donde destacó que las estaciones no ofrecen condiciones adecuadas para el almacenamiento de mercancías, aspecto crítico de la operación actual. En cuanto al acercamiento a los empresarios ubicados a lo largo del corredor, IBINES ha realizado diversas aproximaciones en las que la dificultad ha estado en la distancia entre las instalaciones de las empresas y las estaciones del tren, ya que la transferencia no es bien percibida por los empresarios.

- **Generadores de carga (Empresas):** Finalmente, es imperativo establecer comunicaciones con los generadores de la carga debido a que es su percepción del proyecto y de la logística de la región permitirá conocer el estado de competitividad y aceptación por parte de actor que finalmente toma la decisión de

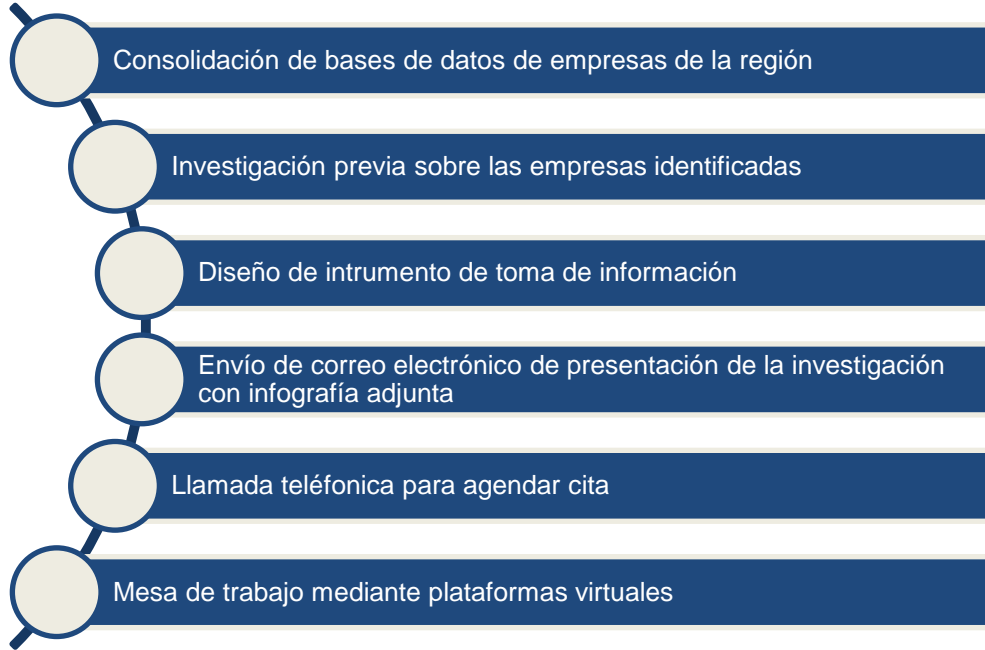


ser usuario de un nuevo sistema multimodal para el transporte de mercancías. En consecuencia, es preciso conocer el funcionamiento actual de su logística y la forma de fragmentar su logística con el nuevo proyecto, las necesidades “mínimas” que debe ofertar el Tren del Carare para atraer nuevos usuarios y, por medio de ellos, conocer las limitaciones que han percibido con la reactivación de las dos líneas férreas del país. La Metodología específica para estos acercamientos se detalla en el siguiente literal.

Se pudieron captar las diferentes dificultades que se presentan en el proceso de concertación y acercamiento a las empresas para atraerlas como usuarias del modo férreo. Uno de los factores más destacados en la operación en la perspectiva de Ibines radica en la coordinación que se debe realizar con las empresas a la hora de definir los horarios de operación, así mismo la logística de última milla debe ser muy bien planificada de manera que esta no represente un aumento de costos y tiempos que descompense la reducción de estos en el viaje de larga distancia en modo férreo, tal como sucede en la actualidad.

### **5.2.1 Mesas de trabajo con empresarios generadores de carga**

El actor más preponderante dentro de la investigación corresponde a cada uno de los generadores de carga que dispusieron de un representante en materia logística para adelantar una mesa de trabajo o taller que permitiera, en primera medida indagar sobre su logística actual, carga movilizada, costos y tiempos de operación y, posteriormente, seleccionar – de la lista previamente desarrollada – las variables más preponderantes que definen su elección de transporte de mercancías. La metodología utilizada en el proceso de recopilación de información primaria se presenta en la **Figura 5-2** precisando los aspectos más relevantes.

**Figura 5-2:** Metodología de recopilación de información primaria

Fuente: Elaboración propia

El proceso de acercamiento a empresarios inicio realizando la consolidación de las bases de datos de las empresas ubicadas en el área de investigación principal a lo largo del territorio Cundiboyacense, Antioquia (para investigar la posible conexión Tren del Carare y Ferrocarril de Antioquia) y Santander. Cabe la pena destacar que los espacios desarrollados con la ANDI permitieron un acercamiento más ágil y eficiente con diferentes empresas al igual que una prueba piloto para la aplicación de encuestas de preferencias declaradas que se desarrollaran un capítulo posterior.

De esta manera con las empresas objetivo, el contacto con los empresarios fue inicialmente un acercamiento vía correo electrónico compartiendo algunos detalles de la investigación (Anexo 1: Ficha de divulgación), posteriormente, los empresarios fueron contactados vía telefónica para confirmar que la información se ha recibido y concertar con ellos la posibilidad de reunirse 45 minutos vía Teams o Google Meet con algún delegado de la empresa en materia de logística, transporte y cadena de abastecimiento. Como premisa fundamental de la investigación se precisa que cada taller debe ser acompañado por el representante en logística dispuesto por la empresa, esto con el fin de definir adecuadamente sus procesos logísticos – los cuales posteriormente permitirán el

desarrollo de una encuesta de Preferencia Declarada “a la medida” de cada empresa – e identificar de forma acertada los factores de decisión de sus cadenas logísticas, información que solo este perfil de profesionales puede tener y desarrollar con total certidumbre.

Dichas mesas de trabajo se desarrollaron de forma dinámica en tres momentos claramente diferenciados por el instrumento de toma de información previsto para este fin, en primer lugar, se buscó que los empresarios describieran detalladamente su proceso logístico actual describiendo los datos generales de la compañía (incluyó % de flota propia y tercerizada para su logística actual), movimiento de su producto principal (origen – destino, tiempos y costos) e información de la totalidad de sus productos; en un segundo momento el empresario identificó la variables que determinan en mayor ponderación su elección de medios de transporte para el transporte de sus productos y, en tercer momento identificar beneficios y desventajas de incluir un medio complementario dentro de su cadena logística (multimodalidad) destacando nuevos requerimientos de infraestructura y servicios conexos que permitirían la inclusión del modo férreo como complemento a su cadena de abastecimiento.

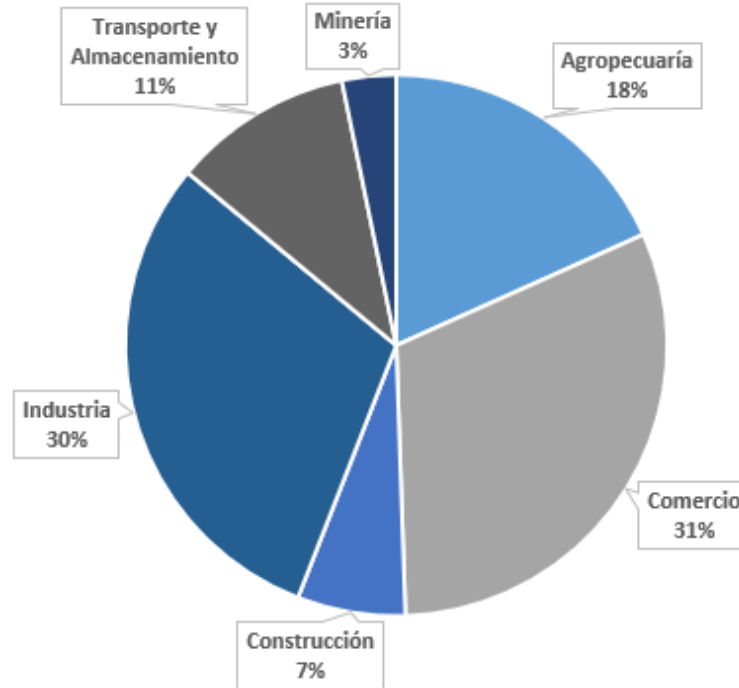
En total se lograron desarrollar ochenta (80) entrevistas/talleres a generadores de carga que, en conjunto con las mesas desarrolladas con el sector público y la academia, permitieron dar alcance a tres objetivos principales: **i)** identificación de variables de decisión, **ii)** cuantificación de las variables elegidas y, **iii)** identificar ventajas competitivas o parámetros comparativos entre el modo carretero y el modo férreo principalmente.

### **5.2.2 Síntesis de los acercamientos**

Como se mencionó anteriormente se desarrollaron ochenta (80) entrevistas con generadores de carga destacando que se lograron incluir empresas grandes, medianas y pequeñas las cuales importan, exportan y/o realizan actividades de transporte de mercancías de forma doméstica en el territorio nacional. La **Figura 5-3** consolida las áreas de actividad empresarial de cada generador, observando representatividad de las más importantes en la región lo que sin duda es un insumo valioso a la hora de evaluar las variables de decisión. Prima la actividad industrial, comercial y agropecuaria lo que resulta coherente con la heterogeneidad de segmentos de carga que se puede observar en la zona de estudio en la extensión del territorio Cundiboyacense. Cabe la pena resaltar cada

empresa, dependiendo de la totalidad de su actividad comercial y líneas de negocio pudo seleccionar más de una actividad mostrada a continuación.

**Figura 5-3:** Áreas de actividad de las empresas



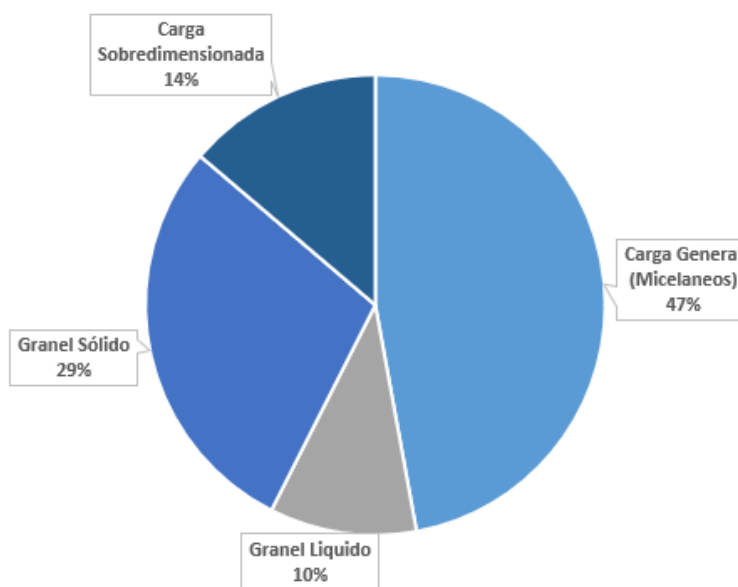
Fuente: Elaboración propia

Un aspecto desafortunado de la investigación, pero que deja un eje de investigación específico para futuras investigaciones, corresponde a la negativa mayoritaria del sector carbonero de la región debido a que, como mencionaron en diferentes oportunidades, “no consideran prudente participar en la investigación de un proyecto que ya ha sido formulado e investigado en múltiples ocasiones con nuestra participación activa, tiempo y esfuerzos individuales y gremiales pero que el gobierno nacional no tiene la suficiente voluntad de ejecutar y/o buscar financiación del sector privado”.

Un factor determinante en las variables de decisión a nivel logístico de las empresas está asociado directamente al tipo de producto que se necesita transportar, en este sentido en la **Figura 5-4** se presenta la distribución de las empresas agrupadas según la carga que transportan y los segmentos definidos en este estudio. Se evidencia que el 47% de las empresas que participaron en el estudio transportan carga general, categoría que incluye una amplia cantidad de productos pero que en su mayoría son susceptibles de transporte

por modo férreo y operaciones multimodales. Es importante destacar en este punto que, si bien lo ideal era mantener una proporción entre las empresas encuestadas a nivel de segmento, esta distribución es de igual forma consistente con la participación de cada segmento de demanda en la carga movilizada (generada/atraída) en la región.

**Figura 5-4:** Clasificación de encuestados según segmentos de demanda



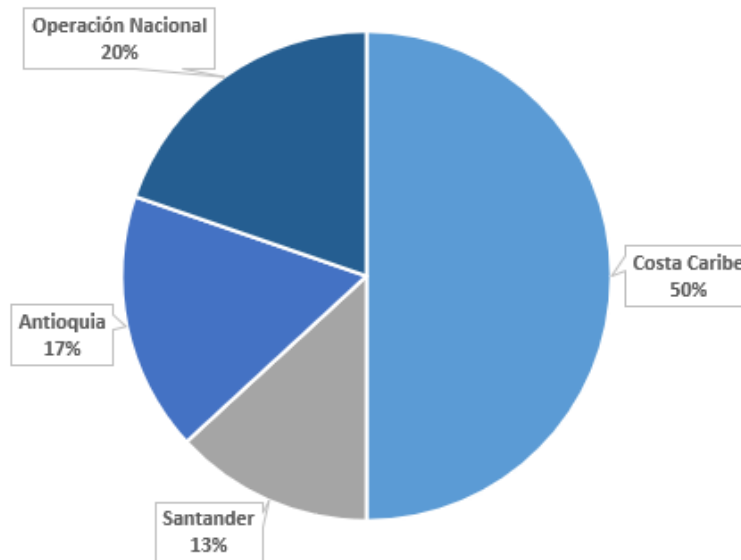
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, es posible definir de igual forma la participación de la carga que se movilizada en contenedores cuyo embalaje facilita el transporte y manipulación en sistemas multimodales de transporte. En este sentido del total de empresas entrevistadas el 41% moviliza su carga, parcial o totalmente, en contenedores lo cual se percibe como un aspecto positivo para la implementación de un sistema multimodal en la región.

El ejercicio de contacto directo con las empresas permitió identificar tipologías de carga que no son susceptibles de transportar en el modo férreo tales como animales vivos, ya que según los ganaderos con los que se tuvo contacto, este tipo de carga requiere cuidados especiales como la verificación del estado de los animales, su pérdida de peso en el viaje, entre otras. Así mismo los vehículos nuevos ya armados no son susceptibles, dado que son una carga muy delicada, en ese caso las empresas optan por enviarlos por partes y ensamblar en el destino.

Partiendo del hecho que la totalidad de los generadores tienen en uno de sus extremos operación en la región Cundiboyacense (atracción o producción), se identificaron las principales regiones de interacción de la carga con intención de utilizar el proyecto Tren del Carare para la movilización de su carga; en este sentido, no se percibió como potencial carga movilizada internamente en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (o entre ellos dos) debido a que estas conexiones son atendidas por el transporte carretero o, en operaciones multimodales, por el tren Bogotá – Belencito. En este sentido la principal línea de deseo percibida en las entrevistas y talleres corresponde a la zona caribe colombiana que brinda los servicios portuarios para el comercio exterior (importación/exportación) de los generadores; en segundo lugar, se encuentran las empresas con operación logística (distribución de productos) en la totalidad del territorio nacional las cuales no solo perciben de forma positiva el proyecto en estudio, sino que solicitan una red integrada de transporte (carretero, férreo y fluvial) con mayor cobertura nacional; Finalmente, en tercer y cuarto lugar es ocupado por el departamento de Antioquia y Santander respectivamente cuyas operaciones deben contemplar una complementariedad estratégica con el modo carretero para su distribución de primera y/o última milla.

**Figura 5-5:** Principales conexiones logísticas potenciales para el Tren del Carare

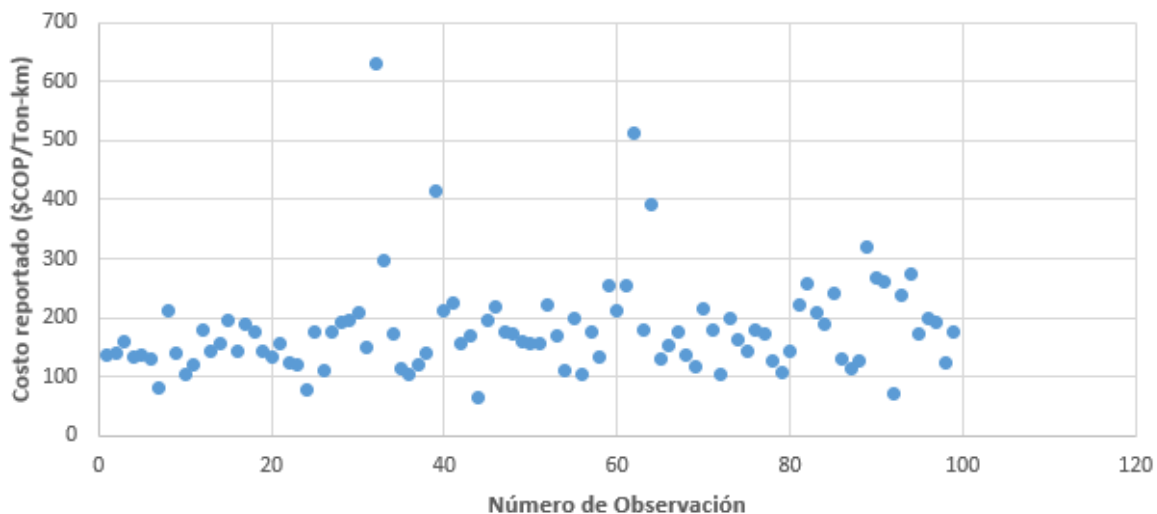


Fuente: Elaboración propia

Una de las principales características consultadas a los generadores en las entrevistas realizadas corresponde al costo de movilizar sus productos entre su origen y destino de la

carga. El costo total depende de la longitud de la cadena logística y del volumen transportado, por tal motivo, fue normalizado a unidades de toneladas por kilómetro que permite su adecuada consolidación, tal como se muestra en la figura a continuación.

**Figura 5-6:** Costo percibido por los generadores para el transporte de sus productos



Fuente: Elaboración propia

La variable costo define un parámetro de diseño de suma importancia para el desarrollo del modelo de elección discreta a ser aplicado y cuya variabilidad entre generadores, en proporcionalidad al tiempo de viaje, permitirá el diseño de una encuesta de preferencia declarada particular para cada generador que haga sentido con sus costos y tiempos actuales y así genere una mejor evaluación de las encuestas a ser aplicadas. Dentro de los principales hallazgos se encuentran:

- El costo medio de viaje (eliminando valores extremos) alcanzó a un valor de 170 pesos por tonelada kilómetro (\$/ton-km)
- El costo medio de viaje para las operaciones de exportación corresponde a un 80% del costo medio para operaciones de importación. Esta condición de los costos observada en las entrevistas realizadas, que es constante a lo largo del territorio nacional, atañe a “subsidios” del gobierno y estrategias de los operadores logísticos para incentivar la carga de exportación y disminuir la brecha que existe respecto al volumen de importación y, en consecuencia, aumentar la carga de compensación.

- Los costos de operación metropolitana y aquellos movilizados en camiones de baja capacidad (8 - 15 toneladas) reportan los valores más altos que superan los 400 \$COP/ton-km.

Como se va mencionar en un literal más adelante, la confiabilidad del servicio logístico, percibido como el porcentaje de viajes que llegan a tiempo según los itinerarios previamente acordados entre el generador, el transportador y el receptor de la carga y el porcentaje de carga que llega a su destino sin daños en su integridad física o pérdida volumétrica, fue altamente valorado por los generadores de la carga estableciendo los valores medios por segmento de demanda que se presentan en la tabla a continuación.

**Tabla 5-3:** Confiabilidad del transporte por segmento de demanda

| Segmento                    | Promedio de Porcentaje de envíos con daños o pérdidas (%): | Promedio de Porcentaje de envíos que no llegan a tiempo (%): |
|-----------------------------|--|--|
| Carga general (misceláneos) | 3%   | 10%  |
| Contenedores                | 4%   | 8%   |
| Granel sólido               | 2%   | 11%  |
| Graneles líquidos           | 1%   | 8%   |
| Carga sobredimensionada     | 5%   | 5%   |
| <b>Promedio general</b>     | <b>3%</b>  | <b>8%</b>  |

Fuente: Elaboración propia

Si bien el promedio de envíos con daños o pérdidas no es despreciable con un 3% del total general de la carga movilizada por los generadores, la variable crítica observada en las entrevistas, directamente de la voz de los representantes en logística de las empresas entrevistadas, corresponde a los envíos que no llegan a tiempo a su destino final lo cual repercute directamente en las operaciones portuarias y de grandes superficies urbanas que llegan, inclusive a multas a los generadores o pérdida del acuerdo comercial.

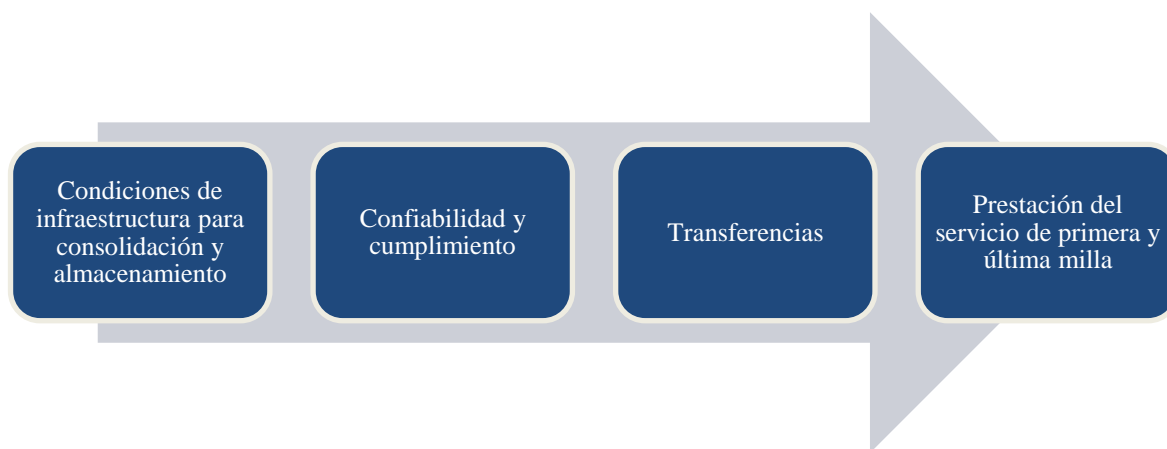
En cuanto a la prestación de servicios de transporte, entre las empresas identificadas se encontró que el 66% terceriza el servicio, el 32% tiene un porcentaje de flota propia y otro tercerizado y el 2% restante es dueña de su propia flota. Estos datos se pueden interpretar en dos perspectivas, la primera las empresas generadoras con flota propia son susceptibles a mediano plazo a usar modo férreo ya que pueden utilizar su flota para hacer viajes de primera y última milla, y la segunda que las empresas generadoras que actualmente tercerizan sus servicios de transporte son susceptibles de usar el modo férreo



sólo sí las empresas que les ofrecen este servicio logístico llegan a acuerdos directamente con los operadores del tren para evitar transferencias o hacerlas más eficientes para evitar incurrir en costos y tiempos extras en la primera y última milla.

Como resultado de los acercamientos con gremios, generadores de carga, operadores logísticos, Ibines Férreo S.A., la ANI y el grupo de investigación SEPRO se mapearon los aspectos más relevantes de la logística.

**Figura 5-7:** Aspectos relevantes de la logística considerando el modo férreo



Nombre de la fuente: Elaboración propia

- Condiciones de infraestructura para consolidación y almacenamiento: Se evidenció que en la actualidad no se cuenta con infraestructura adecuada y suficiente en términos de zonas de consolidación y almacenamiento, estas se realizan de manera particular dentro de las instalaciones de cada empresa, que diseña sus maniobras de transferencia a su conveniencia
- Prestación del servicio de primera y última milla: Se evidenciaron dos tipos de operación, en la primera los generadores cuentan con Bodegas de consolidación y desconsolidación (Argos en la estación Km 5 de la ciudad de Bogotá), de manera que sus camiones llegan allí, y posteriormente empieza el proceso de logística urbana en camiones más pequeños. El segundo tipo de operación consiste en el reparto diario directo desde sus empresas ubicadas en el ámbito metropolitano.
- Confiabilidad y cumplimiento: Muchas de las empresas que se ubican en el territorio, envían sus productos terminados para la distribución final a través de almacenes de cadena y grandes superficies u operaciones de comercio exterior,

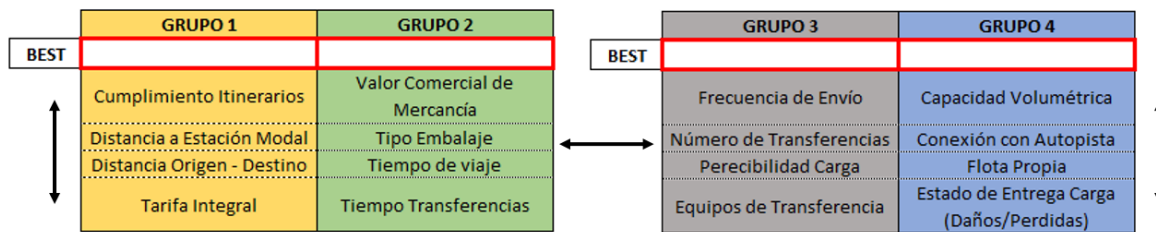
esto genera compromisos contractuales en los que el cumplimiento en la entrega se vuelve crucial, ya que está sujeto a multas, por lo que este aspecto es altamente valorado.

- Transferencias: El costo y el tiempo que requieren maniobras de cargue y descargue es el principal inconveniente que ven los generadores a la hora de contemplar la posibilidad de una operación multimodal.

### 5.2.3 Elección de las variables de decisión preponderantes en la elección de los generadores

Las variables identificadas por los asistentes fueron elegidas del conjunto de variables consolidadas de la revisión documental, las cuales, se agruparon en cuatro conjuntos de elección de forma aleatoria y se solicitaba al encuestado elegir, en cada grupo, la que más influencia tenía en sus decisiones de transporte (Best) y aquella que, dados sus productos, logística y necesidades particulares, presenta la menor influencia en su decisión (worst).

Figura 5-8: Grupos de variables de elección



Fuente: Elaboración propia

Dada la dinámica de las entrevistas al ser desarrolladas virtualmente por medio de plataformas como Teams o Google Meet fue posible controlar la forma de presentar las tarjetas para evitar la comparación o sesgos de variables entre un grupo y otro, de esta forma, cada grupo se presentaba en una diapositiva individual en donde, el momento de presentar cada grupo, se realizó una explicación de cada una de las variables de elección articulando su significado con lo conversado con el encuestado de sus procesos logísticos. Cabe resaltar que la disposición de las variables en los grupos se generaba anterior a la entrevista y por ende el encuestado observaba ya la posición final de las mismas para posterior (a la explicación de cada una) realizar la elección en cada grupo presentado. AL finalizar, para dar mayor dinamismo y entendimiento de las elecciones realizadas por el encuestado se mostraban todos los grupos de variables junto con las elecciones y se

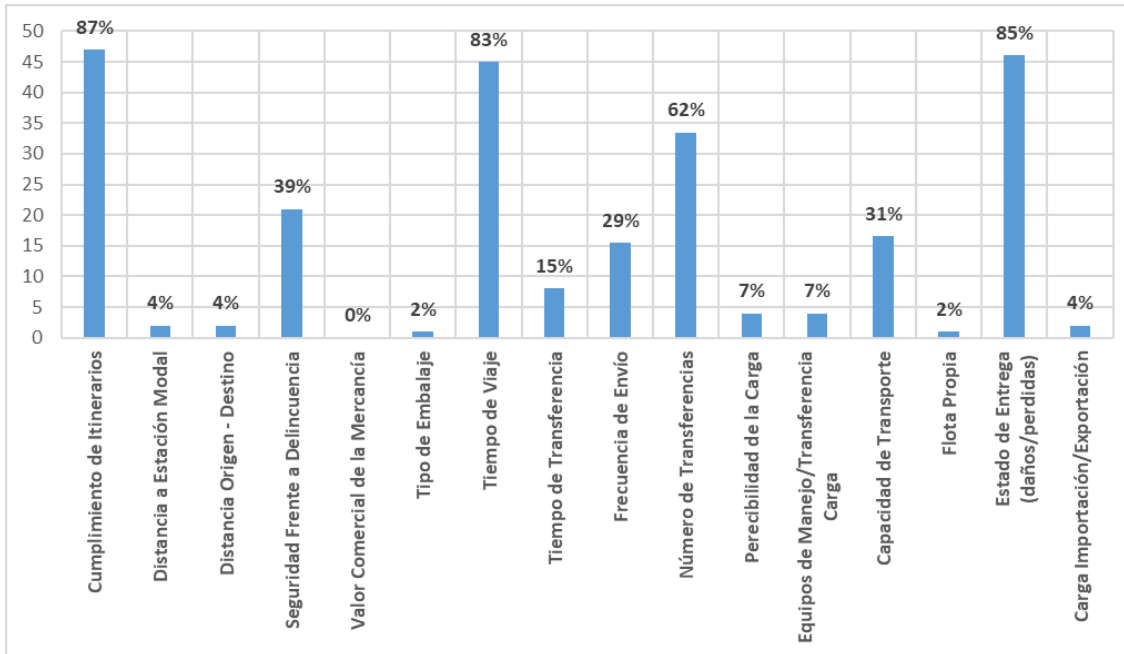
---

generaba un espacio de debate que permitiera generar conclusiones de los factores presentados y analizados y retroalimentación de la actividad para las posteriores entrevistas y mesas de trabajo.

La posición de las variables en los grupos es dinámica y retroalimentada por las elecciones de los encuestados anteriores, así, las cuatro (4) variables con mayor selección “best” se ubican constantemente en diferentes grupos hasta que la selección o retroalimentación de los siguientes encuestados genere la misma o similar selección de los anteriores encuestados. Este proceso se conoce como saturación de las respuestas e indica que se ha llegado a un consenso en las variables más influyentes en la elección de los generadores. Cabe la pena resaltar que la variable “flete de transporte” no fue considerada en la selección de los encuestados debido a que es una variable para optimizar en sus cadenas logísticas y por ninguna razón debe ser excluida de modelos de elección en el transporte de carga.

Con la culminación de las encuestas se procedió a la determinación de las variables que escogieron en mayor medida los generadores y transportadores encuestados. Cabe la pena aclarar que en las encuestas realizadas - que duraban aproximadamente 40 minutos - se realizó una conversación más profunda a la simple selección de las variables en donde el encuestado nos detalla cada variable elegida y, de cierta forma, los rangos cuantitativos de cada variable en sus procesos logísticos y el entendimiento de cada una (variables) para un mejor desarrollo de los diseños de preferencias declaradas como paso siguiente de la investigación. Finalmente, la saturación de las variables de elección se obtuvo en la entrevista número 40, no obstante, se continuó con la aplicación a la totalidad de las 80 empresas que nos brindaron su espacio y tiempo, con el fin de caracterizarlas adecuadamente y determinar sus parámetros actuales de operación.

**Figura 5-9:** Variables elegidas por los generadores de carga de la región Cundiboyacense (Best)



Fuente: Elaboración propia

Se tienen cuatro variables predominantes en la elección de los generadores:

- **Cumplimiento de itinerarios:** esta variable la asociamos al cumplimiento del sistema de transporte en cuanto a las entregas se realicen en los tiempos establecidos en los acuerdos comerciales con los generadores. Es importante resaltar que esta variable tiene efectos económicos y logísticos en la cadena de abastecimiento así: en el componente urbano la distribución de productos (manufacturados y procesados) se debe realizar dando cumplimiento a horarios y días establecidos por los almacenes de grandes superficies debido a que un incumplimiento recae en multas al generador; en la parte nacional y en lo específico con la operación en puertos el cumplimiento de itinerarios es completamente necesario puesto que al ingreso en los puertos se tienen turnos previamente establecidos. En la encuesta se consultó el porcentaje de envíos (viajes) que no llegan a tiempo en la operación cotidiana de los generadores reportando una media de 8%.
- **Tiempo de viaje:** si bien los tiempos de viaje reportado en los procesos de los generadores se expresan en magnitudes de días, acá es muy importante

considerar que ellos conocen que estas magnitudes se ven afectadas por las horas máximas de manejo de los operadores por lo cual hablar de tiempos de viaje (en circulación del vehículo) es igualmente válido. En el tiempo de viaje, en reiteradas ocasiones se recomendó que el tiempo ofrecido por un proyecto multimodal debe considerar todas las operaciones (actividades) que se requieran para llevar la carga de un origen al destino por lo cual la variable tiempo de transferencia (que oscila entre 8 y 4 horas en el sistema férreo actual) debería quedar inmersa en el tiempo de viaje total entre el origen y el destino.

- **Estado de entrega (pérdidas/daños):** Esta variable fue la más ponderada por los generadores en las conversaciones realizadas, allí no solo se incluye temas de vandalismo y robo, sino que también se asocia a daños por el manejo de las cargas en operaciones de cargue y descargue. En la encuesta se consultó el porcentaje de envíos (viajes) que tienen pérdidas o daños en los generadores reportando una media de 5%.
- **Número de transferencias:** Adicional a las constantes críticas de los generadores a la posible ineficiencia de la operación férrea actual y futura debido a que no se conoce "una sola estación de transferencia que tenga equipos y procesos eficientes y tecnológicos", en muchas ocasiones - como el caso de Cerámicas San Lorenzo y Corona - expresaron literalmente que no optarían por una operación férrea si ellos tuvieran que tener un transporte de primera y última milla, razón por la cual, esperan que el proyecto (en integración con Bogotá Belencito) pueda generar ramales de conexión a sus centros de producción (Sopó).

Complementariamente, se encontraron tres variables adicionales para análisis particular.

- **Seguridad frente a la delincuencia:** con un 39% de elecciones es una variable de bastante ponderación debido a que regiones como el norte de Antioquia y trayectos largos se ven bastante afectados por la delincuencia en carreteras al tener que dar conexión con regiones en vías terciarias y con presencia de grupos armados. Esta variable, de entrada, no se considera para un modelo de elección discreta debido a que una mejora en estas condiciones no depende del sistema de transporte sino de las medidas gubernamentales para combatir esta inseguridad. Si bien el transporte férreo puede contribuir a disminuir índices de robo al tener vías segregadas y no es fácil detenerlo en marcha, no está exento de vandalismo y

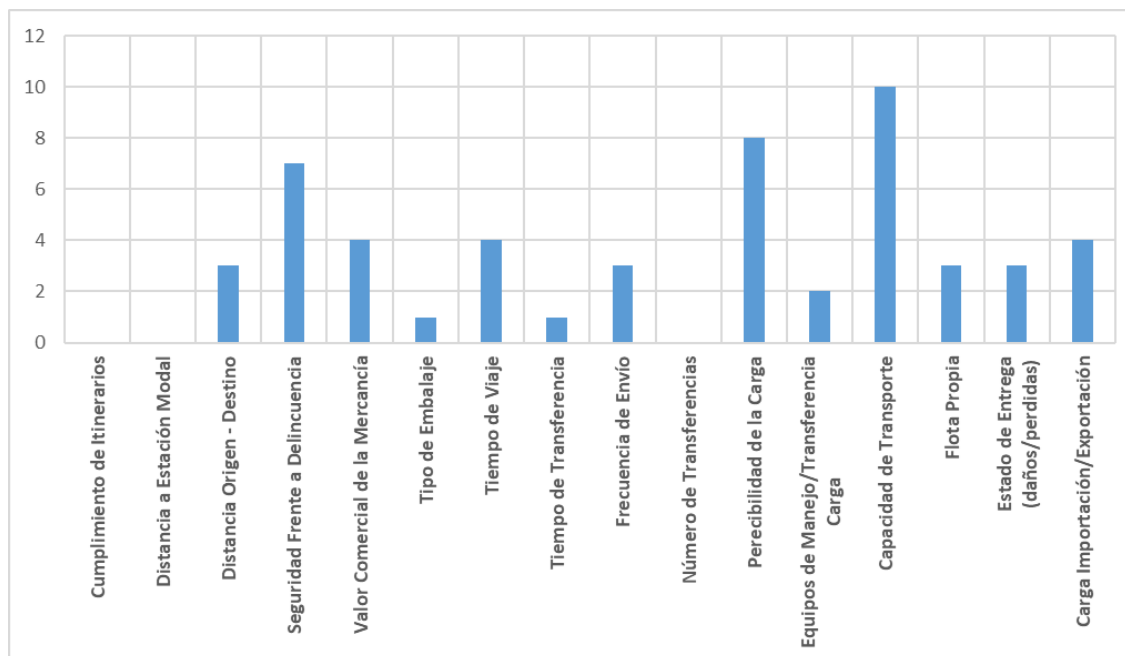
ocupación de vías férreas que limiten su operación. En cuanto a los robos ya se estarían considerando en la variable de estado de entregas.

- **Frecuencia de envío:** Esta variable fue bastante discutida con los generadores a medida que aumentaba su peso en las entrevistas. Es posible considerarla (al igual que la tesis de Pineda-Jaramillo, J. D., 2014, *Railway and road discrete choice model for foreign trade freight.*) como una variable Dummy que representa la cantidad de despachos o toneladas de carga generada por una empresa o agremiación. En muchas ocasiones, se hablaba de que no era relevante (29% en gráfica de menos relevantes), no obstante, se identifica que empresas con mayor cantidad de volumen/viajes a la semana - en las condiciones adecuadas - están más dispuestas a mudarse al proyecto.
- **Capacidad de Transporte:** Otra de las variables discutidas, se habla de capacidad de que el sistema férreo transporte las mercancías de los generadores, no obstante, se conoce que es un sistema de mayor capacidad; entonces, se traslapa a la capacidad de llevar sus productos con una consistencia y frecuencia adecuada lo cual le da peso a la variable anterior Frecuencia de envío.

Algunas menciones especiales que, aun cuando no se consideraron como variables de posible elección el **estado de infraestructura y los ITS que den seguimiento y gestión de la carga** fueron variables que surgieron en diferentes entrevistas, no obstante, el estado de la infraestructura afecta - entre otros - los tiempos, costos y la continuidad de la carga por lo cual ya está cubierto en las variables tiempo y costo.

Entre las que los generadores eligieron como las de "menor relevancia" se tiene la siguiente gráfica.

**Figura 5-10:** Variables elegidas con menor preponderancia por los generadores de carga de la región Cundiboyacense (Worst)



Fuente: Elaboración propia

En este caso es variable las elecciones de los generadores respecto a las variables de menor peso en su elección debido a que depende de su particular concepto: la capacidad no se ve como un factor de elección puesto que se conoce la mayor capacidad del tren y la oferta de servicios logísticos del país (carretera) lo cual no ven como un riesgo de decisión, no obstante, es necesario asegurar la disponibilidad del mismo. La perecibilidad de la carga es una variable que puede interesar a productores agropecuarios, pero no es una generalidad de todos los sectores comerciales por esta razón, se debe prestar particular atención en considerar segmentos de demanda como lácteos sin refrigeración (viajes cortos) o productos agropecuarios que puedan perder su integralidad en trayectos de largo recorrido y; seguridad frente a delincuencia debido a que cada generador percibe de forma distinta esta condición.

En conclusión, se considera el costo, tiempo, confiabilidad del transporte, número de transferencias, frecuencia (Dummy) y propiedad de la flota (Dummy) en los diseños a ser establecidos en la siguiente fase de la investigación (encuestas de preferencia declaradas). Estas variables elegidas harán parte, según su significancia estadística, de

los elementos medibles y sistemáticos de la(s) función(es) de utilidad “Xjkq” presentada en la Ecuación 1 del Marco de Referencia.

Estas variables de mayor ponderación que resultan de la investigación son consistentes con investigadores consultados en la primera etapa de revisión documental y en particular con la investigación desarrollada por Julian Arellana en el año 2016 en la región de Rio Grande do Sul, Brasil.

**Tabla 5-4:** Variables estudiadas en diferentes investigaciones

| <b>Autor</b>  | <b>Variables analizadas</b>  |
|---|--|
| Cabas Torres, E.P. (2017)                             | Costo, tiempo y volumen de carga anual   |
| Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A. (2017) | Costo, tiempo y porcentaje de entregas a tiempo  |
| Pineda-Jaramillo, J. D. (2014)                        | Costo y frecuencia de envío  |
| Rich, Holmblad y Hansen (2009)                        | Costos y tiempo  |
| Jiang, Johnson y Calzada (1999)                       | Accesibilidad, distancia, oferta de instalaciones multimodales y embalaje de la mercancía. |

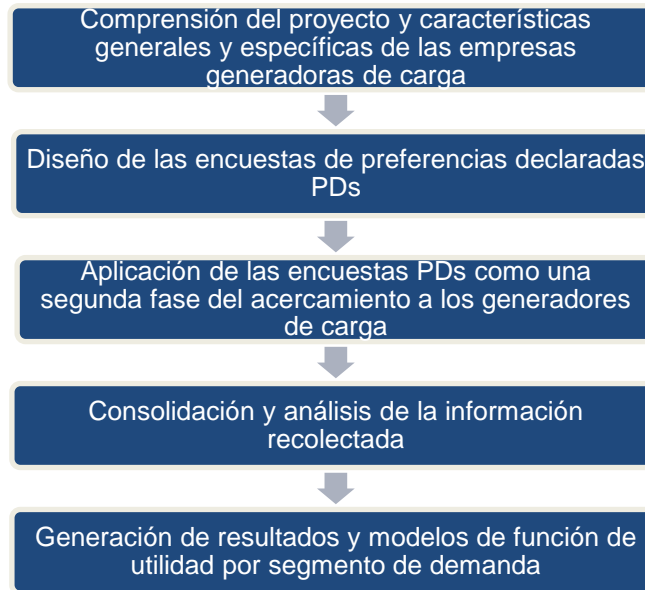
Fuente: Elaboración propia

Las variables de elección obtenidas como fase inicial de recolección de información con los generadores de carga y una vez sean calibradas a través de modelos de elección discreta, permitirán determinar de una forma más precisa la demanda de carga estimada para ser movilizada por nuevos proyectos logísticos de la nación como el proyecto Tren del Carare.



## **6.FORMULACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL MODELO DE ELECCIÓN DISCRETA**

La formulación de los modelos de elección discreta inicia con la determinación de las ventajas competitivas de los modos de transporte a ser considerado para la elección de los encuestados en las tarjetas de Preferencias Declaradas (PDs). Estas ventajas competitivas se basan en estimar, para cada variable elegida, los niveles en los cuales se “moverá” dicho parámetro en las situaciones hipotéticas a ser presentadas a los representantes en materia de logística de las empresas previamente caracterizadas como una segunda y tercera etapa de acercamiento a ellos. Así, en esta segunda etapa del proceso de estimación, se presenta todo el proceso inherente al diseño y aplicación de las encuestas de preferencias declaradas por medio de las cuales se llevó a cabo la cuantificación de las variables identificadas en el apartado anterior, para cada uno de los segmentos de carga objeto de análisis, evaluando la sensibilidad a nivel cuantitativo de cada actor a las mismas en la decisión en materia logística como tiempo, costo, transferencias (multimodalidad) y confiabilidad en el estado del producto. La metodología general para la estimación de los modelos de elección discreta se presenta en la figura a continuación.

**Figura 6-1:** Resumen de metodología de trabajo encuesta PD

Fuente: Elaboración propia

## 6.1 Definición de los niveles en las variables de elección

Como se mencionó en el capítulo anterior, un buen diseño debe generar identidad con el encuestado, es decir, que los escenarios de elección presentados hagan sentido con la cotidianidad de su operación, por tal motivo a continuación se presentan los rangos de las variables de decisión basados en tres fuentes de información principalmente; **i)** para el modo carretero se analizan las entrevistas desarrolladas en la fase previa, **ii)** para el modo ferroviario se utilizan principalmente los costos y tiempos compartidos por el exoperador férreo Ibines Férreo S.A. y **iii)** para complementar el modo férreo y estimar los rangos del modo fluvial se toma como referencia fuentes de información secundaria.

### Costo de Transporte:

El costo medio de transporte se analiza en unidades de pesos colombianos por tonelada kilómetro (\$COP/ton-km) que permiten, en un ejercicio posterior, definir los valores para diferentes longitudes de trayectos (pares OD) de acuerdo a las particularidades de cada generador. Se proponen cuatro niveles para la variable así:

**Tabla 6-1:** Rangos elegidos para la variable costo en los modelos PD.

| Rango | Costo Carretera<br>(\$COP/ton-km) | Costo Férreo <sup>1</sup><br>(\$COP/ton-km) | Costo Fluvial <sup>2</sup><br>(\$COP/ton-km) |
|-------|-----------------------------------|---|--|
| 1     | 120                               | 80  | 50   |
| 2     | 158                               | 121   | 67   |
| 3     | 174                               | 164   | 85   |
| 4     | 222                               | 207   | 103  |

<sup>1</sup>Los costos férreos fueron complementados con un análisis de costos tanto nacionales (Ibines Férreo S.A.) y las tarifas de sistemas ferroviarios de México y Brasil principalmente (Ver anexo 4).

<sup>2</sup>Los costos fluviales fueron definidos con base en Análisis de Medios Multimodales en Transporte de Carga y Su Influencia en la Competitividad de Productos de Mercado Internacional, 2004

Fuente: Elaboración propia

### **Tiempo de viaje:**

El tiempo de viaje representa la totalidad del viaje desde el despacho del producto en la planta de generación hasta su destino final en territorio nacional considerando tiempos adicionales en las maniobras de transferencia para los escenarios multimodales (férreo y fluvial). En el caso particular del modo fluvial, este componente de tiempos de transferencia genera, por el momento, grandes repercusiones en la competitividad del modo fluvial en el país llegando a percibir altos tiempos “muertos” y/o administrativos en los nodos de interconexión, atenuado por la navegabilidad del Río Magdalena, que generan tiempos de viaje de hasta 7 días en el trayecto Barrancabermeja – Cartagena según cifras de “Rutas y tiempos de viaje – Cormagdalena (2018)”. De igual forma, se eligen cuatro rangos para la variable tiempo, tal como se presenta a continuación.

**Tabla 6-2:** Rangos elegidos para la variable tiempo en los modelos PD.

| Rango | Tiempo Carretera<br>(horas) | Tiempo Férreo<br>(horas) | Tiempo Fluvial <sup>4</sup><br>(horas) |
|-------|-----------------------------|--------------------------|--|
| 1     | 10                          | 14                       | 24                                     |
| 2     | 15                          | 22                       | 36                                     |
| 3     | 18                          | 23                       | 48                                     |
| 4     | 24                          | 28                       | 72                                     |

Fuente: Elaboración propia

<sup>4</sup> Si bien los tiempos de viaje emitidos oficialmente por Cormagdalena (<http://www.cormagdalena.gov.co/programasestrategicos>) superan los 4 días de navegación en todos los trayectos, para efectos de brindar posibilidad de elección se eligen valores más bajos en los diseños propuestos.

Si bien la tabla es indicativa para conocer los rangos de tiempo establecidos para el modelo, los diferentes diseños a ser evaluados dependiendo de las características particulares de cada generador se ajustan para dar sentido a sus parámetros de operación actual teniendo en cuenta su origen y destino más cotidiano y los costos y tiempos compartidos en el primer acercamiento (ej. Sogamoso – Cartagena Vs Sogamoso – Medellín).

### **Confiabilidad de la carga (% daños y pérdidas):**

La confiabilidad de la carga se define, para esta investigación basados en lo compartido por los generadores, como el porcentaje de envíos que llegan a su destino final nacional (ciudad o puerto) en los tiempos establecidos y sin daños físicos en los productos transportados. Se elige estimar la variable en valores porcentuales, es decir, la confiabilidad de viajes cada 100 servicios o envíos. En este caso particular, la confiabilidad del modo carretero se estimó como el promedio de la sumatoria de las preguntas realizadas a los encuestadores: % envíos a tiempo y % de envíos con daños; por su parte, la confiabilidad del modo férreo se estimó en un rango de 90 a 100 según lo manifestado por el exoperador Ibines Férreo S.A. en su experiencia en la operación del sistema férreo del país y, el modo fluvial se estimó con base en los reportes de incidentes o derramamientos de crudo en el corredor fluvial del Magdalena. Se eligen 4 rangos para la variable analizada.

**Tabla 6-3:** Rangos elegidos para la variable confiabilidad en los modelos PD.

| <b>Rango</b> | <b>Confiabilidad Carretera<br/>(#Viajes/100)</b> | <b>Confiabilidad Férreo<br/>(#viajes/100)</b> | <b>Confiabilidad Fluvial<br/>(#Viajes/100)</b> |
|--------------|--|---|--|
| 1            | 75   | 90  | 80   |
| 2            | 80   | 95  | 85   |
| 3            | 85   | 98  | 90   |
| 4            | 90   | 100   | 95   |

Fuente: Elaboración propia

### **Número de transferencias:**

Las dos primeras variables cuantifican intrínsecamente los costos y tiempos asociados a las maniobras de transferencia, no obstante, dentro de las entrevistas de caracterización se definió como necesario evaluar el número específico de transferencias que debía sufrir la carga para transportarse desde el origen a su destino final. En este sentido, las cadenas logísticas contempladas, no perciben diferencias en los nodos de producción y entrega

final del producto (cliente) por lo cual esta primera y última descarga se mantiene constante respecto a la operación actual, de allí, se percibe que una operación multimodal eficiente puede contemplar entre una (1) transferencia (operaciones que llegan directamente a puerto o contemplando ramales de acceso de la línea férrea directamente a las fábricas de producción) y dos (2) transferencias (operación con primera y última milla en modo carretero). Para el escenario netamente carretero la variable toma el valor de cero (0) debido a que éste no requiere de intercambio modal.

**Tabla 6-4:** Rangos para la variable número de transferencias en los modelos PD.

| Rango | # Transferencias Carretera | # Transferencias Férreo | # Transferencias Fluvial |
|-------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1     | 0                          | 1                       | 1                        |
| 2     |                            | 2                       | 2                        |

Fuente: Elaboración propia

#### **Variables categóricas:**

Se eligieron dos variables adicionales a las anteriormente definidas correspondientes a la frecuencia de envío de carga por parte de los generadores y la posesión de la flota para el transporte de sus productos (tercerizada o propia); en los dos casos las variables se contemplan como características propias de la operación y producción del operador y no como una variable de elección en escenarios hipotéticos dado que, en cualquier escenario de transporte, debe suplir dicha necesidad sin importar el modo o conjunto de modos de transporte que sean elegidos. De igual forma, esta definición permite que estas variables no sean contempladas directamente en el diseño de preferencias declaradas permitiendo menor saturación del encuestado<sup>5</sup> y se incluya como variable categórica o Dummy en la estimación del modelo de elección discreta.

En este sentido, para la variable frecuencia se eligieron dos categorías: cero (0) para generadores con necesidad de transportar o despachar sus productos de forma diaria y uno (1) para otra condición que no representa una situación crítica respecto a la oferta de

---

<sup>5</sup> La NO saturación del encuestado en una encuesta de preferencia declarada permite que éste analice adecuadamente las variables y rangos presentados en los escenarios hipotéticos y evita agotamiento en las respuestas de las tarjetas finales, omisión de variables para su elección, abandono de la encuesta, entre otros aspectos que pueden impactar en la calidad de la información recolectada.

material rodante en servicios férreos o fluviales. Por su parte la posesión de flota se definió en cero (0) para el escenario “más favorable” para el sistema multimodal y corresponde a las empresas o generadores que tercerizan la totalidad del transporte de sus mercancías y uno (1) en caso que contemplen flota propia de forma parcial o total lo cual les da una dinámica diferente en su elección de servicios logísticos tal como lo expresó el representante en logística y transporte de la empresa Alpina *“no es posible contemplar al 100% un sistema multimodal debido a que tengo que poner a producir mis camiones”*.

Una vez definidos los rangos, se aplica la metodología de Kocur para establecer el número de tarjetas o situaciones hipotéticas de elección a ser aplicadas a los generadores y ésta se resume en obtener el mínimo común múltiplo del número de rangos (niveles) a presentar en cada variable y alternativa de elección. De esta forma se eligen 8 tarjetas a ser aplicadas a cada generador en la fase de trabajos de campo.

## 6.2 Prueba piloto

La prueba piloto en la aplicación de las encuestas de Preferencia Declara permite observar problemas el instrumento de toma de información, la metodología de aplicación e inclusive las variables y rangos diseñados para las tarjetas de elección. En este sentido, la prueba piloto se presenta comúnmente después del capítulo de diseño del experimento, no obstante, para la presente investigación la prueba piloto generó hallazgos significativos que determinaron el rumbo del diseño final, sin embargo, los diseños de Preferencia Declarada de la prueba piloto y del diseño final se desarrollaron bajo la misma rigurosidad, metodología y software de diseño Ngene (ver Capítulo 6.3).

Para la aplicación de la encuesta piloto, se atendió la invitación de la Alianza Logística Regional de Bogotá y Cundinamarca en donde se concedió un espacio de una (1) hora para presentar el proyecto, definir los alcances y posibles resultados, la aplicación práctica de la investigación y sobre los últimos 15 minutos ejecutar la encuesta PD a cinco (5) empresas participantes de la sesión y cuatro (4) operadores logísticos que se lleva a cabo de forma mensual. El ejemplo de las tarjetas de elección (8 en total) se presenta a continuación.

**Figura 6-2:** Ejemplo de la tarjeta con las situaciones de elección – Prueba Piloto



Fuente: Elaboración propia

Dentro de los principales hallazgos de la aplicación de la prueba piloto se consideró por parte de los encuestados y el moderador (que en este caso fue el mismo investigador) los siguientes aspectos:

- Por la complejidad de encuesta, es pertinente que esta sea aplicada de forma presencial o virtual por videollamada que permita al investigador explicar cada una de las variables a ser consideradas por el encuestado.
- En cuanto al instrumento de toma de información, en la prueba piloto se presentó el costo total de movilizar el producto desde el origen al destino de la carga, no obstante, fue sugerido por los generadores de carga que este valor sea presentado en unidades de pesos por tonelada (\$COP/Ton). Se hizo el ajuste en tiempo real para dar continuidad a la prueba piloto.
- Se sugiere presentar un mapa del proyecto para que los encuestados puedan recordar su trazado y los beneficios esperados en su implementación.
- La conclusión más importante de la aplicación de la prueba piloto corresponde a que, de los nueve (9) participantes ninguno escogió la alternativa multimodal considerando tren y fluvial en ninguna tarjeta de las ocho (8) presentadas.

Sobre la última conclusión se deliberó la razón por la cual se dio esta dinámica de forma unánime en la totalidad de los participantes obteniendo dos razones principales:

- Los empresarios, y en general los participantes de la sesión de la alianza (excluyendo los funcionarios públicos) tienen gran incertidumbre en la puesta en marcha del proyecto para la recuperación de la navegabilidad del Río Magdalena que permita una mayor continuidad en su operación y brinde la confiabilidad adecuada para el transporte **cotidiano** de sus productos. Complementariamente, de forma unánime se mencionó que los nodos de intercambio carretera – río no son nada eficientes y presentan altas demoras en trámites administrativos y papeleo, de esta forma, si bien se han presentado grandes avances en la interconectividad en el nodo de Puerto Capulco para conectar con el modo férreo, perciben que estas operaciones “*medianamente eficientes*” se han dado con la intervención del gobierno nacional para su optimización, no obstante, en una operación cotidiana difícilmente se pueda brindar un servicio confiable para conectar con los puertos.
- Si bien, se reconoce que los tiempos de transporte de la carga son extensos, considerando la totalidad de la operación (descanso nocturno de conductores de camión) y llegan a percibir entre 2 y 3 días para conectar con los servicios portuarios o llevar su carga al destino final, los tiempos que ofrece el modo fluvial son por mucho mayores a los tiempos máximos que estarían dispuestos a contemplar los generadores de carga en sus operaciones cotidianas.

Este tipo de conclusiones son el objetivo principal de aplicar la encuesta a los encargados en materia de logística y transporte de las empresas debido a su conocimiento en la cadena de abastecimiento y así mismo permiten mayor precisión en las elecciones de las alternativas y, posteriormente, en la obtención de los modelos de elección. Bajo este hallazgo se define para la presente investigación que es pertinente en la región Cundiboyacense continuar con el **diseño final considerando únicamente dos alternativas de elección: camión y multimodal considerando tren** tal como se desarrollará en los siguientes literales.



### 6.3 Diseño de encuestas de preferencias declaradas

Una vez identificadas las variables de decisión, los rangos o niveles de los atributos, el número de tarjetas a ser aplicadas y las alternativas de elección de acuerdo con los hallazgos de la prueba piloto, se plantearon las ventajas competitivas base para 11 diseños que se aplicaron a las empresas de acuerdo con la información suministrada en la entrevista de caracterización según sus parámetros de operación actual a través de técnicas de encuestas de preferencias declaradas.

Se denominan técnicas de preferencias declaradas a un conjunto de metodologías que se basan en juicios (datos) declarados por individuos, acerca de cómo actuarían frente a diferentes situaciones hipotéticas que le son presentadas y que deben ser lo más aproximadas a la realidad tal como se expresó en el Marco de Referencia del capítulo 2.2.1.1; esta aproximación a la realidad de cada empresa se logró a través de la entrevista realizada previamente donde se indagaba aspectos técnicos y específicos de su logística actual, percepción del proyecto y costos y tiempos actuales entre los principales orígenes y destinos de su carga o insumos. Estas técnicas utilizan diseños experimentales para construir las alternativas hipotéticas presentadas a los encuestados (empresas generadoras de carga), las cuales describen situaciones o contextos que se diferencian a través del valor que toman sus atributos. En el caso del presente proyecto en donde se investigaba la disponibilidad de los generadores para utilizar un proyecto férreo como complemento a su cadena logística se diseñan las encuestas según la metodología presentada al inicio del capítulo en la **Figura 6-1**.

Así, la segunda parte del proceso de cuantificación de las variables de decisión consiste en el diseño de las encuestas de preferencias declaradas con base en las características particulares de cada empresa. Como se mencionó, en total se realizaron 11 diseños de preferencias declaradas de acuerdo con el análisis e interpretación de los datos recolectados continuamente a través de las entrevistas de acercamiento a los gremios y generadores. Estas entrevistas nos permitieron agregar las empresas con dos características principalmente: **i)** regiones de operación y suministro y, **ii)** costos y tiempos medios por tonelada percibidos para sus principales productos/insumos.

Los diseños de preferencia declarada se realizaron con ayuda del software Ngene el cual permite la estimación de diferentes situaciones de elección como una combinación de los valores de las variables de decisión previamente identificadas y cuantificadas. Los rangos de magnitud o valores de las variables de decisión se estimaron en el literal anterior con base en fuentes de información secundaria y primaria tanto para la situación actual como para la situación con proyecto y, finalmente, se establecieron rangos lógicos y coherentes de cada una de las variables de decisión para cada situación de elección (actual por camión y con proyecto multimodal considerando el tren) basados en la interacción con los nueve (9) participantes de la prueba piloto adelantada en el marco de la sesión mensual de la Alianza Logística Regional.

El fundamento teórico del modelo propuesto para el diseño de las encuestas PD es un modelo bayesiano el cual intenta una distribución normal de los diseños en los cuales el porcentaje de confiabilidad se encuentre dentro del parámetro de entrada. Estos parámetros de entrada o “a-priori” se consolidaron por el investigador a través de la recopilación documental de diferentes estudios de transporte de carga como el Tren Multipropósito de Antioquia, Tren de Urabá, proyectos carreteros regionales en el contexto nacional y las investigaciones descritas en el Marco de Referencia utilizando diversas metodologías desde las convencionales (en el contexto nacional) realizando encuestas a borde de vía a los conductores de las unidades de transporte hasta planteamientos metodológicos como los desarrollados en esta investigación. La utilización de técnicas Bayesianas en la estimación de modelos logit mixtos está siendo ampliamente utilizada desde la introducción de este concepto. Para el caso de coeficientes que distribuyen normal, puede estimarse los parámetros de estos modelos sin necesidad de calcular sus probabilidades de elección (Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A. 2017).

El procedimiento de máxima verosimilitud clásico, expresado teóricamente en la Ecuación 9 del Capítulo 2.2.1, presenta dos dificultades principales en su estimación, que con las técnicas Bayesianas pueden evitarse. En primer lugar, los procedimientos Bayesianos no requieren maximización de ninguna función, ya que en casos de modelos logit mixtos o probit, especialmente aquellos con distribuciones lognormales, pueden ser numéricamente difíciles de estimar. Además, propiedades deseadas de los estimadores como consistencia y eficiencia se obtienen más fácilmente con técnicas Bayesianas que con la estimación clásica. (Gutiérrez-Torres & Cantillo-Maza, 2014).

Finalmente, con los datos recabados y la utilización del software mencionado se generaron los 11 diseños de Preferencia Declaradas en donde cada uno presenta 8 tarjetas con diferentes situaciones de elección comparando la situación actual (modo carretero) versus la situación con proyecto (transporte multimodal con proyecto férreo). Las variables que fueron incorporadas en este experimento fueron: costo de transporte, tiempo de transporte, número de transferencias multimodales y la variable confiabilidad. En la **Figura 6-3** se presenta la programación del primero de los once diseños de encuestas el cual fue ingresado al software para la obtención final de las tarjetas.

De esta forma, se obtienen los once (11) diseños generados para la aplicación de las encuestas PD de acuerdo con las características de cada empresa. En la **Figura 6-4** se presenta un ejemplo de las tarjetas aplicadas (diseño 11); la totalidad de los diseños y la programación para cada uno de estos se presenta en el Anexo 5 de la presente investigación.

**Figura 6-3:** Programación en Ngene de las encuestas de Preferencias Declaradas

| SINTAXIS - DISEÑO NGENE  |
|--|
| <pre> Design ?Diseño bayesiano eficiente ;alts = Camion, Ferrocarril ;rows = 8 ;eff = (mnl,d,mean) ;rep = 200 ;bdraws = sobol(20) ;cond: if(Camion.TCamion = 17, Ferrocarril.TFerrocarril = [21,24,26]), if(Camion.TCamion = 20, Ferrocarril.TFerrocarril = [24,26]), if(Camion.TCamion = 23, Ferrocarril.TFerrocarril = 26), if(Ferrocarril.CFerrocarril = 1600000, Camion.CCamion = [1800000,2000000,2250000]), if(Ferrocarril.CFerrocarril = 1800000, Camion.CCamion = [2000000,2250000]), if(Ferrocarril.CFerrocarril = 1050000, Camion.CCamion = [1550000,1800000,2000000])  ;model: U(Camion) = BTIME[(u,-0.09884,0.01781)] * TCamion[13,17,20,23] + BCOSTO[(u,-0.00004403,0.00000771)] * CCamion[1550000,1800000,2000000,2250000] + BDELIVER [-0.017369]* DCamion[75,80,85,90] + BTRANSFER[-0.1]*TRCamion[0]/ U(Ferrocarril) = BTIME * TFerrocarril[18,21,24,26] + BCOSTO * CFerrocarril[1050000,1300000,1600000,1800000] + BDeliver * DFerrocarril[90,95,98,100]+ BTRANSFER*TRFerrocarril[1,2] \$ </pre> |

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-4: Formato tarjetas de elección – Diseño 11




| Ítem                             |  Camión |  Tren |
|----------------------------------|--|---|
| <b>Tiempo Total</b>              | 24 Horas   | 28 Horas  |
| <b>Costo Total</b>               | \$3.920.000 COP  | \$3.585.000 COP   |
|                                  | \$140.000 / Ton  | \$128.000 / Ton   |
| <b>% Confiabilidad/Seguridad</b> | 75   | 100   |
| <b># Tranferencias</b>           | 0  | 1   |

Bajo los supuestos anteriores, ¿Cuál sería su elección?



Fuente: Elaboración propia

Como parte de la metodología de estimación de los modelos se precisa el manejo de las dos alternativas de elección “Me da igual” y “No contestó”, así:

- “No contestó”: En la consolidación final se obtuvo únicamente dos empresas que optaron por esta respuesta, no obstante, se aclara que la empresa INFOODS, al terminar la encuesta, explicó que equivocadamente seleccionó (verbalmente) esta casilla haciendo alusión a que su elección era la situación actual o alternativa por camión lo cual hace coherencia con sus otras respuestas y permite el ajuste y validación de la encuesta. Por su lado, el representante de la empresa Digioca S.A.S. al iniciar el espacio tuvo inconvenientes que impidieron el adecuado desarrollo de la encuesta y no continuo con el ejercicio “No contestó”, por tal motivo, esta encuesta no se tiene en cuenta para los pasos siguientes en la estimación de los modelos de elección y se marca como No Valida.
- “Me da igual”: En total se obtuvieron 25 selecciones de esta alternativa de elección, no obstante, al igual que se realizó con la respuesta explicada previamente, al finalizar las encuestas que optaron por dicha respuesta, se indagó el motivo de su elección y la interpretación del encuestado. Las empresas Soluciones logísticas técnicas S.A y Fabri S.A.S expresaron que la elección hace referencia a que “les

da igual” seguir como están actualmente en su operación por carretera, es decir, que su elección se ajusta a la alternativa por carretera sin optar por utilizar el tren con lo cual se realiza el ajuste en las bases finales para desarrollar los modelos de elección. Para las restantes 19 repuestas “me da igual” (3,1% del total) la interpretación de los encuestados es que, basados en los valores de las variables presentadas, en efecto, las dos alternativas hipotéticas representan la misma opción de elección; en este caso, la forma de tratar estas respuestas es duplicar el registro en la base final de procesamiento indicando una respuesta con la alternativa carretera y una respuesta con la alternativa complementando su viaje con el modo férreo. El manejo optado para estas respuestas se elige en la medida que, en ningún caso, la respuesta “me da igual” corresponde a una negativa del encuestado para responder a la encuesta, rechazo de la actividad o no elección voluntaria de las alternativas.

## **6.4 Estimación de los modelos de elección discreta**

Una vez obtenidas los diferentes diseños y cada una de las tarjetas de elección para los generadores se procedió al tercer paso en la cuantificación de las variables de decisión que consiste en la aplicación de las encuestas de preferencias declaradas. Esta aplicación se realizó por medio de entrevistas directas a los representantes en materia de logística y transporte de las empresas en videollamadas en donde era posible controlar el experimento y la adecuada evaluación de las variables por parte del entrevistado.

El entrevistado entonces se preparaba para evaluar cada una de las 8 tarjetas sin antes brindarle un cordial agradecimiento por el espacio y tiempo brindado para el desarrollo de esta. Para cada tarjeta el encuestado evaluaba las diversas combinaciones de costo, tiempo, confiabilidad y transferencia en cada alternativa: alternativa actual en donde se realiza la movilización de carga exclusivamente por modo carretero y la alternativa con proyecto en el cual se dispone de la infraestructura adecuada para tener un multimodalismo entre el modo carretero y el modo férreo y, elegida la alternativa que mayor utilidad le generara para el transporte de su mercancía. Finalmente se realizaron preguntas de control para conocer la coherencia de la información recolectada o indagar por sesgos de respuesta percibidos en el desarrollo del experimento.

El cuarto y quinto paso en la cuantificación de las variables de decisión consiste en la consolidación y análisis de las 72 encuestas de preferencias declaradas (576 pseudo individuos) realizadas a las empresas cuya logística y cadena de suministro les permitía la correcta evaluación del proyecto y que tuvieron la disponibilidad de atender esta fase de la investigación. Cada empresa encuestada a través de su representante respondió adecuadamente las 8 tarjetas o situaciones hipotéticas escogiendo aquella que maximizara las utilidades o necesidades de transporte particulares de la empresa. Como un proceso lógico, el cuarto paso busca la consolidación y depuración de la información con el fin de identificar sesgos en la información recolectada, respuestas incoherentes o de índole “me da igual” o “no contesta” y tomar decisiones sobre las mismas tal como se describió al final del Capítulo 6.3. El resultado final de este proceso consiste en la obtención de una base de datos con la menor cantidad de preguntas descartadas y la asignación de cada empresa a uno o varios segmentos de demanda teniendo en cuenta los principales productos o insumos transportados así: segmento general 72 encuestas equivalentes a 576 pseudo individuos, segmento de contenedores con 30 encuestas o 270 pseudo individuos, segmento de misceláneos con 47 encuestas o 376 pseudo individuos y el segmento de granel sólido con 21 encuestas equivalentes a 168 pseudo individuos<sup>6</sup>. El quinto y último paso permite la obtención de diferentes modelos de elección discreta, la evaluación estadística de los mismos y la asignación final de una función de utilidad para cada uno de los segmentos de demanda investigado.

Para la presente investigación, la obtención de los modelos de elección discreta se realizó a través del uso del software Panda Biogeme en donde se estimaron diferentes modelos considerando el total de la información, agrupando por segmentos de carga: Modelo General sin segmentación, Carga General (Misceláneos), Contenedores y Carga granel sólido.

Para determinar el mejor modelo entre los construidos se acudió a técnicas estadísticas como la verificación de la consistencia de signos, significancia de las variables y constante

---

<sup>6</sup> Se resalta que algunas empresas encuestadas, según su actividad comercial mixta y el tipo de carga transportada de forma continua, fueron clasificadas y contempladas al momento de asignar las bases finales de diseño en dos segmentos de demanda como por ejemplo la empresa D-Origen S.A.S quienes transportan utensilios de cocina como misceláneos y también a granel con productos de cacao.

dentro de la función de utilidad de cada modelo, correlación ente variables y significancia/confiabilidad general del modelo a través de pruebas de verosimilitud.

Este último paso nos permite estimar, como se mencionó anteriormente, las funciones de utilidad de cada segmento de demanda, los parámetros de cada una de las variables consideradas y finalmente el valor subjetivo del tiempo VOT como una relación entre el parámetro del costo y el parámetro del tiempo. La base teórica con la cual se realizan las estimaciones del valor del tiempo a través de modelos de elección discreta se presentó en el capítulo 2.2. El Valor Subjetivo del Tiempo (VST en español o VOT por sus siglas en inglés) se define como: la disponibilidad que tiene el generador de pagar una cierta cantidad de costo por cada unidad de tiempo que ahorre en su viaje.

Los individuos constantemente efectúan elecciones en el transcurso de su vida, realizando éstas de forma racional, en el sentido que eligen la opción que mayor beneficio les otorga (esto se ha conceptualizado en el aspecto económico como el homo economicus). Igualmente, cuando las empresas establecen una cadena logística para el transporte de sus productos o insumos lo realizan considerando diversos factores “X” como tiempo, costo, infraestructura y modos disponibles “A” para llevar sus cargas desde el lugar de origen al destino final.

El tiempo y el costo representan dos de los factores más determinantes en la elección de un modo o cadenas de transporte (sin considerar en ningún caso que sean los únicos factores de decisión). Es por ello que estas variables constituyen una necesidad imperiosa para ser optimizada por los generadores y transportistas de carga, por tal motivo para la presente investigación se consideró la evaluación de los siguientes factores “X” que determinan la elección de los generadores: Tiempo, Costo, Confiabilidad (Seguridad de la carga y puntualidad), Transferencias multimodales, Frecuencia de envío (Dummy)<sup>7</sup> y Porcentaje de Flota tercerizada (Dummy)<sup>8</sup>.

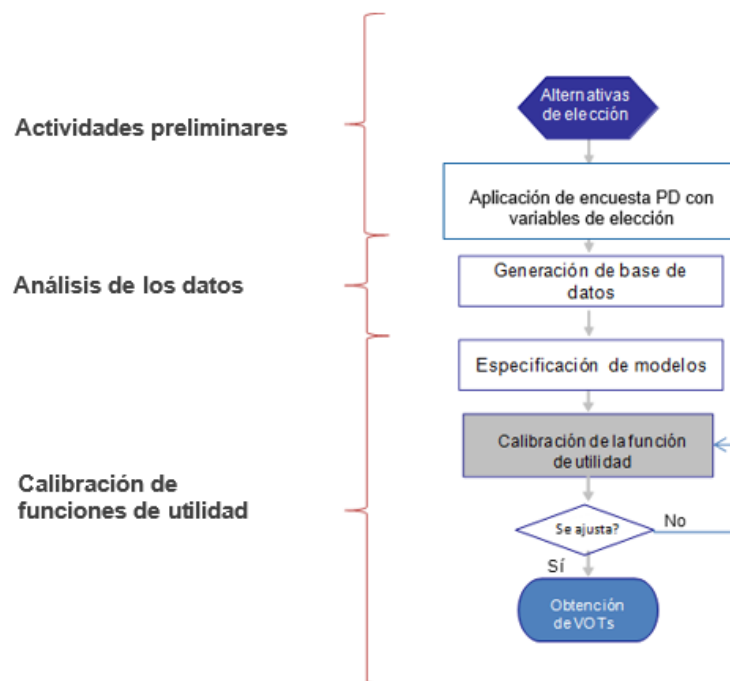
---

<sup>7</sup> La variable frecuencia toma el valor de uno (1) para generadores o cadenas logísticas que demandan alta frecuencia (diaria) o volumen de carga y cero (0) para baja frecuencia (semanal, mensual u ocasionalmente/sobre demanda) o volumen de carga

<sup>8</sup> La variable porcentaje de flota tercerizada o propiedad de la flota toma el valor de uno (1) para empresas cuya operación de transporte es 100% tercerizada y cero (0) para empresas que tienen operación mixta con flota tercerizada y flota propia o con el 100% de flota propia.

La **Figura 6-5** muestra de manera esquemática la metodología utilizada para la estimación de las funciones de utilidad que dan peso a cada una de las variables de decisión por cada segmento de demanda. Como se puede observar, se divide en tres grandes apartados que fueron descritos anteriormente: actividades preliminares (levantamiento de información), análisis de datos y obtención de funciones de utilidad y VOT.

**Figura 6-5:** Metodología para la estimación de los valores del tiempo



Fuente: Elaboración propia

El problema de estimación radica en determinar, a través de la técnica estadística apropiada, los valores de los coeficientes (" $\theta_{kj}$ " en la Ecuación 1 del Capítulo 2.2.1) de la función que logren replicar lo más fielmente posible las elecciones observadas en una muestra de empresas encuestadas. Para la estimación de los parámetros o variables de decisión y su peso relativo en la decisión del usuario o en este caso del generador de carga se emplea el concepto de utilidad (" $U$ ") desarrollado con detalle en el capítulo 2.2. En economía se considera la utilidad como un índice, relativo con el nivel de satisfacción por el consumo de un bien en particular. En este caso, la utilidad está relacionada con el grado de satisfacción (beneficio) que percibe el generador al utilizar una alternativa o cadena logística para transportar sus mercancías desde su origen al destino final de la carga. Esta



elección tiene el supuesto de que la persona encuestada, como representante de la compañía, tiene pleno conocimiento de los atributos que ponderan su cadena logística actual y con proyecto.

Los modelos desagregados de elección discreta constituyen la metodología utilizada en la estimación de las funciones de los modelos de demanda. El elemento más importante en esta metodología es la utilidad, usualmente representada mediante una combinación lineal del costo, características de cada alternativa y variables operativas para cada grupo de encuestados. Bajo este enfoque, el análisis supone conocer, para cada tipo de empresa o segmento de demanda, qué variables determinan el nivel de utilidad no aleatoria asociado a cada alternativa discreta. Esto presupone muchas cuestiones relativas a la especificación del modelo: la estructura de decisiones, la distribución de la porción desconocida de la utilidad, la forma de la función de la parte observable, el tipo y forma de variables que deberían ser utilizadas y, el criterio para decidir qué grupo de empresas podrían ser considerados comparables (Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A., 2017).

En la elección de modo de transporte o viaje entre el origen y destino de la carga, la utilidad de una alternativa se escribe de forma lineal de la siguiente manera en concordancia con la Ecuación 16 del Capítulo 2.2.:

$$U = \alpha_i + \beta_c C_i + B_t t_i + B_{Tr} Tr_i + B_d d_i + B_F F + B_p P^9 \quad (21)$$

Donde:

$C_i$  = Costo de transporte en pesos colombianos por utilizar la alternativa  $i$

$t_i$  = Tiempo de viaje en horas por utilizar la alternativa  $i$

$Tr_i$  = El número de transferencias multimodales ocasionadas por utilizar la alternativa  $i$

$d_i$  = La confiabilidad (deliver) de entrega de la carga por utilizar la alternativa  $i$

$F$  = Frecuencia de envío de productos del generador o cadena logística

$P$  = Propiedad de la flota del generador

---

<sup>9</sup> La variable frecuencia toma el valor de uno (1) para generadores o cadenas logísticas que demandan alta frecuencia (diaria) o volumen de carga y cero (0) para baja frecuencia (semanal, mensual u ocasionalmente/sobre demanda) o volumen de carga. Por su parte, la variable porcentaje de flota tercerizada o propiedad de la flota toma el valor de uno (1) para empresas cuya operación de transporte es 100% tercerizada y cero (0) para empresas que tienen operación mixta con flota tercerizada y flota propia o con el 100% de flota propia.

U = Utilidad de la alternativa i (adimensional)

$\alpha, \beta_c, \beta_t, \beta_{Tr}, \beta_d, \beta_f, \beta_p$  = Parámetros de calibración por cada segmento de demanda.

Utilizando datos apropiados relativos a elecciones de viajes y características individuales, la función anterior puede ser estimada para diferentes segmentos de demanda, de los cuales podemos obtener la cantidad de dinero que el generador está dispuesto a pagar para reducir el tiempo de viaje por una unidad teniendo en cuenta las diferentes variables de elección. Ese Valor Subjetivo del Tiempo de Viaje (VSTV) es calculado como:

$$VSTV = \frac{\partial \bar{U}_i / \partial t_i}{\partial \bar{U}_i / \partial c_i} = \frac{\gamma}{\beta} \quad (22)$$

El cual representa la tasa de sustitución entre el tiempo y el costo para la utilidad constante. A partir de las funciones de utilidad, se utiliza un modelo logit que definirá la probabilidad de que un individuo elija la alternativa i de acuerdo con la Ecuación 15 del capítulo 2.2.1 y que puede ser escrita de la siguiente forma:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{\lambda(Bt(T_j - T_i) + \beta_c(C_j - C_i) + B_{tr}(Tr_j - Tr_i) + B_d(D_j - D_i) + B_f(0 \text{ o } 1) + B_p(0 \text{ o } 1) + \alpha_i)}} \quad (24)$$

Donde:

$P_i$  = Probabilidad de elegir la alternativa i

$T_i, T_j$  = Tiempo de las alternativas i, j

$C_i, C_j$  = Costo de las alternativas i, j

$Tr_i, Tr_j$  = Número de transferencias modales generadas de la alternativa i, j

$D_i, D_j$  = Confiabilidad/seguridad asociada a la alternativa i, j

F = Frecuencia de envío del generador o cadena logística

P = Propiedad de la flota del generador

$\alpha$  = Constante de la alternativa base

$\beta_c, \beta_t, \beta_{Tr}, \beta_d, \beta_f, \beta_p$  = Parámetros de calibración por cada segmento de demanda

$\lambda$  = Factor de escala (se desconoce y por ende se asigna un valor de 1)

Es así que, con base en la información proveniente de las encuestas PD, que emplean las alternativas de tiempos, costos, número de transferencias y confiabilidad de la carga, complementadas con los parámetros de operación de los generadores (frecuencia de

envío y propiedad o tercerización de la flota para el transporte de sus mercancías) se estimaron los coeficientes de las variables independientes que conforman las funciones de utilidad, de forma tal que permitan representar la respuesta de los encuestados (generadores de carga) y, en consecuencia, sus preferencias de elección a través de expresiones matemáticas con las variables que realmente influyen en la decisión.

Los modelos que se estimaron consideran una estratificación acorde con lo estipulado en los literales anteriores de la presente investigación. En este caso se toma en cuenta la segmentación de la demanda de una forma agregada de carga tipo General sin segmentación, Carga General (Misceláneos), Contenedores y Carga granel sólido.

Estos modelos de elección fueron estimados con ayuda del software Panda Biogeme a una significancia estadística del 95%. Los resultados se muestran a continuación en donde B\_Cost corresponde al parámetro del costo, B\_Deliver el parámetro de la variable confiabilidad, B\_Time el parámetro de la variable tiempo, B\_Transf el parámetro de la variable número de transferencias, B\_Flota el parámetro de la variable propiedad o tercerización de la flota del generador o cadena logística, B\_Frecuencia el parámetro de la variable frecuencia de envío de productos y ASC\_Camion corresponde a la constante de la función de utilidad para los segmentos de demanda en los cuales es significativa.

**Tabla 6-5:** Resultados modelo de elección discreta – Modelo general sin segmentación

| Variable                           | Parámetro | MNL1                          | MNL2                         | MNL3                         | MNL4                        |
|------------------------------------|-----------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                                    |           | Valor                         | Valor                        | Valor                        | Valor                       |
| Constante Camión                   | $\alpha$  | -1,22<br>(-2,49/0,0127)       | -1,26<br>(-3,15/0,00163)     |                              |                             |
| Costo                              | $\beta_1$ | -0,000028<br>(-3,97/0,000072) | -0,000028<br>(-4,01/0,00006) | -0,000031<br>(-4,41/0,00001) | -0,000034<br>(-8,94/0,0000) |
| Confiabilidad                      | $\beta_2$ | 0,001620<br>(0,14/0,884)      |                              | 0,0184<br>(2,01/0,044)       | 0,0171<br>(3,25/0,00114)    |
| Propiedad de Flota / Tercerización | $\beta_3$ | 0,456<br>(1,79/0,0737)        | 0,456<br>(1,79/0,0734)       | 0,487<br>(1,90/0,0574)       |                             |
| Frecuencia de envío de carga       | $\beta_4$ | 0,325<br>(1,74/0,0814)        | 0,324<br>(1,74/0,0818)       | 0,398<br>(2,17/0,02999)      |                             |
| Tiempo                             | $\beta_5$ | -0,0945<br>(-3,09/0,0020)     | -0,0951<br>(-3,13/0,00176)   | -0,0525<br>(-2,06/0,0394)    | -0,0383<br>(-2,90/0,00374)  |

| Variable                      | Parámetro | MNL1                      | MNL2                      | MNL3                    | MNL4                     |
|-------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
|                               |           | Valor                     | Valor                     | Valor                   | Valor                    |
| # transferencias multimodales | $\beta_6$ | -0,558<br>(-2,85/0,00437) | -0,566<br>(-2,98/0,00288) | -0,175<br>(-1,50/0,135) | -0,0966<br>(-1,60/0,108) |
| VOT (\$COP/min-ton)           |           | 55,9                      | 56,8                      | 28,4                    | 18,9                     |
| Intial Log likelihood         |           | -406,2                    | -406,2                    | -406,2                  | -406,2                   |
| Final Log likelihood          |           | -372,1                    | -372,1                    | -315,1                  | -379                     |
| Test de Verosimilitud         |           | 68,2                      | 68,2                      | 62,2                    | 54,2                     |
| Chi cuadrado                  |           | 1,47E-16                  | 1,49E-16                  | 3,08E-15                | 1,83E-13                 |

Fuente: Elaboración propia

La tabla presentada está compuesta por las siguientes columnas o componentes:

- i) La primera columna corresponde a la descripción de cada una de las seis variables seleccionadas e incorporadas en cada modelo de elección desarrollado (MNL1, MNL2, ..., MNLn) complementando, de acuerdo con la Ecuación 1 y 21, con la evaluación de modelos con y sin constante modal " $\alpha$ " asociada al modo camión
- ii) La segunda columna representa simbólicamente el parámetro de calibración de cada variable considerada en el modelo analizado o ponderador del atributo de acuerdo con lo expresado en la Ecuación 1 del capítulo 2.2.1.
- iii) Las siguientes columnas representan el resultado de cada uno de los modelos de elección desarrollados. Para cada variable se presenta, en la parte superior el valor específico del parámetro de la variable y, debajo de este valor entre paréntesis se presentan la prueba estadística "t-student / p-valor". Se puede observar que los campos representados en rojo son aquellos modelos cuya variable (en rojo) no cumple el valor mínimo de las pruebas estadísticas para un nivel de confianza del 95 al 90% y por ende se puede considerar como No significativa dentro del modelo de elección para el segmento de demanda analizado.
- iv) En la parte posterior se presenta el resultado del Valor Subjetivo del Tiempo (VOT) que representa la relación entre el parámetro del tiempo ( $\beta_5$ ) y el parámetro del costo ( $\beta_1$ ).
- v) Finalmente, se presentan dos pruebas estadísticas de la significancia general del modelo desarrollado y variables modeladas (Test de Verosimilitud y Chi cuadrado respectivamente) que permiten comparar la suficiencia de cada modelo respecto a los modelos alternativos. Así, valores positivos altos del Test

de Verosimilitud representan mejores modelos y, Valores cercanos a cero (0) en la prueba de Chi cuadrado rechazan la hipótesis nula de independencia en las variables respecto a la elección de la alternativa y, por el contrario, acepta la hipótesis alternativa que determina que la elección de la alternativa depende significativamente de las variables.

**Tabla 6-6:** Resultados modelo de elección discreta – Modelo Misceláneos

| Variable                           | Parámetro | MNL1                         | MNL2                        | MNL3                         | MNL4                         |
|------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                    |           | Valor                        | Valor                       | Valor                        | Valor                        |
| Constante Camión                   | $\alpha$  | -1,24<br>(-2,23/0,0255)      | -1,27<br>(-2,83/0,00462)    |                              |                              |
| Costo                              | $\beta_1$ | -0,000029<br>(-3,51/0,00045) | -0,000029<br>(-3,62/0,0003) | -0,000032<br>(-3,98/0,00007) | -0,000023<br>(-4,15/0,00003) |
| Confiabilidad                      | $\beta_2$ | -0,000298<br>(-0,0231/0,982) |                             | 0,0177<br>(1,68/0,0936)      | 0,0254<br>(3,67/0,00024)     |
| Propiedad de Flota / Tercerización | $\beta_3$ | 0,178<br>(0,782/0,434)       |                             |                              |                              |
| Frecuencia de envío de carga       | $\beta_4$ | 0,450<br>(2,16/0,0304)       | 0,468<br>(2,25/0,0244)      | 0,529<br>(2,58/0,0099)       |                              |
| Tiempo                             | $\beta_5$ | -0,0848<br>(-2,46/0,0138)    | -0,0832<br>(-2,45/0,014)    | -0,0391<br>(-1,51/0,134)     | -0,0259<br>(-1,55/0,112)     |
| # transferencias multimodales      | $\beta_6$ | -0,66<br>(-2,96/0,00313)     | -0,656<br>(-3,05/0,00232)   | -0,260<br>(-1,90/0,0576)     | -0,197<br>(-2,24/0,025)      |
| VOT (\$COP/min-ton)                |           | 49,2                         | 48,5                        | 20,6                         | 18,7                         |
| Intial Log likelihood              |           | -313,3                       | -313,3                      | -313,3                       | -313,3                       |
| Final Log likelihood               |           | -288,2                       | -288,5                      | -291,1                       | -294,5                       |
| Test de Verosimilitud              |           | 50,3                         | 49,6                        | 44,5                         | 37,5                         |
| Chi cuadrado                       |           | 1,32E-12                     | 1,85E-12                    | 2,57E-11                     | 9,02E-10                     |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-7:** Resultados modelo de elección discreta – Modelo Contenedores

| Variable                              | Parámetro | MNL1                        | MNL2                        | MNL3                        | MNL4                        |
|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                       |           | Valor                       | Valor                       | Valor                       | Valor                       |
| Constante Camión                      | $\alpha$  | -0,266<br>(-0,49/0,62)      | -0,46<br>(-2,37/0,018)      |                             |                             |
| Costo                                 | $\beta_1$ | -0,000031<br>(-4,85/0,0000) | -0,00003<br>(-4,94/0,0000)  | -0,000031<br>(-4,95/0,0000) | -0,000031<br>(-5,01/0,0000) |
| Confiabilidad                         | $\beta_2$ | 0,00738<br>(0,681/0,496)    |                             | 0,0111<br>(1,59/0,117)      | 0,0123<br>(1,63/0,103)      |
| Propiedad de Flota /<br>Tercerización | $\beta_3$ | 0,310<br>(1,82/0,0691)      | 0,305<br>(1,81/0,0706)      | 0,316<br>(1,86/0,0624)      |                             |
| Frecuencia de envío de carga          | $\beta_4$ | 0,0445<br>(0,265/0,791)     |                             |                             |                             |
| Tiempo                                | $\beta_5$ | -0,086<br>(-3,02/0,00254)   | -0,0893<br>(-3,46/0,000531) | -0,0778<br>(-3,30/0,001)    | -0,0709<br>(-3,09/0,0019)   |
| # transferencias multimodales         | $\beta_6$ | 0,0453<br>(0,251/0,802)     |                             | 0,123<br>(1,47/0,121)       | -0,158<br>(-1,74/0,084)     |
| VOT (\$COP/min-ton)                   |           | 46,2                        | 50,3                        | 41,3                        | 38,1                        |
| Intial Log likelihood                 |           | -499,1                      | -499,1                      | -499,1                      | -499,1                      |
| Final Log likelihood                  |           | -456,1                      | -456,3                      | -456,3                      | -458,1                      |
| Test de Verosimilitud                 |           | 86,0                        | 85,5                        | 85,6                        | 82                          |
| Chi cuadrado                          |           | 1,81E-20                    | 2,32E-20                    | 2,18E-20                    | 1,34E-19                    |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-8:** Resultados modelo de elección discreta – Modelo Granel Sólido

| Variable                           | Parámetro | MNL1                      | MNL2                         | MNL3                        | MNL4                        | MNL5                        |
|------------------------------------|-----------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                    |           | Valor                     | Valor                        | Valor                       | Valor                       | Valor                       |
| Constante Camión                   | $\alpha$  | -0,864<br>(-1,62/0,105)   | -0,772<br>(-2,01/0,0443)     |                             | -4,34<br>(-3,37/0,000757)   |                             |
| Costo                              | $\beta_1$ | -0,000019<br>(-2,58/0,01) | -0,000020<br>(-2,71/0,00663) | -0,000031<br>(-4,95/0,0000) | -0,000128<br>(-4,84/0,0000) | -0,000133<br>(-5,24/0,0000) |
| Confiabilidad                      | $\beta_2$ | -0,00576<br>(-0,496/0,62) |                              | 0,0111<br>(1,59/0,117)      |                             | 0,0514<br>(2,24/0,0248)     |
| Propiedad de Flota / Tercerización | $\beta_3$ | 0,898<br>(4,80/0,0000)    | 0,865<br>(4,85/0,0000)       | 0,316<br>(1,86/0,0624)      |                             |                             |
| Frecuencia de envío de carga       | $\beta_4$ | 0,154<br>(0,844/0,399)    |                              |                             |                             |                             |
| Tiempo                             | $\beta_5$ | -0,0662<br>(-2,12/0,0343) | -0,0629<br>(-2,08/0,0373)    | -0,0778<br>(-3,30/0,00098)  | -0,514<br>(-4,82/0,0000)    | -0,295<br>(-4,15/0,000034)  |
| # transferencias multimodales      | $\beta_6$ | -0,287<br>(-1,42/0,155)   | -0,244<br>(-1,52/0,147)      | -0,123<br>(-1,37/0,141)     | -2,17<br>(-3,43/0,00061)    | -0,791<br>(-2,50/0,0122)    |
| VOT (\$COP/min-ton)                |           | 59,0                      | 53,5                         | 41,3                        | 66,9                        | 37,1                        |
| Intial Log likelihood              |           | -435,3                    | -435,3                       | -435,3                      | -435,3                      | -435,3                      |
| Final Log likelihood               |           | -382,4                    | -382,9                       | -383,6                      | -394,4                      | -396,2                      |
| Test de Verosimilitud              |           | 105,8                     | 104,8                        | 103,4                       | 81,8                        | 78,2                        |
| Chi cuadrado                       |           | 8,08E-25                  | 1,35E-24                     | 2,76E-24                    | 1,54E-19                    | 9,54E-19                    |

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en cada uno de los modelos de elección discreta elegidos en cada segmento de demanda se realizan las diferentes pruebas estadísticas para constatar la integralidad y validez de cada modelo teniendo en cuenta las siguientes consideraciones.

**Figura 6-6:** Interpretación de test estadísticos asociados

| Variable                |                  | Significativamente distinta de 0 | No significativamente distinta de cero  |
|-------------------------|------------------|----------------------------------|---|
| Relevante o de Política | Signo correcto   | OK                               | Mantener en el modelo                   |
|                         | Signo incorrecto | Problema serio                   | Problema                                |
| Adicional               | Signo correcto   | OK                               | Probar si es posible sacarla del modelo |
|                         | Signo incorrecto | Sacar del modelo                 | Sacar del modelo                        |

Fuente: Mixed Logit Models, Julian Arellana (2018), Curso modelos de elección discreta Universidad de los Andes.

Teniendo en cuenta las anteriores recomendaciones, se determina los siguientes criterios de elección de los modelos propuestos:

- Consistencia de signos: se determinan los signos adecuados para cada variable de evaluación así: signos negativos para el costo, tiempo y transferencia en donde un aumento de una unidad en alguna de estas variables genera una des-utilidad para el generador de la carga. Por el contrario, signo positivo para la variable confiabilidad que indica que un aumento en el porcentaje de entregas que llegan a tiempo y sin daños aumenta la utilidad del generador. Finalmente, para las variables Dummy se establece como consistente el signo positivo en ambos casos en donde los generadores de carga son más susceptibles de considerar un sistema multimodal que traiga beneficios a su cadena logística cuando tercerizan la totalidad del transporte de sus productos y, de igual forma, para los generadores y cadenas logísticas de mayor frecuencia y volumen de envío de sus productos representa una opción más útil el transporte por medios férreos cuya capacidad de transporte es significativamente mayor al transporte por carretera.



- Significancia de las variables: a través de la prueba t-robusta validamos la significancia de cada variable para entre un 90% y 95% de confianza. Se puede observar que en la mayoría de las variables investigadas la columna “Rob, t-test” un valor absoluto superior a 1,65 que corresponde al valor crítico de la distribución normal para el porcentaje de confianza establecido indicando, en términos generales, que las variables analizadas, en todos los segmentos, afectan de manera directa la variable de respuesta estudiada, que en este caso representa la elección de alternativa hecha por el encuestado. De acuerdo con la Figura 6-6, para las variables que no cumplían con dicho criterio se evaluó la pertinencia de la variable en la función de utilidad y el peso de la misma en la elección de los generadores.
- Significancia del modelo: a través de la prueba Chi cuadrado “ $X^2$ ” de un grado de libertad aplicada a la diferencia entre la logverosimilitud inicial y final se puede establecer la significancia del modelo.
- Correlación entre variables: este estimativo establece la relación que existe entre dos variables para explicar un mismo comportamiento en la función de utilidad. De esta forma a través de la prueba p se establece la correlación entre variables observando que, de forma mayoritaria, al igual que el estadístico Test-t los valores obtenidos son inferiores al 0.1 lo cual indica niveles de confianza medios de 90%.

Finalmente, y basados en los análisis realizados anteriormente, a continuación se presentan las funciones de utilidad elegidas para cada segmento de demanda en donde se representan los ponderadores del atributo o variable “ $\theta_{kj}$ ” y la constante modal de la función de utilidad de acuerdo con la expresión matemática presentada en la Ecuación 1 del Marco de Referencia de la presente investigación.

**Tabla 6-9:** Elección de funciones de utilidad para cada segmento de demanda - Principal

| Segmento de demanda              | General sin segmentación | Carga Misceláneos | Carga contenerizada | Carga Granel Sólida |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Modelo elegido                   | MNL3                     | MNL3              | MNL3                | MNL2                |
| VOT (\$COP/min-ton)              | 28,4                     | 20,6              | 41,3                | 53,5                |
| Constante Camión                 |                          |                   |                     | -0,772              |
| Costo                            | -0,000031                | -0,000032         | -0,000031           | -0,00002            |
| Confiabilidad                    | 0,0184                   | 0,0177            | 0,0111              |                     |
| Propiedad de Flota/Tercerización | 0,487                    |                   | 0,316               | 0,865               |
| Frecuencia de envío de carga     | 0,398                    | 0,529             |                     |                     |
| Tiempo                           | -0,0525                  | -0,0391           | -0,0778             | -0,0629             |
| # transferencias multimodales    | -0,175                   | -0,26             | -0,123              | -0,244              |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-10:** Elección de funciones de utilidad para cada segmento de demanda – Auxiliar

| Segmento de demanda              | General sin segmentación | Carga Misceláneos | Carga contenerizada | Carga Granel Sólida |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| VOT (\$COP/min-ton)              | 18,9                     | 18,7              | 38,1                | 37,1                |
| Constante Camión                 |                          |                   |                     |                     |
| Costo                            | -0,000034                | -0,000023         | -0,000031           | -0,000133           |
| Confiabilidad                    | 0,0171                   | 0,0254            | 0,0123              | 0,0514              |
| Propiedad de Flota/Tercerización |                          |                   |                     |                     |
| Frecuencia de envío de carga     |                          |                   |                     |                     |
| Tiempo                           | -0,0383                  | -0,0259           | -0,0709             | -0,295              |
| # transferencias multimodales    | -0,0966                  | -0,197            | -0,158              | -0,791              |

Fuente: Elaboración propia

Se determinan unas funciones de utilidad auxiliares en donde se omiten las variables Dummy: frecuencia y propiedad de la flota, previendo la dificultad que se pueda tener al momento de ser aplicadas en un contexto práctico del modelo logit para determinar el potencial de captación de carga del proyecto férreo Tren del Carare debido a que, como se comentó en literales anteriores, estas representan propiedades específicas de los generadores de carga y/o cadenas logísticas y no son endógenas del sistema de transporte, no obstante, la obtención de significancia estadística en estas variables en los modelos principales afirma la hipótesis que la elección de una alternativa de transporte por parte de los generadores incluye variables adicionales al tiempo y costo y, como el caso

de las variables frecuencia y propiedad de la flota, no solo son determinadas por la implementación de nuevos proyectos logísticos sino también de las características de cada empresa que determina su afinidad con los sistemas convencionales o la consideración de una nueva alternativa multimodal.

## 7.DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DEL CORREDOR FÉRREO TREN DEL CARARE

El último gran componente del trabajo de investigación corresponde a la estimación del potencial de captación de demanda para el proyecto seleccionado como estudio de caso correspondiente al Tren del Carare cuya zona de influencia directa en la región Cundiboyacense permitiría una importante apertura de fronteras a través de una conexión más ágil con los servicios portuarios de la costa Caribe Colombiana y la continuidad que brindaría al sistema férreo nacional (y en consecuencia a la carga) con su articulación con el corredor férreo del Atlántico (La Dorada – Chiriguana – Santa Marta).

En el presente capítulo, es pertinente realizar una recapitulación respecto a las fuentes de información empleadas para la conceptualización del proyecto y análisis técnicos: **i)** planes y políticas logísticas establecidas por el gobierno nacional para potenciar la competitividad del país como un conjunto articulado de actividades como la disminución de los tiempos en procesos logísticos, fomentar la multimodalidad, generación de nodos logísticos en la red de transporte, entre otros, **ii)** referencias internacionales de la operación férrea de países como Brasil, México y Chile, **iii)** consideraciones y recomendaciones expuestas en mesas de trabajo y encuestas desarrolladas a actores preponderantes en el sector transporte (stakeholders) como generadores de carga, operadores logísticos, consorcio Ibines Férreo S.A. y la Agencia Nacional de Infraestructura ANI, **v)** el consolidado de encuestas y datos recolectados como parte de la presente investigación en las etapas previas. Esta información será la base para la obtención de los parámetros de operación del modelo de análisis tipo Logit.

### 7.1 Metodología de estimación

La metodología para la determinación de la demanda captada por el proyecto parte de la adecuada representación de los patrones de transporte de carga potenciales de utilizar el

Tren de Carare para la movilización de carga en el territorio nacional con base en los registros obtenidos del RNDC para el año 2021 (capítulo 4.3).

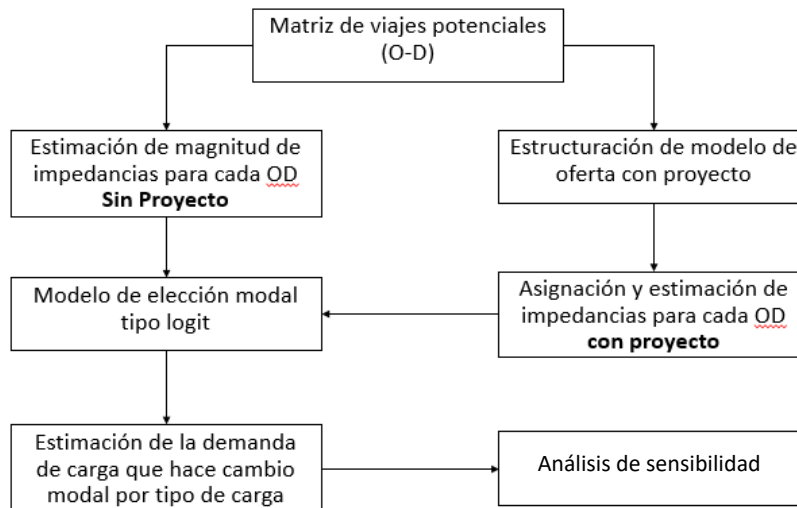
De forma complementaria a la obtención de la matriz de carga anual del proyecto (20.450.951 toneladas), se realiza la estimación de las matrices de impedancias que permiten estimar el costo generalizado de cada cadena logística actual, es decir, permite cuantificar el valor total de cada variable (costo, tiempo, confiabilidad del transporte, número de nodos de transferencia, propiedad de la flota y frecuencia de envío) para todos los pares origen destino en la matriz de carga potencial y finalmente obtener, a través de la función de utilidad de cada segmento de demanda, el costo generalizado de transportar una tonelada de mercancía entre un par origen destino. Finalmente, se realiza la asignación de las matrices de carga determinando para cada par origen destino los nuevos valores de la matriz de impedancias que permiten nuevamente estimar el valor de cada variable ahora utilizando el transporte férreo como un sistema complementario para el transporte de mercancías (tiempo de viaje en ferrocarril, tiempos de cargue y descargue, costo de transporte en el modo férreo y costo de transferencia de la carga).

Al finalizar el proceso de análisis se determina, por medio de un **modelo logit**, la probabilidad que tiene cada par origen destino y segmento de demanda (general, misceláneos, contenedores y granel sólido) de movilizar la carga utilizando el proyecto como parte de su esquema logístico de transporte. La determinación de la probabilidad de utilizar el proyecto corresponde, en términos generales, a la comparación del costo de cada una de las alternativas: actual y con proyecto Tren del Carare (Ecuación 15 del Capítulo 2.2.1) una vez se monetizan cada una de sus variables por medio de la función de utilidad construida para cada segmento de demanda a través del análisis de las encuestas de preferencias declaradas que, como se mencionó anteriormente, fueron analizadas y desarrolladas directamente a generadores de carga de la región Cundiboyacense con el fin último de comprender el comportamiento y variables que influyen en la elección de una alternativa para el transporte de sus productos e insumos.

En la **Figura 7-1** se presenta esquemáticamente la metodología general usada para la estimación de la demanda de carga del proyecto férreo para cada segmento de demanda definidos como potenciales a ser transportados por el Ferrocarril teniendo en cuenta el modo de transporte por el cual se moviliza en la actualidad, la forma y embalaje utilizado

para su transporte, la participación en el mercado metropolitano/regional y la vocación misma de la carga para ser transportada por modo férreo.

**Figura 7-1:** Metodología general del modelo logit de probabilidad de captación



Fuente: Elaboración propia

## 7.2 Estimación de los valores de las variables de decisión

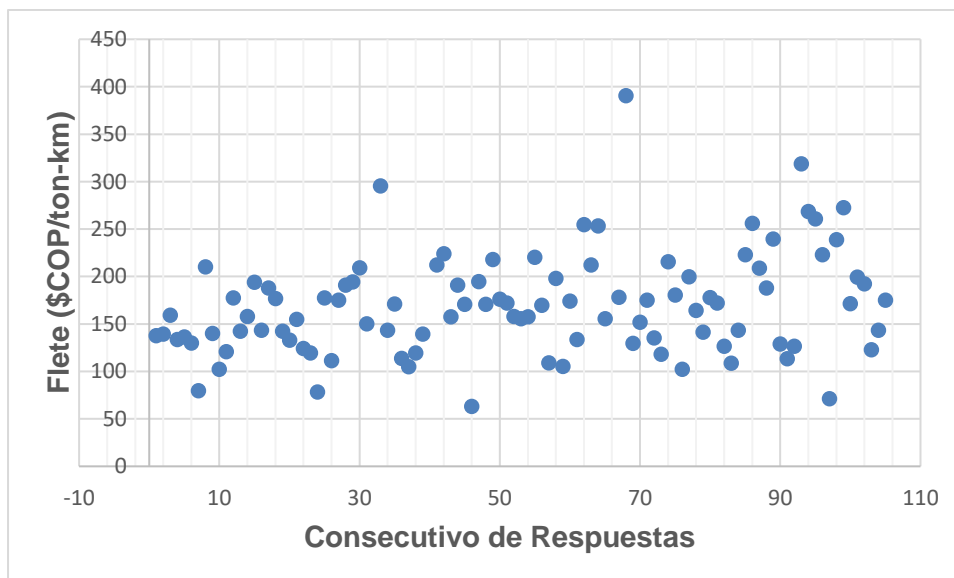
Para la estimación del modelo de carga se precisan parámetros que reflejen las características propias de los escenarios a analizar, dichos parámetros se encuentran sujetos a las características actuales del transporte de carga como lo son el costo de transporte en carretera por tonelada – kilómetro, la velocidad de operación promedio de los vehículos de carga por carretera, la red carretera de transporte regional y su caracterización, el flete del transporte en ferrocarril, el tiempo y costo de las transferencias y la velocidad de operación del Ferrocarril. Por lo anterior, a continuación se estiman los valores de cada variable de decisión que permita estimar, para cada cadena de carga (par OD), el costo generalizado de transporte tanto para el escenario actual en donde la carga se moviliza exclusivamente por carretera como para el escenario con proyecto que considera la implementación del Tren del Carare como complemento para el movimiento de carga.

### 7.2.1 Costo del transporte por carretera

En la fase Acercamiento a Stakeholders, se realizó una campaña de caracterización de los generadores de carga por medio de entrevistas a representantes de diversas empresas con ámbito regional y nacional, allí se indagó por sus principales características de operación actual para transportar sus mercancías desde la planta o zona de producción hasta el destino final de las mismas.

A continuación, se presenta una gráfica de dispersión con las respuestas de los generadores a la tarifa de transporte que percibían actualmente para movilizar sus mercancías por modo carretero homogenizadas en \$COP/Ton-km.

**Figura 7-2:** Flete de transporte por carretera suministrado por generadores de carga



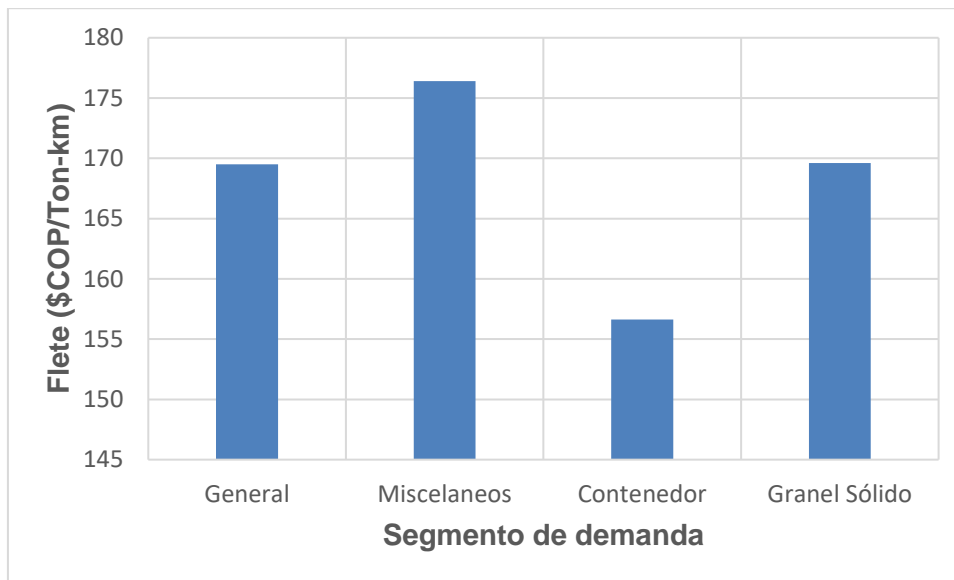
Fuente: Elaboración propia con base en información recolectada en la campaña de campo

Al consolidar la totalidad de los fletes reportados por los generadores y en consecuencia la agrupación de todas las tipologías de carga movilizadas se presenta una variabilidad importante, no obstante, es posible observar una mayor concentración en valores medios entre 140 y 200 \$COP/Ton-km como tarifa media de transporte de mercancías.

Finalmente, se agrupan las empresas de acuerdo con su principal producto o actividad económica y se obtienen los diferentes fletes de transporte para cada uno de los

subsegmentos de carga estimados en los modelos de elección discreta para estimar el potencial de utilización de una red multimodal para el transporte de mercancías.

**Figura 7-3:** Flete del transporte por carretera por segmento de demanda



Fuente: Elaboración propia con base en información recolectada en la campaña de campo

La consolidación final presentada en la gráfica anterior nos permite establecer tarifas de transporte por carretera desagregadas por segmento de carga que van desde los 157 \$COP/Ton-km para el transporte de mercancías por medio de contenedores hasta los 176 \$COP/Ton-km para el transporte de carga misceláneo dadas sus variables necesidades para el transporte.

Las consideraciones anteriores nos permiten representar de una forma más precisa los costos de transporte por carretera y robustecer el modelo logit para la estimación de carga del proyecto.

### 7.2.2 Costos de transporte por modo férreo

De igual forma que en la estimación de los fletes para el modo carretero, la estimación de los costos de transporte por modo férreo se realiza por medio de la consolidación y análisis de la información primaria recolectada, principalmente, en las mesas de reuniones sostenidas con el exoperador férreo Ibines férreo S.A. y la Agencia Nacional de



Infraestructura (ANI) las cuales son un referente importante de la actual operación de los corredores férreos entre La Dorada, Chiriguana y Santa Marta en un total de 767 km y el corredor Bogotá – Belencito.

De acuerdo con lo anterior, se realizó la consulta oficial de las tarifas de transporte manejadas en la operación del sistema ferroviario del país. La interacción con el exoperador, al igual que la entrevista realizada con los actuales usuarios de la red como Argos S.A. y Cerámicas San Lorenzo, permitió a la investigación establecer las tarifas para dos segmentos de demanda así:

- Contenedores: Las tarifas públicas en el corredor La Dorada – Puerto Capulco – Cartagena/Barranquilla para el transporte de contenedores el cual recorre una distancia de 890 km, se estableció en 2.600.000 \$COP por contenedor. El costo incluye las maniobras de transferencia desde el buque al tren y el flete en ambos medios de transporte.

En esta operación, si se tiene únicamente en cuenta el modo férreo del cual se está realizando el análisis se expresa que el costo de transporte desde la estación de Puerto Capulco a la Dorada en una distancia media de 405 kilómetros es de 1.000.000 \$COP.

De esta forma, realizando la relación entre el precio reportado por la operación multimodal en el tramo férreo por la distancia recorrida y a su vez por una capacidad media de transporte de 30 toneladas por contenedor se establece una tarifa media de 82,0 \$COP/Ton-km. En este análisis se elimina la influencia del costo de maniobras en la tarifa férrea total para ser analizada posteriormente.

- Carga general: A su vez las tarifas públicas en el corredor La Dorada – Santa Marta para el transporte de carga general el cual recorre una distancia de 767 km, se estableció en 96.000 \$COP/Ton para cargas en estiba, paletizada o en big bags. El costo incluye únicamente el costo de tránsito desde la Dorada a Santa Marta sin considerar el costo de maniobras de transferencia debido a que para cada mercancía se debe determinar las necesidades y cuidados requeridos. De igual

forma se realiza la relación entre el precio reportado por tonelada y la distancia recorrida para determinar una tarifa media de 125,9 \$COP/Ton-km.

- Cemento en bultos: La empresa Argos S.A. es el principal usuario del corredor férreo Bogotá – Belencito transportando, para el año 2021, cerca de 50 mil toneladas de cemento entre su planta de producción en inmediaciones de la ciudad de Sogamoso hasta la bodega ubicada adyacente de la estación del ferrocarril en Bogotá (Km 5). La tarifa compartida por la empresa para cubrir este recorrido corresponde a 34.000 \$COP/Ton en una longitud total aproximada de 256 km.

La relación precio reportado por tonelada y distancia media recorrida nos permite determinar una tarifa media de 136 \$COP/Ton-km. Este valor en ningún caso incluye costos de cargue y descargue debido a que, por las particularidades del corredor, la empresa Argos S.A. realiza esta actividad por su cuenta.

Complementariamente, la misma empresa moviliza mercancías sobre el corredor La Dorada – Chiriguana entre las estaciones de Puerto Wilches y Puerto Triunfo en una distancia media de 270 km a un costo de entre 29.000 y 30.000 pesos por tonelada equivalentes a una media de 109,4 \$COP/Ton-km. Este valor no incluye maniobras de transferencia en La Estación debido a que es determinada de acuerdo con el volumen de la carga y la frecuencia de consolidación.

En todos los casos el exoperador expresa puntualmente *que “para cada uno de sus clientes se hace un análisis técnico, logístico y operativo con la información que es suministrada por la empresa, para presentar una propuesta diseñada a las necesidades del cliente”*. De esta forma se concluye que los valores presentados corresponden a tarifas medias que pueden llegar a variar dependiendo de las necesidades propias de la empresa, la tipología de carga, el volumen de carga transportada y quizá la longitud de transporte de la mercancía.

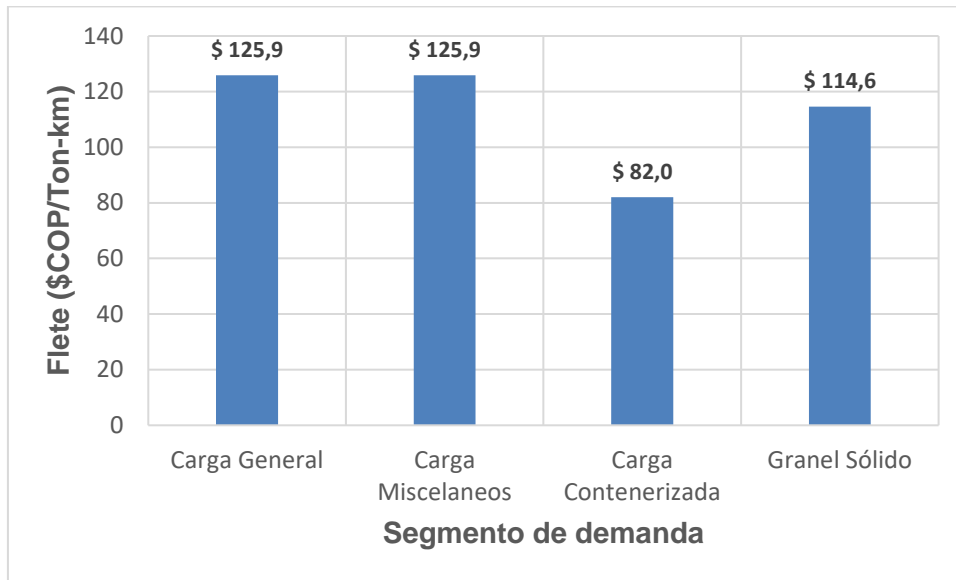
De acuerdo con los análisis anteriores es posible establecer, con un adecuado nivel de confianza, las tarifas actuales de la operación de dos corredores férreos con operación en el territorio nacional para tres tipologías de carga de demanda, no obstante, dadas las limitaciones en la información logística multimodal del país, derivadas del abandono que

---

ha sufrido este modo de transporte a lo largo de las últimas décadas y, que hasta el año 2016 se han venido adelantando diferentes estrategias para su reactivación y posicionamiento, no es posible acceder a una tarifa para el segmento de demanda de carga a granel.

Para suplir dicha limitante, nos valemos de información pública de sistemas de transporte ferroviarios más consolidados a lo largo del continente como la operación del modo férreo en los países de México y Brasil. En México, las principales empresas de transporte han homogenizado y estipulado tarifas máximas para el transporte de mercancías por modo férreo a través de la Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario (ARTF) con una participación activa de empresas como Ferromex, Ferrosur y Kansas City Southern como principales exponentes del mercado de transporte por este modo de transporte. Tomando como referencia las tarifas establecidas por las empresas anteriormente es posible determinar una tarifa entre 88 y 95% menor para el transporte de carga a granel respecto al transporte de carga general.

En el caso de Brasil, se analizaron las tarifas máximas para el cobro de transporte de mercancías por modo ferroviario reguladas por la Agencia Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) para cada empresa de transporte habilitada para esta actividad encontrando, de forma general, una relación entre la tarifa establecida para el transporte de carga a granel y carga general de 91% adicional en el costo de transporte. De esta forma, continuación se muestran las tarifas establecidas para los tres segmentos de demanda a ser analizados dentro de la herramienta de modelación tipo logit como potencial de captación del proyecto Tren del Carare.

**Figura 7-4:** Estimación de tarifas para el Tren del Carare

Fuente: Elaboración propia con base en los datos tarifarios obtenidos de la operación del sistema férreo La Dorada – Chiriguana y fuentes de información de la operación férrea en México y Brasil

El costo férreo que será evaluado en el modelo logit consiste en la suma de la tarifa de transporte (flete) más el costo de transferencia estimada para cada segmento de demanda y cadena logística llevado, en todos los casos, a pesos por tonelada kilómetro. De forma similar al análisis realizado anteriormente, la determinación de los costos de transferencia utilizados para esta definición se detallará a continuación.

### 7.2.3 Costo estimado para las maniobras de transferencia

Otro parámetro asociado al transporte de carga en un sistema multimodal es el costo de transferencia, el cual corresponde al uso de la estación de transferencia incluyendo los servicios que esta ofrece (carga/descarga, almacenamiento, transporte interno). Como referencia de los costos de transferencia de la carga se presentan en la Tabla 6 y Tabla 7 los valores cobrados en la sociedad portuaria de Cartagena y Buenaventura, los cuales son representativos de los puertos de Colombia.

**Tabla 7-1:** Valores de referencia costos de transferencia de Carga – CONTECAR

| Proceso                         | Contenedor 20' | Contenedor 40' | Contenedor Vacío | Carga General | Carga Granel Sólido | Vehículos - Maquinaria |
|---------------------------------|----------------|----------------|------------------|---------------|---------------------|------------------------|
| Unidad                          | \$USD / Un     | \$USD / Un     | \$USD / Un       | \$USD / Ton   | \$USD / Ton         | \$USD / Un             |
| Uso de Instalaciones Portuarias | 110            | 145            | 25               | 5,5           | 4,5                 | 85                     |
| Carga / Descarga                | 120            |                | 75               | 6,5           | 5                   | -                      |
| Almacenaje (4 - >11 días)       | 20 -45         | 28 - 56        | -                | 1,25 - 2,2    | 1,9 - 3,2           | 6,5 - 13,0             |

Fuente: Elaboración propia a partir de tarifas del año 2021 de la Sociedad Portuaria Regional de Cartagena – CONTECAR.

**Tabla 7-2:** Valores de referencia costos de transferencia de Carga – SPB

| Proceso                         | Contenedor 20' | Contenedor 40' | Contenedor Vacío | Carga General | Carga Granel Sólido | Vehículos – Maquinaria |
|---------------------------------|----------------|----------------|------------------|---------------|---------------------|------------------------|
| Unidad                          | \$USD / Un     | \$USD / Un     | \$USD / Un       | \$USD / Ton   | \$USD / Ton         | \$USD / Un             |
| Uso de Instalaciones Portuarias | 94             | 118,4          | 21               | 5             | 4                   | 58 – 76                |
| Carga / Descarga                | 100            |                | 90               | -             | -                   | -                      |
| Almacenaje (4 - >11 días)       | 20 – 55        | 22 – 65        | sep-30           | 1,1 – 3,15    | 1,4 – 4,05          | -                      |

Fuente: Elaboración propia a partir de tarifas del año 2021 de la Sociedad Portuaria de Buenaventura SPB

Con base en las tablas anteriores y realizando principal énfasis en las tarifas reportadas por la Sociedad Portuaria Regional de Cartagena CONTECAR, es posible estimar con un adecuado nivel de precisión para los segmentos de demanda Contenedor, Carga general y granel sólido las tarifas para las maniobras de cargue y descargue que son cobradas a la carga por el uso de las instalaciones portuarias y que el consultor considera adecuadas para ser trasladadas a la operación del proyecto Tren del Carare en cada una de sus estaciones de transferencia previstas. Las tarifas estimadas, con una tasa representativa del mercado de 3.867 pesos colombianos por cada dólar (tasa media del año 2021 e inicios del año 2022), corresponden a 13.000 \$COP/Ton para contenedores y derivados del petróleo suponiendo una carga media de 28 toneladas por contenedor y equipo de envase del petróleo, 24.000 \$COP/Ton para carga general y 18.500 \$COP/Ton para carga a granel sólido.

### 7.2.4 Tiempo estimado para maniobras de transferencia

El tiempo de maniobra se aplica al escenario con proyecto, es decir, con la entrada en funcionamiento del Tren del Carare, es un periodo que se adiciona al tiempo de viaje de la carga el cual no es tomado en cuenta para el autotransporte (trayecto carretero) ya que este no contempla la realización de maniobras típicas que permitan la transferencia de la mercancía entre el modo férreo y carretero.

En el caso del ferrocarril se considera todo el proceso que ha de realizar la carga desde su lugar de origen al destino, en el cual se considera el tiempo de viaje desde el origen de la carga a la estación de transferencia (trayectos que se realizan en modo carretero), el tiempo de carga/descarga del camión a la plataforma de transferencia y de la plataforma de transferencia al vagón del tren y, los recorridos internos a que hubiere lugar en la estación de transferencia y el armado del tren.

Para estimar el tiempo de transferencia en las estaciones del ferrocarril se indagó nuevamente con el antiguo operador IBINES Férreo S. A acerca de los tiempos medios requeridos en la actualidad para realizar estas maniobras de transferencia desde el camión al tren como parte de la operación cotidiana del Corredor La Dorada – Chiriguana obteniendo como respuesta que *“El tiempo promedio máximo de transferencia de las unidades es de 2 horas en donde se realiza la revisión técnica del tren y de la carga, el tiempo de cargue y descargue de un contenedor es de 15 minutos, si es carga general podrá demorar entre 30 y 45 minutos por plataforma incluyendo carpada y amarre...”*.

Complementariamente, en mesas de trabajo desarrolladas con representantes de consorcio IBINES Férreo S. A y la ANI, se estableció que el tiempo medio de espera de la carga antes de ingresar a la zona de maniobras es de 30 minutos independiente del tipo de carga a ser transportada estableciendo así un total aproximado de entre 2.5 y 3 horas para la maniobra de transferencia entre el camión y el vagón del ferrocarril.

Finalmente, es necesario sumar el tiempo requerido para el armado del tren con cada uno de los vagones a ser transportados el cual oscila entre 4 y 5 horas para un total medio de 8.0 horas (480 minutos) como tiempo de penalización por realizar el cambio modal considerando la necesidad de realizar transferencia en uno o ambos extremos de la cadena logística. Este tiempo de penalización no se encuentra incluido como factor de

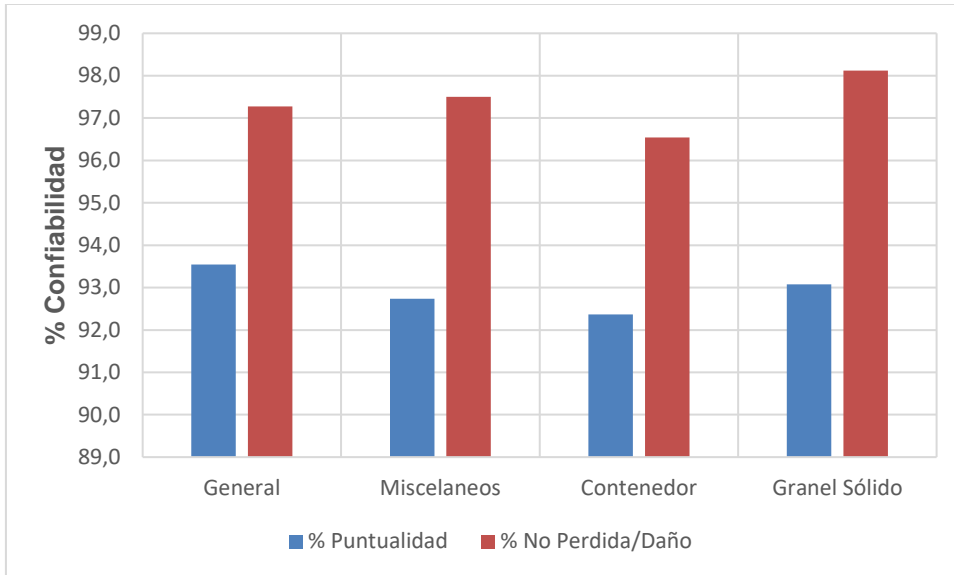
estimación de la velocidad media del sistema férreo y por esta razón, al evaluar un escenario donde se complementen el sistema carretero con el proyecto férreo es necesario sumar el tiempo estimado anteriormente para la maniobra de transferencia al tiempo de recorrido (condicionado por la velocidad media de operación de cada modo) y de esta forma se obtiene el tiempo total para transportar la carga desde el lugar de origen al lugar de destino en el sistema multimodal.

### **7.2.5 Variable confiabilidad y seguridad**

La variable seguridad y confiabilidad hace referencia a dos particularidades del transporte de mercancías que impactan directamente en la eficiencia de los sistemas logísticos: la primera corresponde al porcentaje de envíos que cumplen los itinerarios previamente acordados con los clientes y la segunda corresponde al porcentaje de carga que llega con daños o pérdidas al momento de la entrega final. Para la estimación de esta variable se consultó directamente con los generadores de la carga, a través de las encuestas de caracterización realizadas en esta investigación sobre la actualidad de su transporte en estas dos variables permitiendo la consolidación de cerca de 80 respuestas para su agrupación y posterior análisis.

El porcentaje de pérdida y llegada tarde expresado directamente por los generadores de carga en sus operaciones cotidianas se presenta en la **Figura 7-5**, observándose que uno de los grandes desafíos por el modo carretero es la imposibilidad del cumplimiento en los itinerarios por los imprevistos en el trayecto desde que sale del centro de acopio de mercancía hasta su lugar de destinos por su interacción con el tráfico, por ejemplo: accidentes, congestión, prohibición de circulación al interior de las ciudades en horario fuera a los permitidos, entre otros. A pesar de que el incumplimiento no supera el 10%, lo ideal, de un sistema de transporte que propenda por el bienestar de la nación, sería el 0%. Dicho inconveniente no se ve afectado en los sistemas de trenes por estar aislados del tráfico mixto y su trazado se encuentra priorizado al interior de las ciudades.

En consecuencia, los porcentajes de cumplimiento de itinerarios son homogéneos entre los segmentos de demanda con aproximadamente el 93% de confiabilidad. Por otra parte, el porcentaje de No pérdida de mercancía es mayor al cumplimiento del itinerario donde la carga general y contenedor expresan 97% en cumplimiento y la carga a granel sólido un 98%.

**Figura 7-5:** Porcentaje de confiabilidad y seguridad por segmento de demanda

Fuente: Elaboración propia con base en información recolectada en la campaña de campo

A partir de este conocimiento, los valores que serán insumo para el modelo Logit en el modo carretero se toma el menor valor entre el porcentaje de pérdida y de incumplimiento con el itinerario de entrega de mercancía de cada segmento de carga. Para el caso del modo férreo la experiencia compartida por usuarios de la red férrea nacional como Argos y Acerías Paz del Río expresan que el tren asegura un cumplimiento del 100% en sus itinerarios, así, la variable para el modo férreo se analiza únicamente como el porcentaje de daños o pérdidas que puede tener la carga al momento de ser transportada por acción de la vibración misma de los vagones o en las maniobras de transferencia que se requieran para su viaje desde el origen a su destino final. Debido a la falta de estado del arte respecto a esta variable en el territorio nacional por modo ferroviario, se asignó el porcentaje de la respuesta de los generadores en su operación actual asegurando que en todo caso nunca estuviera por debajo del 95% como referente de la experiencia compartida de forma general por el antiguo operador Ibines Férreo S.A.



## 7.2.6 Variables adicionales de operación

- El parámetro de la **velocidad media de operación** de los camiones se estimó por dos fuentes de información: la primera corresponde al consolidado de información suministrada para los principales orígenes destino nacionales en la plataforma SiceTac del Ministerio de Transporte en la cual se estima una velocidad media de 40 km/h para trayectos nacionales; la segunda fuente de información corresponde a la suministrada directamente por aplicaciones de tráfico como Tom-Tom y Google Maps. Finalmente, la velocidad asignada para cada par Origen Destino de la matriz de carga potencial corresponde a la suministrada por la plataforma Tom-Tom (cuya información permite la consulta para vehículo camión) y está a la vez fue homogenizada por la velocidad reportada por SiceTac para el corredor principal del par OD.

Para los tramos ferroviarios se consideró una velocidad de 50 km/h para el corredor férreo central, el cual es una meta del Gobierno Nacional que espera ser alcanzado con las obras de mejoramiento y rehabilitación para el Tren Central. Finalmente, en lo referente al Tren del Carare la velocidad media que se tomó fue de 70 km/h, considerada una velocidad prudente y probable para un proyecto nuevo.

- **Penalidad por última milla:** El impacto que generan las penalidades por última milla cobra gran relevancia en el transporte multimodal en la medida que, a partir de la integralidad que haya entre los modos de transporte en la red, desincentivará el cambio modal de los usuarios potenciales del modo férreo y de esta forma la captación de la demanda. Para el caso del camión no se contempla penalidades por última milla, ya que el camión sale y llega desde los centros de acopio de mercancías. Para el escenario con proyecto esta penalización se establece de acuerdo con el origen y destino de la carga y la accesibilidad a las ciudades de atracción de carga. El costo estimado por cada penalización es de \$10.000 por tonelada transportada, considerando el cobro de transporte de mercancía a cortas distancias, menores a los 15 km, por trayectos de conexión desde una estación de transferencia hacia los centros de producción. Está claro que la necesidad del control y minimización de tarifas impuestas en estos trayectos cortos a tal punto

que la tarifa sea integrada, logrando eliminarlo o reducirlo para que el modo férreo pueda mejorar su nivel de competitividad.

- **Penalidad por número de transferencias:** De acuerdo con lo expresado por las empresas encuestadas, el principal problema para el planteamiento de escenarios de operación multimodal son el número de transferencias en las que pueden incurrir, la desutilidad directa de estas maniobras y su costo y tiempo asociado el cuál fue caracterizado en la sección anterior. Se contemplan máximo 2 maniobras de transferencia, éstas dependerán de la cadena logística que se traduzca en la necesidad de transferir del modo camión a tren y tren a camión para cubrir la totalidad del cada par origen destino (a este análisis se conoce como encadenamiento del viaje).

Cabe resaltar que para el caso del camión no se contempla penalidades por transferencia, por su integralidad con los centros de producción, es decir, el camión sale y llega desde los centros de acopio de mercancías.

- **Frecuencia de envío:** El análisis de esta variable se realizó directamente desde la base del RNDC en la cual se dispone de información del “*número de viajes*” por cada par origen destino, tipo de mercancía y mes del año. Así, para cada combinación de estos parámetros se estimó el número de viajes promedio que se realizan en un mes típico del año y, de acuerdo con la naturaleza de la variable<sup>10</sup> se asignó 1 para mercancías y pares OD con un promedio de viajes mensuales mayor de 25 viajes y cero para los que no cumplen con esta condición.

Finalmente, la variable Propiedad de la flota no fue posible evaluarla con el grado de desagregación de información presentada por el RNDC y la cual se considera una variable específica de la operación y relación comercial de cada empresa, por tal motivo, se asume el valor de cero (0) para el modelo logit que permite no afectar **positivamente** la captación del proyecto férreo y subvalorar su demanda.

---

<sup>10</sup> La variable frecuencia toma el valor de uno (1) para generadores o cadenas logísticas que demandan alta frecuencia (diaria) o volumen de carga y cero (0) para baja frecuencia (semanal, mensual u ocasionalmente/sobre demanda) o volumen de carga

**Tabla 7-3:** Valores de las variables de selección para la evaluación del modelo Logit de carga

| Variable                               | General           | Misceláneos | Contenedor | Granel Sólido |
|--|-------------------|-------------|------------|---------------|
| Flete Camión (\$/Ton-km)               | 179,5             | 176,4       | 156,6      | 169,6         |
| Flete Tren (\$/Ton-km)                 | 125,9             | 125,9       | 82,0       | 114,6         |
| Velocidad Camión (km/h)                | Tom-Tom / SiceTac |             |            |               |
| Tiempo transferencia Cargue (Horas)    | 8                 | 8           | 8          | 8             |
| Tiempo transferencia Descargue (Horas) | 2,5               | 2,5         | 2,0        | 2,5           |
| Costo transferencia (\$/Ton)           | 24.000            | 24.000      | 13.000     | 18.500        |
| Velocidad Tren Central y FDA (km/h)    | 50                | 50          | 50         | 50            |
| Velocidad Tren Carare (km/h)           | 70                | 70          | 70         | 70            |
| Confiabilidad en Carretera (%)         | 90,8              | 90,2        | 88,9       | 91,2          |
| Confiabilidad Tren (%)                 | 96,7              | 96,7        | 96,6       | 98,9          |

Fuente: Elaboración propia

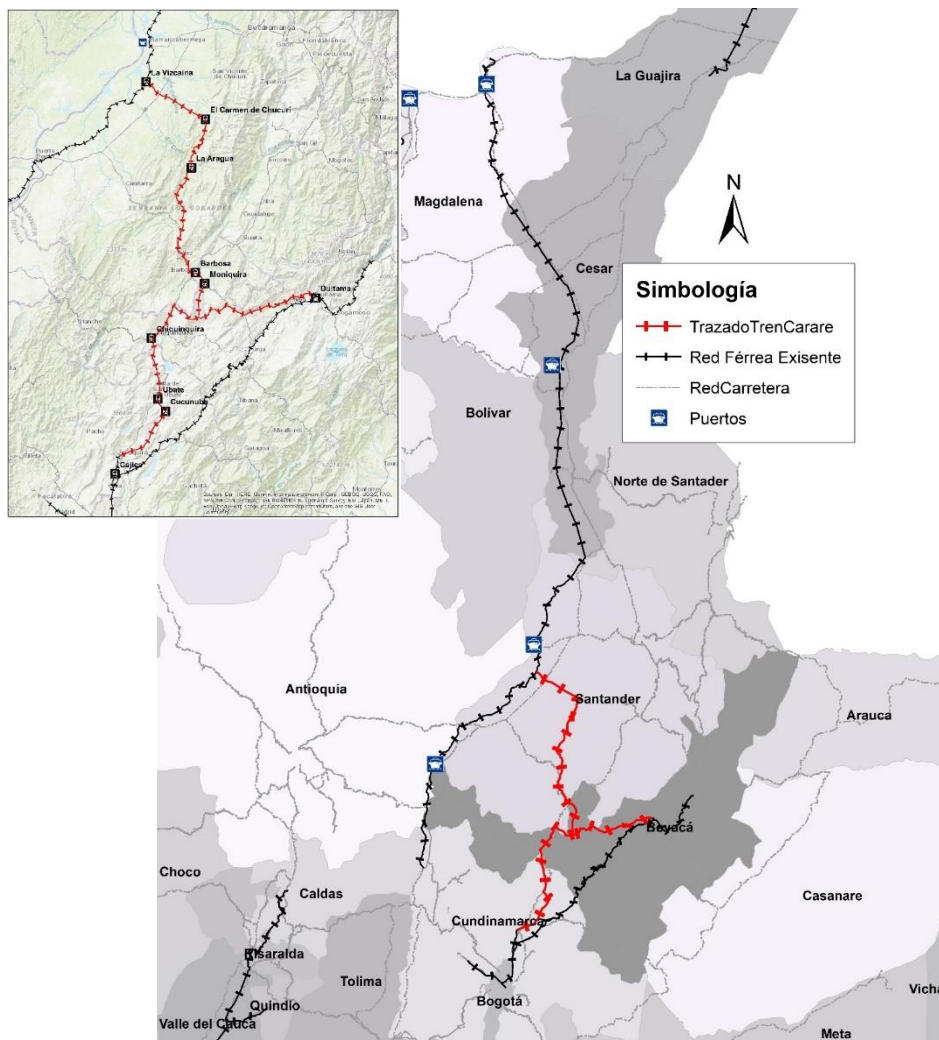
La estimación del valor de cada variable ( $X_{jkq}$ ) mostrado en la Tabla anterior tanto para el modo carretera como para el sistema ferroviario permite completar, en conjunto con los parámetros de calibración o ponderadores del Capítulo 6.3, los parámetros de la ecuación de la Función de Utilidad desarrollada en el capítulo 2.2.1. Es decir, dichos valores, en relación con la distancia de cada par origen destino, son aquellos que acompañan al valor " $\theta_{kj}$ " en la Ecuación 1 del capítulo citado anteriormente y permitirán desarrollar las sumatorias para establecer la utilidad o desutilidad de cada alternativa para cubrir un par origen destino específico dentro de la matriz de viajes.

### 7.3 Escenario de evaluación – caso de estudio

Una vez estimados los valores que serán establecidos para cada variable de selección en cada segmento de demanda y modo de transporte y que con la ayuda de las funciones de utilidad estimadas permitirán simular de la mejor manera las decisiones del generador para elegir el modo o secuencia de modos de transporte más conveniente para transportar la carga en el territorio nacional. La oferta de infraestructura férrea que se contemplará para el análisis del escenario con proyecto corresponde al trazado actual del corredor férreo del Atlántico y el corredor Bogotá – Belencito con las estaciones que actualmente se encuentran operativas y permiten el intercambio modal y, se complementa y articula con el trazado y estaciones propuestas para el Tren del Carare (ver Capítulo 4).

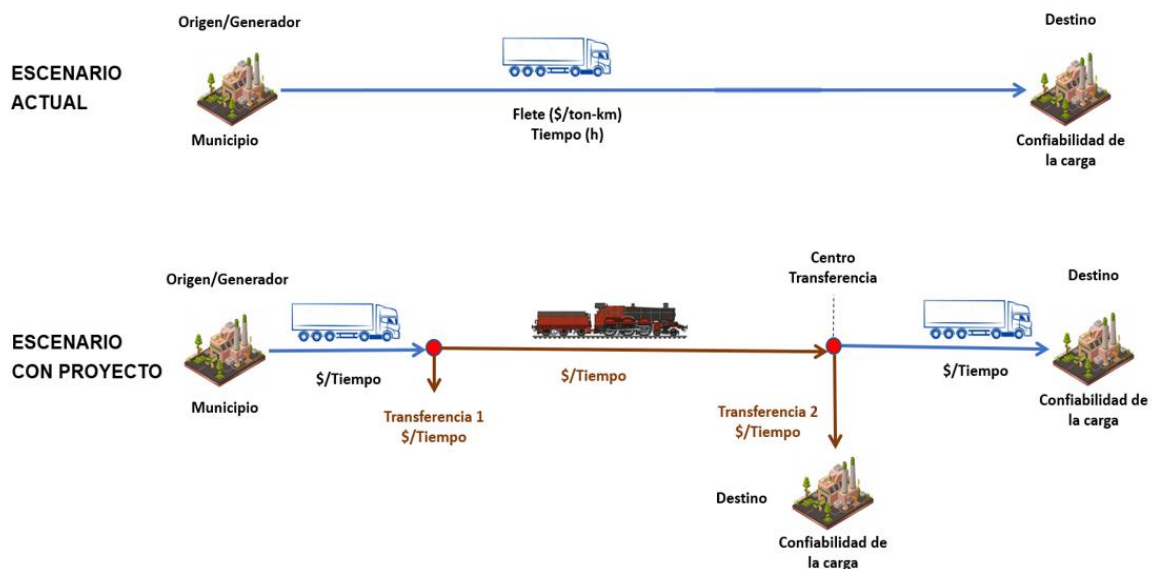
Los escenarios de análisis propuestos con o sin proyecto (ver **Figura 7-7**) se evaluaron por medio de las funciones de utilidad, las dinámicas de operación e infraestructura multimodal y, se compararon con el modo carretero. En cada uno de ellos se realizó el filtrado de la base de datos de la RNDC para el año base 2021, donde el origen o destino puede ser susceptible de complementar su cadena logística con el Tren del Carare. Cabe resaltar que los escenarios planteados buscan identificar el cambio modal (complementariedad) que tendrían la movilización de carga hacia el tren, con lo cual se evaluó la competitividad entre el modo carretero y el tren considerando las variables asociadas, que ya fueron descritos con anterioridad, contemplando un cubrimiento total de la demanda actual para cada cadena logística potencial.

**Figura 7-6:** Trazado Tren del Carare propuesto para la investigación



Fuente: Corporación para el desarrollo del Ferrocarril del Carare, 2011.

**Figura 7-7:** Conceptualización del escenario de evaluación



Fuente: Elaboración propia

El esquema nos permite observar las “penalizaciones” que se evalúan en cada escenario respecto al esquema de operación previsto para el transporte de mercancías en cada escenario a evaluar. A continuación se amplía la descripción de cada escenario.

**Escenario actual:** Consiste en el modo carretero que a la fecha predomina en el mercado de transporte de carga. La carga sale desde los centros de producción ubicados en diferentes partes del país y son transportados por las vías nacionales hasta los puertos o centros de acopio de mercancías para ser llevados a su lugar de destino final o ser embarcados para ser exportados a otros países, viceversa.

**Escenario con proyecto:** En este sub-escenario se incluye el proyecto Tren del Carare dentro de la cadena logística, en busca de integrar un sistema de movilidad alternativo al actual que pueda generar la multimodalidad, mejorar la competitividad de la región Cundiboyacense e incentivo para la reactivación de la red férrea actual al tener una conexión más eficiente o directa con los puertos de carga de Barranquilla, Cartagena y Santa Marta.

En esta situación el modo carretero sirve como modo alimentador y/o complementario del Tren del Carare al encadenar todos pares OD potenciales a conectarse con la estación más cercana de la red férrea. Se considera la integración física y operacional con la red

férrea central: La Dorada – Chiriguaná – Santa Marta, de esta forma aumenta la viabilidad del proyecto al ampliar la red de cobertura que se realizaría en tren desde el interior del país.

En este escenario toda la carga tendrá la posibilidad de conectar con las estaciones de La Dorada, Gamarra, Chiriguaná, Puerto Triunfo, Grecia en Puerto Berrio y García Cadena en Puerto Wilches de la red férrea del Atlántico para realizar una función específica de control, vigilancia de la operación de transporte y maniobras de transferencia y/o intercambio modal que involucra movimientos de cargue y descargue de la mercancía en la estación.

## 7.4 Resultados del modelo logit

Para cada uno de los pares origen – destino y segmentos de demanda considerados como potenciales para utilizar el proyecto férreo, se estimó, a través del modelo logit (Anexo 6), la probabilidad de utilizar el proyecto dadas las condiciones proyectadas para el escenario en evaluación: infraestructura física y parámetros operativos (Aplicación de la Ecuación 15 en cada par origen destino de la matriz de viajes). Finalmente, la sumatoria de la probabilidad de cada cadena de viaje (OD) y el volumen potencial de esa misma cadena da como resultado la carga a ser transportada por el proyecto. A continuación se presenta la carga captada por el Tren del Carare para cada segmento de demanda evaluado según los modelos de elección discreta estimados en la presente investigación.

**Tabla 7-4:** Captación de demanda para el proyecto férreo Tren del Carare

| Segmento demanda | Carga Potencial (Ton/año) | Carga Captada (Ton/año) | % Captación |
|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Contenedor       | 541.155                   | 343.223                 | 63%         |
| Granel Sólido    | 2.097.661                 | 1.023.014               | 49%         |
| General          | 10.281.002                | 4.173.295               | 41%         |
| Misceláneos      | 6.015.965                 | 2.323.681               | 39%         |
| Total general    | 18.935.783                | 7.863.212               | 42%         |

Fuente: Elaboración propia

Se estima una captación media de siete millones ochocientos sesenta y tres mil (7.863.212) toneladas año para el proyecto Tren del Carare equivalentes a un porcentaje de captación del 42% respecto al total de la carga potencial. La mayor participación de la carga captada se establece en el segmento de carga general - el cual corresponde al

modelo de elección discreta que fue estructurado con la totalidad de las encuestas de preferencia declarada (sin desagregación) y en el cual se incluye la carga de carbón como producto de alta importancia para la región Cundiboyacense pero, como se mencionó en el desarrollo de los acercamientos a Stakeholders, no se tuvo voluntad para su participación en la investigación – con una participación del 53% de la carga total captada, seguido de carga de misceláneos con 30% de participación, carga a granel sólido (cereales y tortas) con 13% y por último la carga contenerizada con 4% de participación.

Sobre la carga contenerizada, es importante resaltar que, aunque no presenta una gran participación en la carga captada debido al igualmente bajo volumen de carga potencial, este segmento presenta el mayor porcentaje de captación con cerca del 63% respecto a la carga potencial lo cual representa dos situaciones a ser consideradas: **i)** la primera es la vocación de este tipo de embalaje para conectar con las zonas portuarias y por ende su mayor probabilidad de utilizar el proyecto con su articulación con la red férrea central y, **ii)** como segunda consideración la facilidad percibida por los generadores que transportan su carga en contenedores para utilizar un sistema multimodal.

Se realizó una segmentación auxiliar que permita reconocer la verdadera vocación geográfica de los proyectos y, para investigaciones y/o análisis futuros delimitar adecuadamente la carga potencial de los proyectos. Para esta segmentación se establecieron tres categorías: carga directa, carga indirecta y carga complementaria. La **carga directa** corresponde a aquella que se genera y/o atrae directamente en los municipios aledaños al proyecto férreo y la red férrea actual y por ende contempla una estación de cargue y descargue cercano; **la carga complementaria** corresponde a aquella en la cual solo un extremo está cerca del área de influencia de la red férrea y, por el contrario, requiere de un trayecto importante (longitud) de última milla en modo carretero. Finalmente, **la carga indirecta** corresponde a aquella que no se genera ni atrae en la zona de influencia de la red férrea pero dado su par origen destino puede acceder por carretera al proyecto férreo para transcurrir por este y luego requerir nuevamente un segundo trayecto carretero.

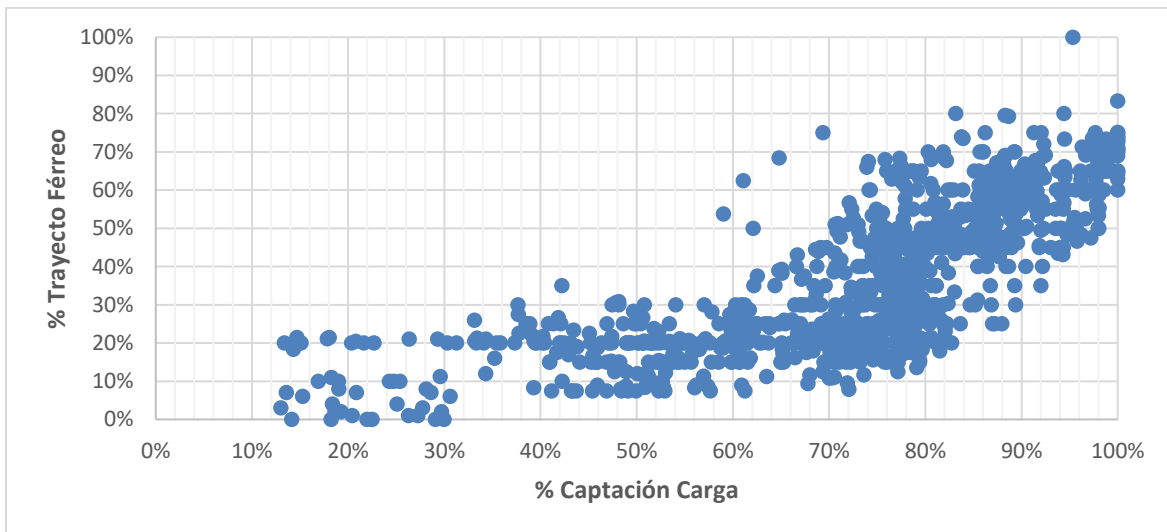
**Tabla 7-5:** Captación de demanda para el proyecto férreo Tren del Carare – segmentación auxiliar

| Segmento demanda     | Carga Potencial (Ton/año) | Carga Captada (Ton/año) | % Captación |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| Directo              | 11.688.384                | 5.871.181               | 50%         |
| Indirecto            | 4.612.772                 | 1.710.273               | 37%         |
| Complementario       | 2.634.627                 | 281.758                 | 11%         |
| <b>Total general</b> | <b>18.935.783</b>         | <b>7.863.212</b>        | <b>42%</b>  |

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que tanto la carga directa como la carga indirecta presentan niveles de captación importantes para un proyecto multimodal, no obstante, la carga complementaria – que requiere de dos trayectos importantes por carretera para conectar con la red férrea y por ende dos penalidades por maniobras de transferencia – no presenta una participación importante para el Tren del Carare. Este análisis se complementa con la gráfica a continuación que representa el porcentaje de captación de la carga respecto al porcentaje total del trayecto (longitud) que transcurre por modo férreo.

**Figura 7-8:** Relación de porcentaje de captación y longitud de viaje en modo férreo



Fuente: Elaboración propia

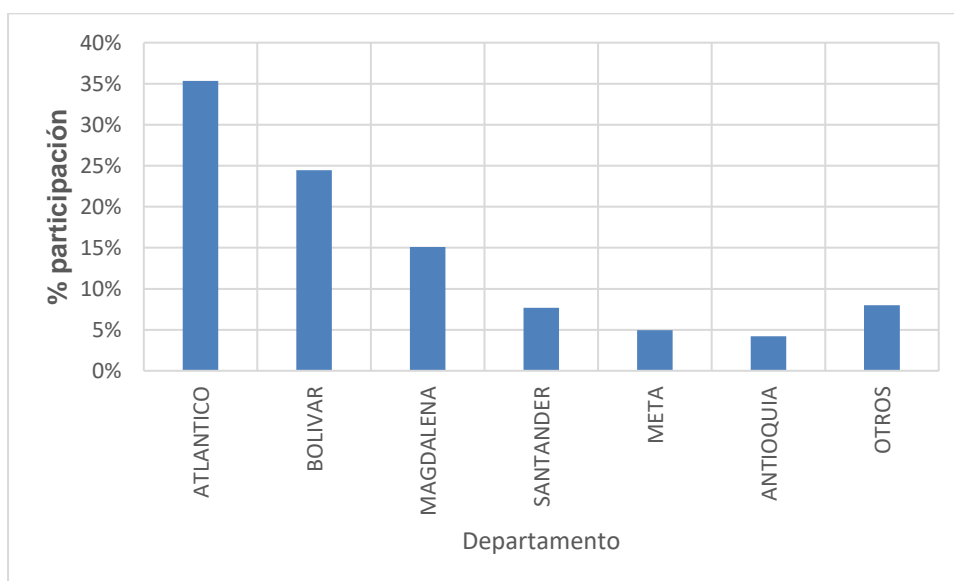
Se puede observar una curva ascendente del porcentaje de captación de demanda respecto al porcentaje de la longitud de la cadena logística transcurre en el modo ferroviario y representa la necesidad de ampliación de la red férrea de la nación para hacer más competitivo este modo de transporte. La gráfica también nos permite observar que, en valores promedio, existe una tendencia pero no una imposición de comportamiento debido a que cada par origen destino y segmento de demanda evalúa de forma desagregada sus



propios parámetros operativos (costos, tiempos, confiabilidad, número de transferencias y frecuencia de envío) lo cual genera variabilidad en la captación de acuerdo a la probabilidad de utilizar el Tren del Carare.

Finalmente, para terminar este análisis se presenta a continuación las regiones que mayoritariamente generan y atraen carga del proyecto. En este análisis se descartan los departamentos propios de Cundinamarca y Boyacá por ser los precursores de dicha demanda y, lo que se pretende, es conocer hacia donde o desde donde se generan las principales conexiones.

**Figura 7-9:** Participación de la captación de demanda por regiones del país



Fuente: Elaboración propia

Así, la región Caribe es la que mayor viabilidad le brinda al proyecto Tren del Carare con el 75% de la generación de la carga del proyecto. Esta condición es posible por la articulación del proyecto con el corredor férreo del Atlántico y la continuidad de la carga en el nodo multimodal de Barrancabermeja. Departamentos como Santander, Meta y Antioquia requieren de trayectos carreteros de conexión que generan una menor disposición a la utilización del proyecto, no obstante, con medidas de operación integral y esfuerzos institucionales pueden aumentar su participación y beneficio del proyecto.

## 7.5 Análisis de sensibilidad

Los resultados analizados en el numeral anterior corresponden a la modelación de la demanda con los parámetros establecidos con base en las fuentes de información primaria y secundaria consultadas a lo largo del desarrollo de la investigación, no obstante, es adecuado generar curvas de sensibilidad a la captación que permitan observar que tan elástica es una variable ante cambios (alzas y bajas) de sus valores. De igual forma, estos análisis permiten identificar el peso de las variables en la captación de la demanda total.

Es adecuado articular lo desarrollado en el presente capítulo con el Marco de Referencia del Capítulo 2.2.2 en el cual se describe el tipo de elasticidad calculado (elasticidad directa) y el fundamento matemático a ser aplicado en cada variable de acuerdo con la Ecuación 20.

### 7.5.1 Sensibilidad a la variable costo

El parámetro costo es un factor que es de constante revisión y optimización por parte de los generadores de carga, así, todas las alternativas probables que tengan a su disposición para poder optimizarlo serán bienvenidas por ellos, no obstante, por el contrario, existen factores externos y operacionales que, en ocasiones, generan sobrecostos en las cadenas logísticas multimodales y los cuales deben ser adecuadamente valorados frente a la implementación de una nueva alternativa (multimodal o no) para el transporte de mercancías.

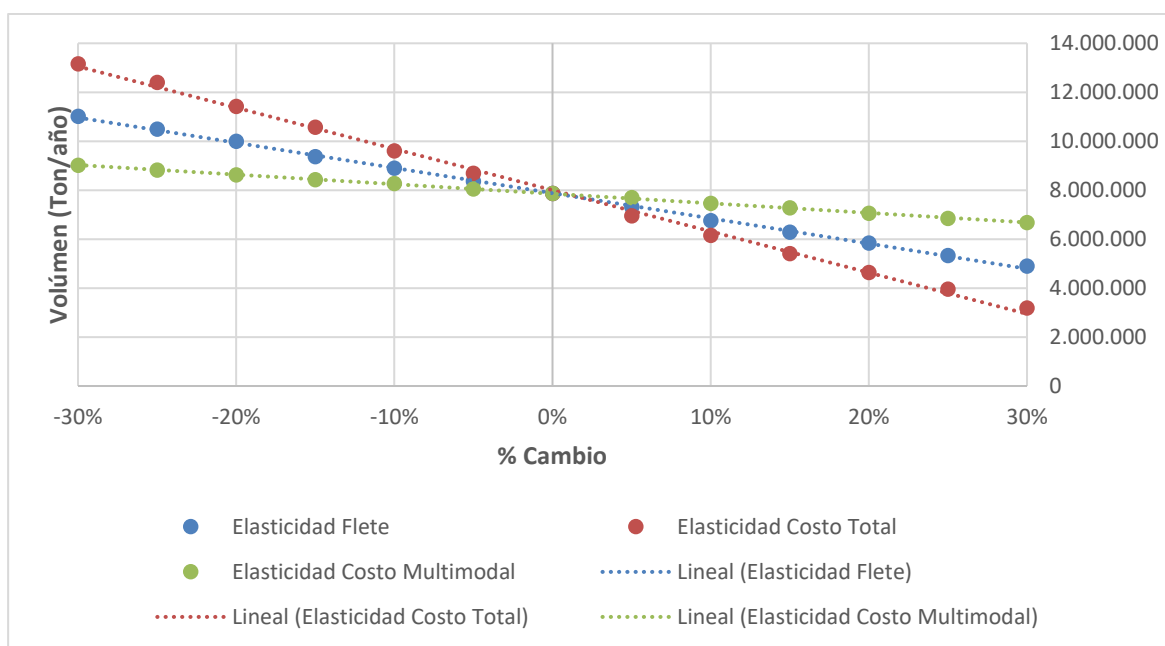
El análisis de sensibilidad se realizó de forma separada para el parámetro del **flete** de transporte que representa la tarifa de movilización de la carga por cada medio de transporte adoptado; el costo de la operación en los nodos de intercambio modal que representa la transferencia de un modo de transporte a otro en la operación **multimodal** y; un análisis de sensibilidad al costo total de la cadena logística o par origen – destino. Los resultados se presentan a continuación en la **Figura 7-10**.

Tanto el parámetro Flete como el Costo Total tienen un comportamiento elástico respecto con índices de Elasticidad de entre 1,34 a 1,26 y de 1,98 a 2,24 respectivamente, lo cual genera alta sensibilidad a cambios en la captación de la demanda por la variación de estas dos variables generando, en promedio, un rango de captación de entre 4 millones de

toneladas ante un incremento del 30% del costo de transporte y 12 millones caso contrario de encontrar formas de optimizar (disminuir) los costos percibidos en un 30%.

Si bien, los costos multimodales (nodos de transferencia) no presentan el mismo grado de elasticidad y se sitúa en un índice de 0,5 (que representa una demanda relativamente inelástica) requieren ser adecuadamente valorados en las operaciones logísticas debido a que su adecuada optimización (30%) podría generar una captación adicional cercana al millón de toneladas anuales y, por el contrario, ineficiencias en los nodos logísticos que conlleven sobrecostos de dichas variables representaría una pérdida de demanda de similar magnitud.

**Figura 7-10:** Análisis de sensibilidad a la variable Costo



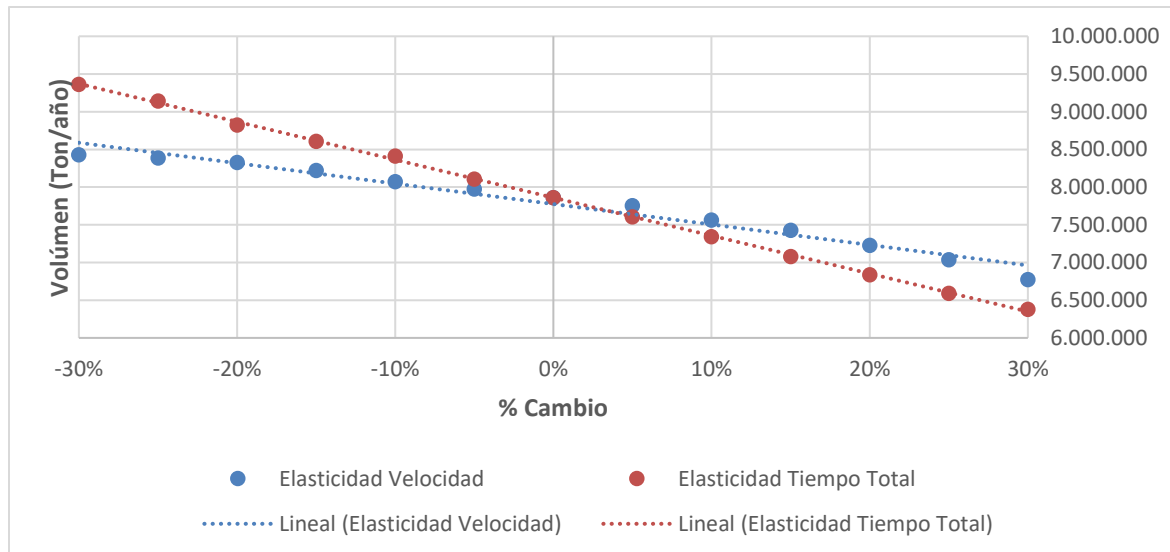
Fuente: Elaboración propia

## 7.5.2 Sensibilidad a la variable tiempo

Una de las variables que tuvo un gran debate respecto a su importancia en la elección de un medio o conjunto de medios de transporte corresponde al tiempo de viaje debido a que, por un lado, investigadores y analistas consideran que dado los altos tiempos de transporte en la operación logística una variación de este parámetro no representa un cambio significativo en la elección y, por otro lado, las encuestas realizadas percibieron una alta

valoración de dicho parámetro por parte de los generadores de carga. Para estimar la elasticidad de esta variable se realizó un análisis de sensibilidad (+30% y -30%) del parámetro de velocidad de operación cuyo valor base se estimó en 70 km/h y el tiempo total de la operación logística que incluye los tiempos de carga y descarga en los nodos de transferencia modal.

**Figura 7-11:** Análisis de sensibilidad a la variable tiempo



Fuente: Elaboración propia

Las dos variables analizadas presentan índices de elasticidad bajos que representan factores relativamente inelásticos equivalentes a 0,35 para la variable velocidad (considerando un rango de entre 90 y 50 km/h para el Tren del Carare) y de 0,64 para el tiempo total. La red férrea actual presenta velocidades bajas de operación y, más allá del índice de elasticidad obtenido, la posibilidad de implementar proyectos con mayores especificaciones y mayor competitividad en esta variable puede traer consigo grandes beneficios en captación de demanda que, en el caso del Tren del Carare, su optimización a 90 km/h puede atraer una demanda adicional de cerca de un millón de toneladas anuales equivalentes a 15% de la demanda del escenario base lo cual no es una cifra despreciable.

### 7.5.3 Sensibilidad al modelo de elección

En el capítulo 6.4 “estimación de los modelos de elección discreta” se generaron unos modelos auxiliares que no tenían en cuenta las variables propiedad de la flota ni frecuencia de envío dada su dificultad de estimación con la información oficial disponible en las

fuentes oficiales como el Ministerio de Transporte. Los modelos auxiliares obtenidos (costo, tiempo, confiabilidad y número de transferencias) redistribuyen el peso específico de las variables dentro de la función de utilidad y por ende en la estimación de la captación de la carga.

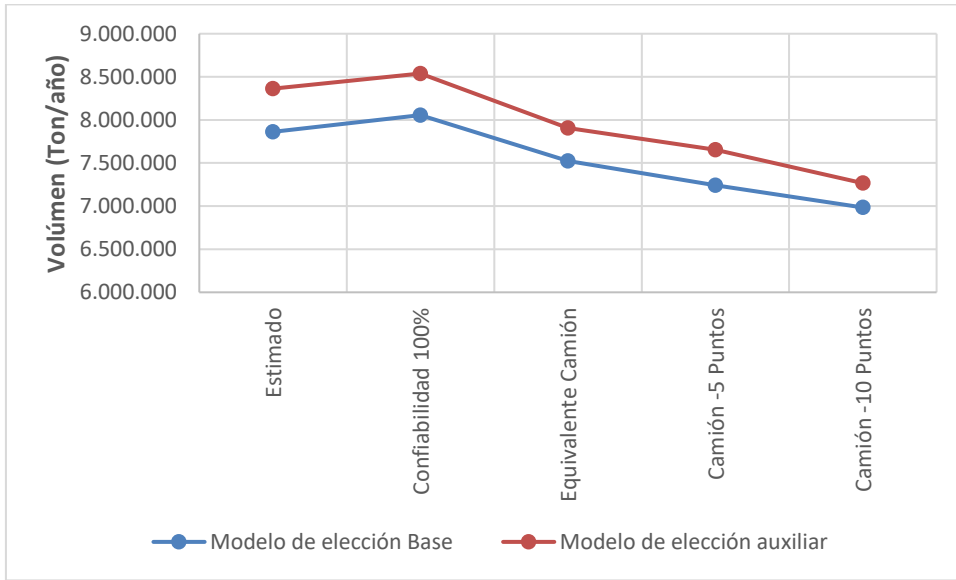
La captación de demanda para el Tren del Carare estimada con los modelos auxiliares (para cada uno de los segmentos de demanda analizados) asciende a ocho millones trecientos sesenta y tres mil (8.363.025) toneladas año, lo cual representa un incremento de cerca de 500 mil toneladas año equivalentes a un 6% adicional.

Este incremento se presenta principalmente (y casi exclusivamente) en el segmento de demanda de granel sólido en el cual el modelo auxiliar evalúa la variable confiabilidad (que no estaba considerada en el modelo base) y pone mayor peso específico en la variable número de transferencia lo cual denota la **importancia de estas variables diferentes al costo y tiempo** en la estimación del potencial de captación de un nuevo proyecto logístico.

#### **7.5.4 Sensibilidad a la variable confiabilidad**

La variable confiabilidad evalúa el número de viajes o envío que llegan a tiempo cumpliendo el itinerario pactado entre las partes y sin pérdidas o daños en la integridad de la mercancía. Esta variable obtuvo, en promedio, un índice de elasticidad de 0,77 ubicándola en un rango unitario lo cual representa que es sensible ante cambios en los parámetros base estimados, es decir, que sistemas de transporte poco confiables para los generadores traerán consigo pérdidas significativas en la demanda captada y en los posibles acuerdos comerciales que se propongan obtener. El gráfico a continuación nos permite observar el cambio en la captación de la demanda del Tren del Carare ante variaciones en los rangos de la variable confiabilidad tanto en el modelo base de elección discreta como en el modelo auxiliar.

**Figura 7-12:** Análisis de sensibilidad a la variable Confiabilidad



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar un comportamiento homogéneo entre los dos modelos de elección percibiendo cerca de un 3% de incremento en la captación de demanda si se logra un 100% en la confiabilidad del servicio (lo cual es logvable para un sistema férreo); por su parte, la pendiente (elasticidad) de la curva de captación es mucho más pronunciada en la medida que la confiabilidad del servicio cae respecto a la confiabilidad media estimada para el transporte automotor por carretera y representa un área de oportunidad alta de explotación de los servicios férreos y fluviales en los cuales se puede controlar factores externos que generan demoras y pérdidas en las mercancías como restricciones ambientales, derrumbes, congestión vehicular, problemas de orden público, entre otros.

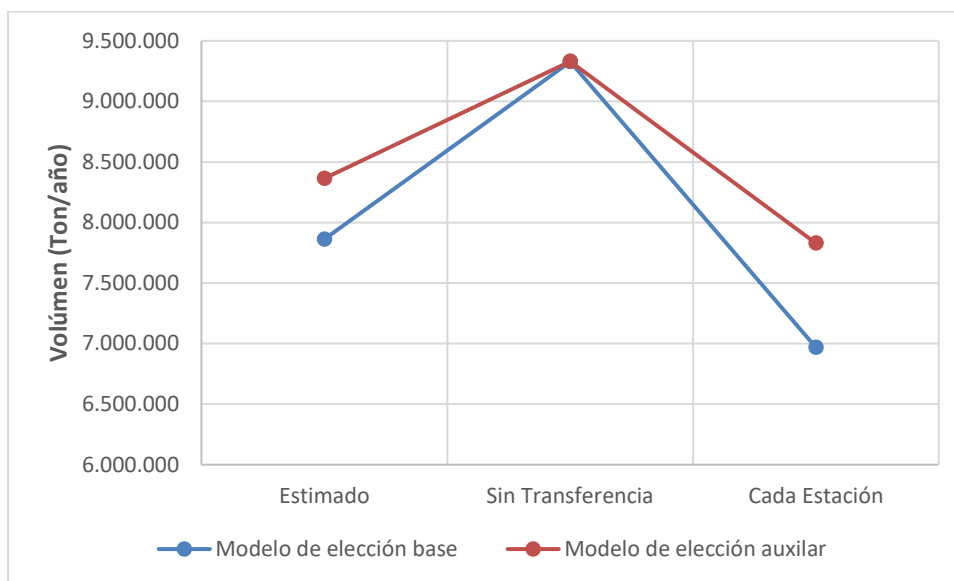
Finalmente, si se compara la captación de demanda del escenario estimado frente al escenario con la confiabilidad equivalente al camión se puede estimar la participación directa de esta variable en la función de utilidad equivalente a cerca de un 6% respecto al total de la demanda estimada para el Tren del Carare.

### 7.5.5 Sensibilidad a la variable número de transferencias

Las tres variables faltantes de análisis de sensibilidad toman valores específicos de acuerdo al par origen destino evaluado y las características de la operación, por tal motivo, se dificulta establecer un valor concreto para su índice de elasticidad. Con esto en mente

se generaron curvas de variación en la captación que permitan conocer un rango de demanda probable ante escenarios probables que representan: **i)** el número de transferencias evaluado según la cadena logística establecida, **ii)** un escenario considerando cero transferencias o penalización en los nodos de transferencia y, **iii)** un último escenario crítico en el cual se genere penalización en cada extremo de la cadena logística independiente del lugar de origen o destino de la carga.

**Figura 7-13:** Análisis de sensibilidad a la variable Número de Transferencias



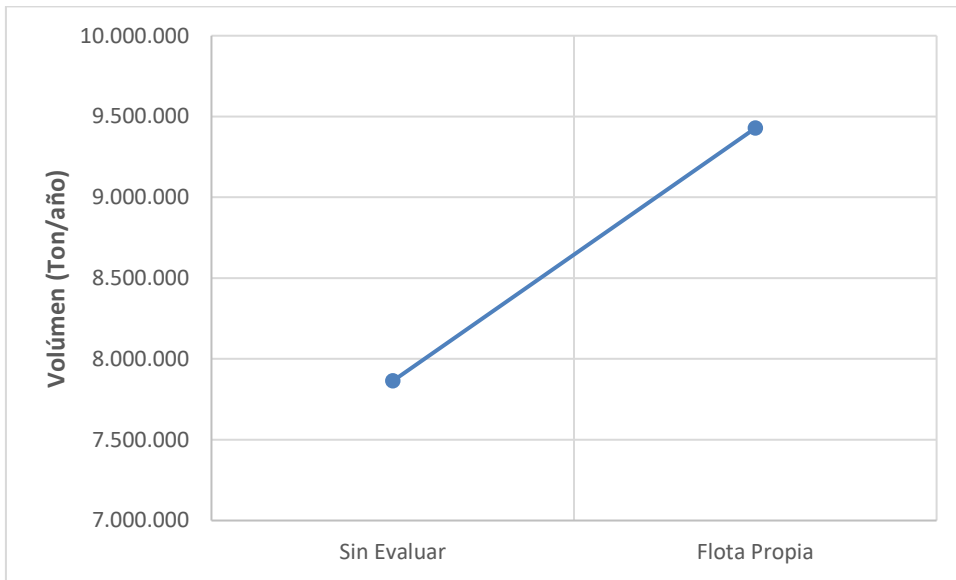
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la gráfica que existe un rango de variación promedio de un (1) millón de toneladas anuales de captación respecto a la evaluación del escenario base lo cual representa un peso específico significativo (15%) en la estimación de la demanda de un nuevo proyecto a ser implementado.

### 7.5.6 Sensibilidad a las variables dummy: propiedad de la flota de transporte y frecuencia de envío de la carga

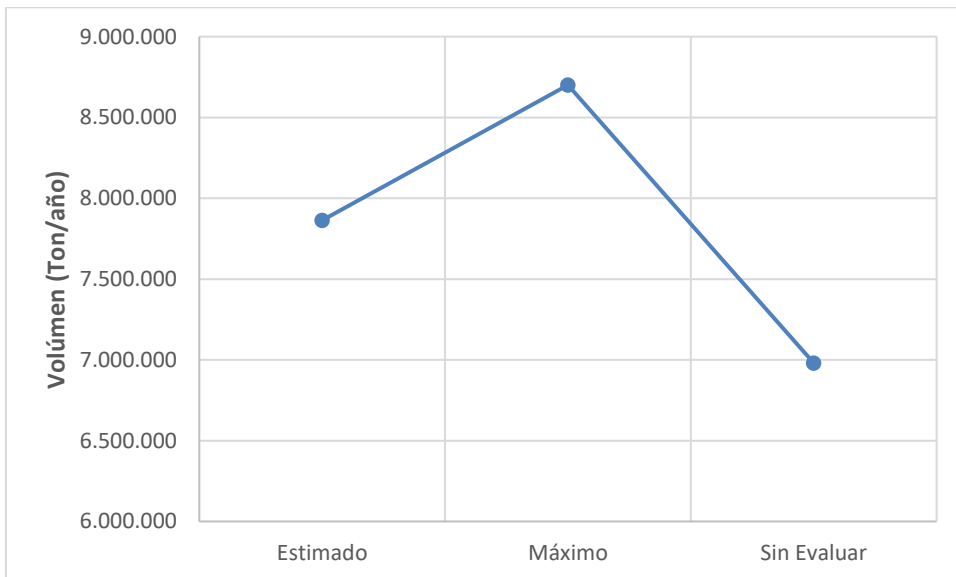
Las dos variables de igual interés por parte de los generadores de carga y que fueron evaluadas como variables dummy las cuales toman un valor de uno (1) o cero (0) según características directas del generador de la carga, presentan la misma dificultad expresada para la variable número de transferencias en cuanto a estimar un valor específico de índice de elasticidad, por este motivo, se sigue la misma línea de análisis a través de curvas de demanda ante cambios en los criterios de sus valores estimados.

**Figura 7-14:** Análisis de sensibilidad a la variable propiedad de la flota



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-15:** Análisis de sensibilidad a la variable frecuencia de envío



Fuente: Elaboración propia

En ambos casos, existe un alto grado de variación de la demanda captada por el Tren del Carare (cerca de 2 millones de toneladas) ante los diferentes rangos que pueden adoptar las variables analizadas. Estas variables representan una gran oportunidad para las instituciones que hacen seguimiento a la actividad transportadora del país que permita



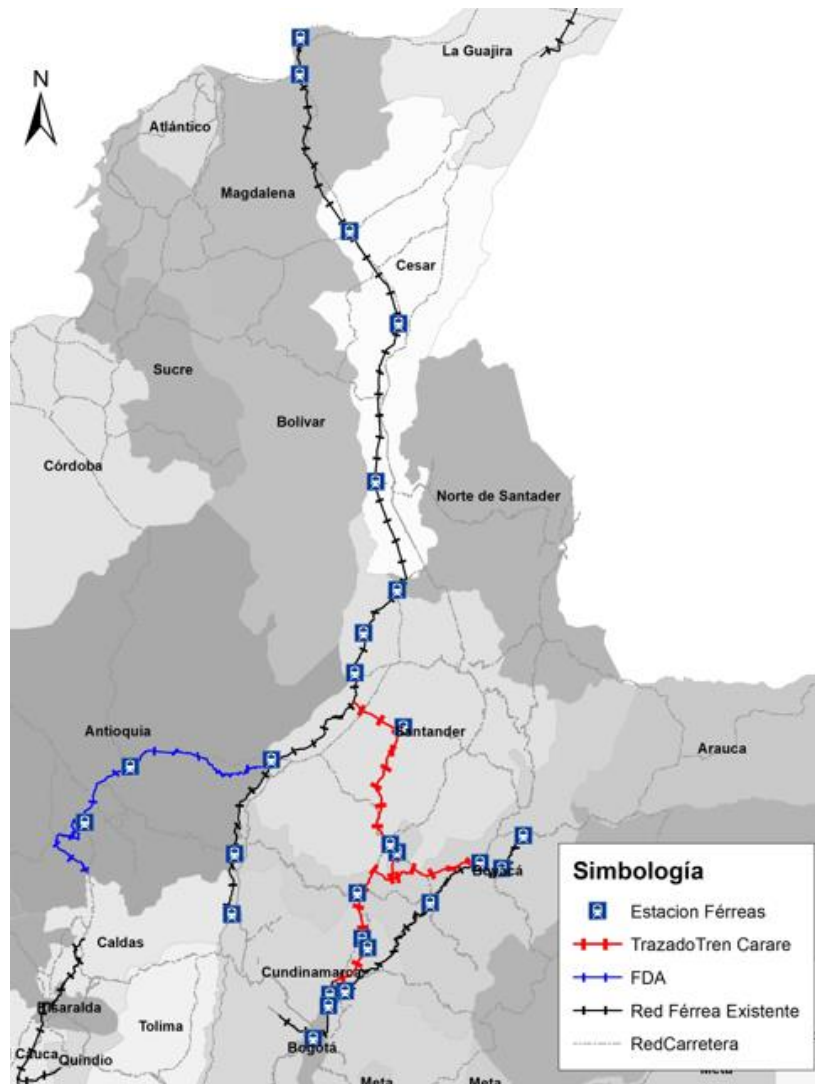
obtener datos con mayor grado de detalle de la carga que se moviliza por el territorio nacional y que permita desarrollar modelos de demanda mucho más desagregados, pero, con datos confiables.

### **7.5.7 Articulación con el proyecto Ferrocarril de Antioquia**

Uno de los proyectos ferroviarios que, según la investigación realizada para la conceptualización del proyecto y el conocimiento de la red férrea nacional actual y futura, presenta mayor avance en su formulación y futura puesta en marcha corresponde al Ferrocarril de Antioquia en el cual se pretende conectar por modo férreo el Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA) con la línea férrea del Atlántico (corredor central) y permitir una salida y conexión más ágil y eficiente de la carga del departamento de Antioquia con la costa caribe y los mercados internacionales.

De forma complementaria, al momento de estimar la carga potencial se formuló como línea de deseo potencial **complementaria** para el Tren del Carare dicha conexión de la región Cundiboyacense con el departamento de Antioquia, no obstante, al requerir trayectos tan extensos por modo carretero (Barrancabermeja – Antioquia) en el escenario base su captación fue despreciable cercana a cero.

Con esto en mente se evaluó un último escenario de sensibilidad del proyecto que permita ampliar la cobertura de la red férrea con los dos proyectos Tren del Carare y Ferrocarril de Antioquia (FDA) y estimar la carga adicional que captaría el proyecto estudio de caso producto de la articulación de esta infraestructura modal. A continuación se presenta la red férrea considerada en este escenario de evaluación.

**Figura 7-16:** Red férrea para el escenario de sensibilidad con FDA

Fuente: Elaboración propia

El proyecto Ferrocarril de Antioquia, para el transporte de mercancías (debido a que es un proyecto mixto con pasajeros), contemplaría la utilización de los dos nodos de consolidación de carga con los que cuenta esta región ubicados en el corregimiento de Hatillo, Barbosa y en el proyecto de centro multimodal de Primavera al sur del AMVA, tal como se muestra en la imagen anterior.

Con esta incorporación, se realizan los ajustes de encadenamiento de los pares origen – destino que desde la región Cundiboyacense conectaría con el AMVA a través de la continuidad de la carga por la ampliada red férrea.

---

El resultado del modelo logit corresponde a una captación total de **8.454.863 toneladas anuales** en el proyecto Tren del Carare equivalentes a cerca de 600 mil toneladas adicionales de carga producto de la implementación del proyecto FDA, es decir, una captación del 30% de la carga potencial del que se genera/atrae desde el AMVA hacia el proyecto Tren del Carare.

Si bien, se esperaría un porcentaje de captación mayor al consolidarse una amplia red férrea, existen dos consideraciones que explican los resultados obtenidos. La primera consideración corresponde al trazado estimado para el Tren del Carare en donde se busca articulación principal con el corredor férreo del Atlántico a través de la estación de Barrancabermeja y permitir conexión ágil con la Costa Caribe; esta condición genera la necesidad que, para conectar con el FDA, se genere un sobre recorrido de cerca de 115 kilómetros equivalente al tramo entre Barrancabermeja y Puerto Berrio. La segunda consideración corresponde a la ubicación de las estaciones de transferencia del proyecto del Ferrocarril de Antioquia externas al principal centro de generación de carga correspondiente a las ciudades de Medellín e Itagüí; en esta condición se genera una necesidad de última milla por modo carretero y, en la estación de Primavera un sobre recorrido adicional de cerca de 100 km (ida y vuelta).

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

La presente investigación permitió definir cualitativa y posteriormente cuantitativamente a través de modelos de elección discreta cuatro variables adicionales al costo y tiempo que cotidianamente son consideradas por las empresas generadoras de carga al momento de elegir sus cadenas logísticas para el transporte de mercancías: confiabilidad del servicio prestado como valoración del cumplimiento de itinerarios pactados, porcentaje de vehículos propios de la empresa para el transporte de sus mercancías o tercerización total de este servicio, frecuencia de envío de sus mercancías y, asociado a cadenas multimodales, el número directo de maniobras de transferencia entre modos. Con estas variables se estimaron modelos de elección discreta estadísticamente significativos y confiables para diferentes segmentaciones de la demanda que permite mejor individualización de las mercancías y, a través de un modelo logit que calcula la probabilidad de uso de una alternativa sin (carretera) o con modo férreo, exponer la aplicación práctica de los modelos de elección discreta para definir el potencial de demanda del proyecto férreo Tren del Carare que asciende hasta los 7.8 Millones de toneladas anuales.

A continuación se presentan con detalle las principales conclusiones de la investigación.

- Uno de los principales insumos para la estimación de captación de demanda de cualquier proyecto de transporte, es la estimación de una matriz de demanda potencial que pueda ser susceptible de ser movilizadada por el proyecto en evaluación y, de allí, se desprende el conocimiento de la vocación de cada proyecto que, en el caso del Tren del Carare, corresponde a una conexión ágil, eficiente y más

económica de la región Cundiboyacense con la Costa Caribe Colombiana y los mercados internacionales.

En este sentido, de los 127 millones de toneladas que se movilizan por las carreteras del territorio nacional 18,9 corresponden a demanda potencial del Tren del Carare (delimitados geográficamente y por tipo de mercancía) de los cuales el 71% se concentra en tres tipologías principales: carga misceláneos, productos de construcción (en especial acero y cemento) y carbón y minerales. Las principales Líneas de Deseo corresponden a viajes que, desde el interior del país, en la región Cundiboyacense, buscan conexión directa a los puertos del Caribe Colombiano y permitir así una mayor competitividad en la exportación e importación de mercancías. De igual forma, se pueden delimitar líneas de deseo secundarias con conexión al departamento de Antioquia las cuales, con la red férrea actual percibieron nulas captaciones para el Tren del Carare pero que, con la puesta en marcha del Ferrocarril de Antioquia, permitiría una captación adicional cercana a las 600 mil toneladas año.

- La investigación, a través del acercamiento directo a los tomadores de decisiones en materia de transporte de carga y logística, permitió determinar cinco variables adicionales al costo de transporte que son de gran ponderación por parte de los generadores de carga al momento de elegir un sistema de transporte para movilizar sus productos y corresponden a: confiabilidad del transporte traducido en el cumplimiento de itinerarios y preservación del estado físico de la mercancía (daños y/o pérdidas), el número de transferencias (red multimodal), tiempo de transporte desde origen a destino, disponibilidad de flota propia en la empresa y frecuencia de envío de mercancías. Las tres primeras variables, adicional al costo de transporte, son totalmente medibles en un sistema de transporte (unimodal o multimodal) y aplicables a una herramienta de modelación para la estimación de la demanda de un nuevo proyecto logístico o el mejoramiento de las condiciones de operación de la infraestructura actual; sin embargo las dos últimas representan mayores retos para el modelador debido a que representan características propias de las empresas que difícilmente se encuentran consolidadas en las bases de carga que se encuentran disponibles en fuentes de información oficial como el RNDC.

Independientemente de su dificultad de medición, el poder calibrarlas (modelo de elección discreta) y utilizarlas en modelos de transporte o tipo logit brindan resultados con mayor margen de precisión que permitan a los tomadores de decisiones una priorización estratégica de los proyectos de inversión en materia logística.

- Las variables tiempo y costo son de cotidiana utilización en diferentes modelos de transporte tanto para estimar demanda de pasajeros como transporte de mercancías debido a su amplio estado del arte e información disponible para su estimación, no obstante, para la presente investigación fue necesario conceptualizar la forma de abordar las variables complementarias y estimar de una forma confiable sus estimadores estadísticos en los modelos de elección discreta desarrollados.

La variable seguridad/confiabilidad se estimó, en términos cuantitativos, como el número de despachos de carga de un generador que llegan a su destino final con algún daño o fuera del itinerario establecido por cada 100 despachos (ej. de cada 100 despachos 12 llegan con daños o con demoras a su destino final). La variable número de transferencias, mide la desutilidad que percibe el generador al requerir mayor número de maniobras de transferencia en su cadena logística.

Las variables disponibilidad de flota propia y frecuencia de envío de mercancías se definieron variables dummy para incorporarlas de una forma categórica en las funciones de utilidad obteniendo, buenos estimadores estadísticos en los modelos de elección discreta y su adecuada incorporación lo cual representa su importancia analítica y conceptual para robustecer los modelos cotidianos de modelación de la demanda de carga.

- De acuerdo con la primera pregunta de investigación, se puede corroborar, tanto cualitativamente en los acercamientos a stakeholders como cuantitativamente con las estimaciones de los modelos de elección discreta, que existen variables (factores) adicionales al tiempo y costo que influyen en las decisiones de los generadores de carga al momento de elegir una alternativa para el transporte de sus productos las cuales, incorporadas adecuadamente en una herramienta de

estimación de demanda, pueden delimitar con mayor precisión la viabilidad de un proyecto logístico para priorizar las altas inversiones que estos requieren en el territorio nacional.

Las variables estimadas tanto cualitativamente a través de las encuestas de caracterización y cuantitativamente en los modelos de elección en los diferentes segmentos de demanda son consistentes con los resultados de estudios previos como lo desarrollado por Larranaga A.M., Arellana. J., & Senna. L. (2017) con el desarrollo de modelos de elección incorporando variables costo, tiempo y porcentajes de entrega a tiempo; Cabas Torres, E. P. (2017) con las variables costo tiempo y volumen de carga (capacidad); Pineda Jaramillo, J. D. (2014) con las variables costo y frecuencia de envío, entre otras investigaciones.

- A la segunda pregunta de investigación, se pudo estimar, para el proyecto Tren del Carare, un potencial de captación de carga de entre 7.8 y 8.4 millones de toneladas para los escenarios de sensibilidad con parámetros base de operación estimados con fuentes de información primaria y secundaria y que representan valores medios de la actual operación tanto del transporte por carretera como del transporte férreo.
- Partiendo del escenario base de modelación de la demanda, que estima la captación de mercancías del nuevo proyecto férreo basado en los parámetros medios de operación, es posible y adecuado realizar análisis de sensibilidad a cada una de las variables de elección con el fin de estimar su grado de elasticidad y el peso específico de la misma en la función de utilidad. Iniciando con el **flete de transporte** se estima una elasticidad alta con una media de 1,30 que, en un rango de captación de  $\pm 30\%$ , representa una variación de hasta un 50% en la demanda captada, es decir el proyecto férreo pasaría de cerca de 8 millones de toneladas a 4 millones ante un alza en los costos y hasta 12 millones de toneladas ante optimizaciones en los costos de transporte. Los **costos multimodales** (maniobras de transferencia), por el contrario, presentan una demanda relativamente inelástica con un índice  $IE=0,5$  que representa una variación de la demanda de  $\pm 1.5$  millones de toneladas (19% respecto a la demanda base) ante el mismo rango de variación estimado anteriormente ( $\pm 30\%$  incremento/optimización). La variable **Tiempo**, analizada sobre la totalidad de la cadena multimodal (OD), presenta un índice de

elasticidad bajo con I.E=0,64 (relativamente inelástico) lo cual, al igual que la variable costo multimodal, genera un rango de captación de demanda de  $\pm 1.5$  millones de toneladas (19% respecto a la demanda base) en el proyecto férreo ante variaciones de  $\pm 30\%$  en su parámetro base, el cual, para esta variable, corresponde a la velocidad media de operación y el tiempo requerido para las maniobras de transferencia en los nodos multimodales.

Continuando con las variables adicionales al costo y tiempo, la variable **confiabilidad** obtuvo, en promedio, un índice de elasticidad de 0,77 ubicándola en un rango unitario lo cual representa que es sensible ante cambios en los parámetros base estimados. Considerando que la variable se estimó en cerca del 100% de confiabilidad en el escenario base, la captación de la demanda del proyecto férreo ante variaciones probables del parámetro representaría pérdidas de demanda de hasta un (1) millón de toneladas si la cadena multimodal no genera confianza en el servicio prestado al empresario.

Las tres variables restantes: **número de transferencias, propiedad de la carga y frecuencia de envío** debido a que toman valores específicos en sus parámetros (0, 1 o 2) no permiten un cálculo directo de índice de elasticidad, no obstante, es posible estimar el efecto que tienen en la demanda captada por el proyecto férreo el cual, en general para las tres variables, presenta rangos de variación de  $\pm 1.5$  millones de toneladas respecto a la demanda base estimada.

- La red multimodal del país (carretera, férrea y fluvial) que se encuentra en condiciones operativas se centra principalmente (pero no exclusivamente) en tres corredores férreos (Bogotá – Belencito, DORASAM y red férrea del Pacífico) y un corredor fluvial principal (Río Magdalena) lo cual le brinda un potencial alto de brindar servicio de transporte a una gran proporción de carga que busca los puertos del Caribe Colombiano, y más aún cuando se observa el potencial de ramificaciones de estos corredores con otras regiones aledañas como Santander, Cundinamarca, Boyacá y Antioquia o la complementariedad con el modo carretero. Sin embargo, existe una falencia condicionante de la demanda actual y corresponde a al estado de la operación e infraestructura de las estaciones de transferencia modal las cuales, en general no presentan tecnificación de sus



operaciones y requieren de un manejo poco eficiente de la carga. Esta condición se traduce en altos tiempos de transferencia, costos asociados e incertidumbre de la prestación del servicio lo cual genera, según las entrevistas realizadas a los generadores de carga, intrascendencia para que los generadores y empresarios contemplen nuevos modos de transporte adicionales al transporte por carretera.

- En este mismo sentido, y articulándose con los análisis de sensibilidad realizados a la captación de carga del corredor férreo, es necesario estructurar los proyectos logísticos con nodos de transferencia que brinden servicio directo a las zonas de producción y atracción o modelos de operación integrada que no permita que los trayectos de última milla generen altos sobre costos en la cadena de abastecimiento o incertidumbre de la oferta de transporte lo cual se traduce en pérdida de interés de los generadores de carga.

Esta condición fue mencionada por el representante de Cerámicas San Lorenzo, ubicado en el municipio de Sopó y quien no percibe, en el momento, como probable su vinculación al corredor férreo Bogotá - Belencito debido al trayecto de conexión a la línea férrea (menos de 15 km a Tocancipá como zona de posible intercambio modal). De igual forma, la evaluación del escenario de sensibilidad con la entrada del Ferrocarril de Antioquia permitió observar de forma analítica la incidencia negativa que los sobre recorridos tiene en la captación de la demanda cambiando lo que puede ser un 100% de captación de la demanda potencial (Boyacá – Medellín) a un 30% únicamente.

- La integración física de las cadenas logísticas con otros modos de transporte toma un valor importante por brindarle a los usuarios, en este caso sería el gremio generador de carga, una infraestructura de común acceso y/o conexión de tal forma que se eliminen las barreras físicas y posiblemente los costos de transferencia o que estos puedan tener costos reducidos que pueda pagar los empresarios de carga, así como los costos por última milla que fueron las dos grandes penalizaciones que afectaron la competitividad del modo férreo frente al carretero.

- De los acercamientos con los generadores de carga se concluye que existe la necesidad de generar campañas de divulgación y pedagogía a los empresarios e industriales que permita mostrarles los beneficios del sistema ferroviario y las alternativas que disponen para movilizar sus mercancías por este medio de transporte. En algunas ocasiones, los generadores de carga desconocen la operación de las actuales líneas férreas del país y las posibilidades y facilidades que los operadores logísticos pueden ofrecer (última milla, cargue y descargue sin costo, subsidios, tarifas diferenciales, entre otros); por tal razón, es necesario mayor posicionamiento comercial del modo férreo para atraer usuarios potenciales a los proyectos.
- Según la investigación realizada las tarifas medias de transporte por modo ferroviarios fluctúan entre 82 y 126 \$COP/ton-km, con una media en 112 \$COP/ton-km. Con esta tarifa media se puede estimar un costo de transporte entre la región Cundiboyacense y la oferta de servicios portuarios de la Costa Caribe Colombia de entre 100.000 y 115.000 \$COP/ton lo cual es competitivo con la tarifa media de 139.000 \$COP/ton establecida para esta misma conexión por modo carretero según cifras del Ministerio de Transporte (SiceTac). Si bien, la relación en un sistema multimodal no es directa pues se incurre en costos adicionales en las maniobras de transferencia y última milla, allí, en estas operaciones, es donde el gobierno nacional y los operadores logísticos deben ahondar esfuerzos para optimizar y tecnificar los procesos que permitan mantener la competitividad del sistema multimodal.
- La probabilidad que una cadena logística potencial elija complementar su viaje con el proyecto Tren del Carare para cubrir su par origen destino se encuentra entre el 63 y 37% dependiendo del tipo de carga (mayor probabilidad para la carga en contenedores) y la vocación de la misma (carga de comercio internacional con mayor probabilidad), lo cual demuestra que el proyecto férreo tiene un alto potencial de captación en la región Cundiboyacense y contribuir en el crecimiento económico de la región.

## 8.2 Recomendaciones

- Los modelos de elección discreta estimados en la presente investigación pueden ser aplicables, con los cuidados adecuados, a diferentes proyectos multimodales del país y valoraciones de demanda de corredores logísticos a ser estructurados. En la presente investigación se enfocó el análisis a la complementariedad entre el transporte por carretera y el modo férreo debido a la incertidumbre generalizada expresada por los generadores de carga de la región Cundiboyacense respecto a la operación fluvial y la negativa de elegir este medio de transporte en sus cadenas logísticas, no obstante, para regiones más arraigadas al modo fluvial es posible desarrollar nuevas encuestas que permitan estimar su vacación y competitividad de forma analítica (modelos de elección discreta).

En este mismo sentido, para futuras investigaciones y esfuerzos institucionales, es posible desarrollar una metodología igual a la desarrollada en la presente investigación, pero ampliando su cobertura geográfica a diferentes regiones del país y porque no a la totalidad de la extensión nacional. Con esto se establecerían modelos de elección discreta que se adapten a cada región y a proyectos de impacto nacional.

- La estimación de modelos de elección de la demanda cada vez más desagregados que incluyan muchas más variables o factores que determinan la elección de una alternativa de transporte, requieren, de igual forma, bases de datos cada vez más robustas y con mayor cantidad de información de la operación logística del país. En la actualidad, la información oficial disponible que contiene la información más completa y confiable, corresponde a los registros de despachos de carga del Ministerio de Transporte (RNDC) los cuales deben ir a la vanguardia de los desarrollos en materia de investigación en logística y transporte y permitir mayor cantidad de información de las operaciones de carga que se desarrollan en el país.

Existen bases de datos que contienen mayor información a la disponible en el RNDC como los registros de SICEX que consolida los registros directos de los la operación con conexión portuario y la DIAN, no obstante, esta información presenta altos costos de adquisición y limitan su utilización en proyectos de investigación,

por lo tanto, el apoyo institucional en estas investigaciones es fundamental para el mejor desarrollo de las mismas.

- Respecto al trabajo conjunto con las instituciones, uno de los grandes retos de la metodología propuesta para esta investigación, realizando los acercamientos y encuestas directamente con los generadores de carga (contrario a la aplicación en vía a los conductores de las unidades de transporte), corresponde a que se requiere de la voluntad directa de los generadores a participar en las entrevistas y respuesta de encuestas de preferencia declarada que, como se mencionó, limita su participación como el caso del sector carbonífero en la presente investigación. Así, involucrar a las instituciones como el DNP, ANI, ANDI y Alianzas Regionales Logísticas permitiría una mayor participación (nacional y regional) y mejores canales de divulgación que lleguen a todos los sectores económicos y segmentos de demanda.
- La presente investigación se enfocó en el sector transportador de carga para definir los factores de decisión y el potencial de captación del Tren del Carare, sin embargo, las evaluaciones integrales de un proyecto como el estudiado puede complementarse con la estimación de la demanda de pasajeros que podría circular por el proyecto y permitir así un mayor beneficio de la infraestructura proyectada.

Para garantizar que los proyectos de transporte multimodal en el territorio nacional sean atractivos para los potenciales usuarios se deben contemplar servicios complementarios a la operación que generen valor agregado al proyecto como el almacenamiento, zonas que puedan rentar como un ingreso adicional para generar valor agregado a la carga, y zonas de servicios de inspección de carga y de consolidación que se pueden ubicar en estaciones del sistema. De igual forma, los aprendizajes y lecciones aprendidas que nos dejan los acercamientos a las instituciones y el exoperador Ibines Férreo S.A. genera la reflexión que los proyectos logísticos deben contribuir a mejoras en la prestación del servicio y competitividad cada vez mayor del sistema que permita costos y tiempos de transporte más competitivos, mayor eficiencia en las maniobras de transferencia en los nodos logísticos de la red y mayor confiabilidad de servicio de transporte.

## **A. Anexo: Ficha de divulgación del proyecto de investigación**

La ficha de divulgación representa el elemento visual con el cual se iniciaron los acercamientos a empresarios, instituciones y generadores de carga que conllevó a la aplicación de encuestas de caracterización y posteriormente, las encuestas de Preferencias Declarada. La ficha de divulgación expuso de forma concisa los objetivos de la investigación, las fases de ejecución y el trazado elegido del proyecto estudio de caso.

**Anexo A: Ficha de divulgación**

# FACTORES DE DECISIÓN MULTIMODAL

La priorización de inversiones de la Nación en el componente de Logística de Transporte se debe fundar en las necesidades de los generadores de carga y los factores que optimizan sus cadenas de abastecimiento

**EDINSON ANTONIO TORRES SEGURA**

edtorress@unal.edu.co

Celular: 3143414204



## Transporte Multimodal en la Política Nacional Logística

En Colombia, a través de la **Política Nacional Logística (PNL)** se reconoce la logística como pilar estratégico de la competitividad del país estableciendo la necesidad de ofrecer una oferta de servicios de calidad, oportunidad, eficacia, eficiencia y seguridad.

La modernización de la infraestructura multimodal, así como el desarrollo de conexiones eficientes mediante el desarrollo de infraestructura logística especializada (ILE) genera valor agregado a las diversas apuestas productivas del país.



### CONEXIÓN FÉRREA DESDE EL CENTRO DEL PAÍS A LOS PUERTOS



#### Beneficios del Proyecto

El proyecto busca potenciar la exportación de productos que se fabrican en el interior del país al acercar su salida al mar, como se muestra a continuación.

| Ciudad    | Distancia Cartagena | Distancia Santa Marta | Mejora |
|-----------|---------------------|-----------------------|--------|
| Tunja     | 900                 | 820                   | -22%   |
| Sogamoso  | 960                 | 1020                  | -31%   |
| Bogotá    | 1100                | 950                   | -25%   |
| Tocancipá | 1000                | 920                   | -20%   |

Velocidad promedio de 70 km/h que implica una reducción mínima de:

- Ahorro de 20 - 30% del flete
- Confiabilidad superior al 97% de entrega
- Reducción de accidentalidad hasta 20%
- No restricción de paso (ambiental, festivo, pico y placa, condición climática)

EDINSON ANTONIO TORRES SEGURA

edtorress@unal.edu.co  
Celular: 3143414204





## OBJETIVOS:

- Identificar y diagnosticar desde la perspectiva de los generadores las alternativas multimodales para el transporte de carga.
- Identificar los factores de decisión modal que influyen en las elecciones de los generadores.
- Determinar modelos de elección (funciones de utilidad) para la evaluación de corredores logísticos que incluyan las variables de decisión encontradas.

## PROCESO



Identificación de los actores del proyecto: Empresas generadoras de carga



Contacto con los actores y presentación del proyecto



Realización de entrevistas de caracterización: Identificación de Factores



Aplicación de encuestas Logística de Preferencia Declarada



EDINSON ANTONIO TORRES SEGURA

edtorress@unal.edu.co  
Celular: 3143414204





## **B. Anexo: Encuesta de caracterización empresarial y determinación de factores de elección modal**

El diseño y aplicación de la encuesta base para el primer acercamiento directo con generadores de carga permitió recolectar, a través de una encuesta dinámica, características de la empresa, de sus productos, costos y tiempos que son la base para comprender, de forma general, su operación logística y generar una encuesta de preferencia declarada a la medida. Complementariamente, la encuesta permitió analizar, debatir y seleccionar los Factores más influyentes en la elección de un modo de transporte para el transporte de sus mercancías. Se presenta como anexo externo al presente documento central.

## **C. Anexo: Consolidado de costos férreos México y Brasil**

La limitación en los datos abiertos (oficiales) en la operación férrea nacional, limitado principalmente por la línea La Dorada – Chiriguana, requiere de una investigación externa de costos y política férrea en países con mayor trayectoria en la operación de estos modos de transporte y los cuales han desarrollado una canasta de costos más amplia que delimita un abanico mayor de segmentos de demanda, kilometraje recorrido y líneas de operación. Los países de México y Brasil, con una proporcionada y sensata comparación, muestran una madurez importante en la operación de sistemas ferroviarios que permite un conocimiento adecuado para la generación de rangos de costos en el diseño de las encuestas y la apropiación del conocimiento en las encuestas desarrolladas con los generadores de carga.

## **D. Diseño de encuestas de Preferencia declarada**

Una vez aplicadas las encuestas de caracterización y síntesis de la operación particular de cada generador de carga en el movimiento de sus mercancías, se procede, a través de un modelo Bayesiano eficiente, al diseño de las encuestas de preferencias declaradas a ser aplicadas como segunda instancia de acercamiento y trabajo con empresarios de la región de influencia del proyecto ferroviario Tren del Carare. Se generan un total de 11 diseños para variar los rangos de las variables de decisión que permita coherencia con los costos y tiempos expresados por los generadores.

## **E. Modelos de elección discreta**

Una vez diseñadas y aplicadas las encuestas de preferencias declaradas, se procedió al análisis y obtención de los modelos de elección discreta que permiten determinar las funciones de utilidad que responden a la pregunta de investigación respecto a: adicional al costo y tiempo ¿existen otros factores que determinan la elección de una alternativa de modo en el transporte de mercancías. El Anexo consolida las respuestas de los encuestados a las tarjetas de elección (PD) y desarrolla el proceso hasta la obtención de las bases ingresadas al software Ngene y su posterior salida con los modelos de elección discreta a ser evaluados.

## Bibliografía

Ministerio de Transporte. (2020). <https://plc.mintransporte.gov.co/>. Consultado en octubre de 2020

Agencia Nacional de Infraestructura ANI. (2020). <https://www.ani.gov.co/ferrocarriles-0>. Consultado en septiembre de 2020

Meisel-Roca, A., Ramírez-Giraldo, M. T., & Jaramillo-Echeverri, J. (2016). Demasiado tarde, pero rentables: los ferrocarriles en Colombia durante el período 1920-1950. *Investigaciones de Historia Económica*, 12(3), 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.ihe.2015.07.009>

Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. (2016). *Desafíos del transporte ferroviario de carga en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. Retrieved from <http://ani.gov.co/sites/default/files/desafios-del-transporte-ferroviario-de-carga-en-colombia.pdf>

Cantillo, J., Cantillo, V., & Arellana, J. (2018). Modelling with joint choice of ports and countries of origin and destination: application to Colombian ports. *Maritime Policy and Management*, 45(6), 720–738. <https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1440090>

Vega, L., Cantillo, V., & Arellana, J. (2019). Assessing the impact of major infrastructure projects on port choice decision: The Colombian case. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 120(July 2017), 132–148. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.12.021>

Larranaga, A. M., Arellana, J., & Senna, L. A. (2017). Encouraging intermodality: A stated preference analysis of freight mode choice in Rio Grande do Sul. *Transportation*

*Research Part A: Policy and Practice*, 102, 202–211.  
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.028>

Financiera de Desarrollo Nacional FDN. (2018). *Análisis de demanda y de viabilidad de los proyectos férreos de interés de la nación que fueron identificados como prioritarios en el plan maestro intermodal, utilizando información primaria y secundaria.*

Pineda-Jaramillo, J. D. (2014). *Railway and road discrete choice model for foreign trade freight. Case study: Medellín – Port of Cartagena corridor.*  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/10618/>

Espino, E. (2003). Análisis y predicción de la demanda de transporte de pasajeros: Una aplicación al estudio de dos corredores. *Oai*, 189.

Moreno Quintero, E. (2011). Métodos de elección discreta en la estimación de la demanda de transporte. *Publicación Técnica*, 335.

Márquez Díaz, L. (2011). Estimación de costos externos marginales de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario en Colombia. *Ingeniería E Investigación*, 31(1), 56–64. <http://www.bdigital.unal.edu.co/23552/1/20525-69577-1-PB.pdf>

Train, K. (2003). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press.

Foro Económico Mundial. (2019). *Índice Global de Competitividad 2019*.  
[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf)

Agencia Nacional de Infraestructura ANI. *Sala de prensa noticias 2018 – 2020*.  
<https://www.ani.gov.co/sala-de-prensa/noticias>

Colombia (2019). Ley 1955 de 2019, Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Pacto por Colombia, pacto por la equidad. *Diario Oficial*, 50.964, 25 de mayo de 2019.  
[http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1955\\_2019.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1955_2019.html)

Colombia (2020), Departamento Nacional de Planeación, DNP & Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES (2020). CONPES 3982, Política Nacional Logística. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3982.pdf>

Colombia, Ministerio de Transporte (2015). Plan Maestro de Transporte Intermodal. <https://www.ani.gov.co/planes/plan-maestro-de-transporte-intermodal-22006>.

Ferrocarriles del Norte de Colombia (2018). Apuntándole al desarrollo económico del país. [https://www.fenoco.com.co/images/Presentaciones/FENOCO\\_Apuntandole\\_al\\_desarrollo\\_economico\\_del\\_pais.pdf](https://www.fenoco.com.co/images/Presentaciones/FENOCO_Apuntandole_al_desarrollo_economico_del_pais.pdf)

Colombia, Ministerio de Transporte (2015). Plan Maestro Férreo.

Feo-Valero, M., García-Menéndez, L., & Garrido-Hidalgo, R. (2011). Valuing freight transport time using transport demand modelling: A bibliographical review. *Transport Reviews*, 31(5), 625–651. <https://doi.org/10.1080/01441647.2011.564330>

Rich, J., Holmblad, P. M., & Hansen, C. O. (2009). A weighted logit freight mode-choice model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), 1006–1019. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.02.001>

Colombia (2018). Departamento Nacional de Planeación, DNP. Encuesta Nacional Logística 2018. <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/Paginas/Encuesta-Nacional-Logistica-2018.aspx>

Colombia (2020), Departamento Nacional de Planeación, DNP & Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES 3982 de 2020, Política Nacional Logística.

Colombia (2008), Departamento Nacional de Planeación, DNP & Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES 3547 de 2008, Política Nacional Logística.

Ortuzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport* (4th Edition), John Wiley and Sons, Chichester

Ortúzar, J. de D. and Willumsen, L. G. (1 994). *Modelling transport*. Chichester: John Wiley and Sons.

Orro, A., Novales, M., Benítez, Francisco. (2006). "Variaciones en los gustos en modelos de elección modal" Ponencia presentada en el XIV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tráfico y Transporte. Las Palmas de Gran Canaria, 20 al 23 de septiembre de 2006.

Torres, E. P. C. (2017). Disposición a pagar por ahorros en el tiempo de viaje del transporte de carga en Medellín [Universidad de la Costa]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Louviere, J. (1988). Conjoint Analysis Modelling of Stated Preferences. *Journal of Transport Economics and Policy*, 22(1), 93–119.

McFadden D (1973). Conditional analysis of qualitative choice models. P Zarembka, (ed.), *Frontiers in Econometrics*, New York, Academic Press.

McFadden, D., Domencich, T. (1975). *Urban Travel Demand: A Behavioural Analysis*. Amsterdam, Holanda.

Williams, H., Senior, M. L. (1977). Model based transport policy assessment: removing fundamental inconsistencies from the models. *Traffic Engineering and Control*.

Gonzales, M. (2020). Teoría de la Utilidad. *Fundamentos de la economía*.

García-Menéndez, L., & Feo-Valero, M. (2009). European common transport policy and short-sea shipping: Empirical evidence based on modal choice models. *Transport Reviews*, 29(2), 239–259. <https://doi.org/10.1080/01441640802357192>

Bastida, C., & Holguín-Veras, J. (2009). Freight generation models: Comparative analysis of regression models and multiple classification analysis. *Transportation Research Record*, 2097, 51–61. <https://doi.org/10.3141/2097-07>

Holguín-Veras, J., Kalahasthi, L., Campbell, S., González-Calderón, C. A., & (Cara) Wang, X. (2021). Freight mode choice: Results from a nationwide qualitative and quantitative research effort. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 143, 78–120. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.11.016>



Holguín-Veras, J., Silas, M., Polimeni, J., & Cruz, B. (2008). An investigation on the effectiveness of joint receiver-carrier policies to increase truck traffic in the off-peak hours. Part II: The behavior of carriers. *Networks and Spatial Economics*, 8(4), 327–354. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9011-6>

Holguín-Veras, J., Xu, N., de Jong, G., & Maurer, H. (2011). An Experimental Economics Investigation of Shipper-carrier Interactions in the Choice of Mode and Shipment Size in Freight Transport. *Networks and Spatial Economics*, 11(3), 509–532. <https://doi.org/10.1007/s11067-009-9107-x>

Sánchez-Díaz, I., Holguín-Veras, J., & Wang, X. (2016). An exploratory analysis of spatial effects on freight trip attraction. *Transportation*, 43(1), 177–196. <https://doi.org/10.1007/s11116-014-9570-1>

Holguín-Veras, J., Wang, Q., Xu, N., Ozbay, K., Cetin, M., & Polimeni, J. (2006). The impacts of time of day pricing on the behavior of freight carriers in a congested urban area: Implications to road pricing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(9), 744–766. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.12.011>

Pani, A., Sahu, P. K., Patil, G. R., & Sarkar, A. K. (2018). Modelling urban freight generation: A case study of seven cities in Kerala, India. *Transport Policy*, 69, 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.013>

Holguín-Veras, J., Amaya Leal, J., Sanchez-Diaz, I., Browne, M., & Wojtowicz, J. (2020). State of the art and practice of urban freight management Part II: Financial approaches, logistics, and demand management. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137, 383–410. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.036>