

## **Maestría en Ingeniería Civil**

### **Diseño óptimo de un sistema de transporte de petróleo en Colombia, caso: petróleo producido en la región de la Altillanura con destino a Cartagena**

**Nelson Evelio López Gil**

**Bogotá, D.C., 10 de junio de 2015**

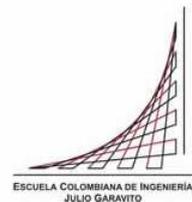


**Diseño óptimo de un sistema de transporte de petróleo en  
Colombia, caso: petróleo producido en la región de la Altillanura  
con destino a Cartagena**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Tránsito y transporte**

**Rafael Guillermo Garcia Caceres**  
**Director**

**Bogotá, D.C., 10 de junio de 2015**



La tesis de maestría titulada “Diseño óptimo de un sistema de transporte de petróleo en Colombia, caso: petróleo producido en la región de la Altillanura con destino a Cartagena”, presentada por Nelson Evelio López Gil, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y transporte.

Director de la tesis

Ing. Rafael Guillermo Garcia Caceres

Jurado

Ing. Santiago Henao Pérez

Jurado

Ing. Maritza Villamizar

Bogotá, D.C., 9 de junio de 2015

## Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad y bendición de poder obtener este logro académico.

## **Resumen**

El proyecto de tesis contempla el análisis e identificación del sistema de transporte o combinación de modos de transporte que permita minimizar los costos del transporte del petróleo producido en la Altillanura con destino a los puertos de Cartagena, considerando los modos carretero, férreo y fluvial

La metodología desarrollada parte de una caracterización de la demanda y de la oferta de transporte para el petróleo producido en la Altillanura, seguidamente se realiza un análisis y descripción de los principales componentes del transporte intermodal con énfasis en sistemas carretero – férreo y carretero - fluvial, posteriormente se seleccionan y caracterizan los diferentes corredores que se pueden utilizar para el transporte del petróleo desde la Altillanura hasta Cartagena llegando a identificarse 35 corredores (15 en sistema unimodal, 11 en sistema intermodal carretero - férreo y 9 en sistema intermodal carretero - fluvial) estimando para cada uno de ellos los respectivos costos de transporte, a partir de esta información se formula y elabora el modelo de transporte de costo mínimo. El modelo además de seleccionar los corredores de menor costo de transporte tanto en sistema unimodal como intermodal, permite identificar los rangos de distancia en los cuales son competitivos los diferentes modos de transporte.

## Índice general

Introducción	11
Capítulo 1. Caracterización del Petróleo	13
1.1. Aspectos Generales	13
1.2. Caracterización de las Cuencas de Producción Nacional	15
1.3. Producción Histórica de Petróleo en Colombia	17
1.4. Distribución Territorial de la Producción Nacional de Petróleo	17
Capítulo 2. Transporte Intermodal	22
2.1. Aspectos Generales	22
2.2. Descripción del Transporte Multimodal	23
2.3. Principales Componentes de Costos en el Transporte Intermodal	25
2.4. Condicionantes para la Viabilidad del Transporte Multimodal	33
Capítulo 3. Modelo de Transporte que Minimice los Costos de Transporte del Petróleo Generado en la Altillanura con destino a Cartagena	36
3.1. Aspectos Generales del Costo Generalizado del Transporte	36
3.2. Precios y Distancia de Transporte	37
3.3. Costos de Tiempo y Distancia de Transporte	38
3.4. Costos Generalizado de Transporte y Distancia de Transporte	40
3.5. Comparación de costo generalizado en soluciones de transporte intermodal y unimodal	42
3.6. Influencia de los Costos de Descanso	45
3.7. Método de DIJKSTRA	46
3.8. Aplicación modelo de transporte - Análisis del sistema de transporte óptimo para el transporte del petróleo de la Altillanura con destino a Cartagena	48
3.8.1. Costos de transporte para el sistema unimodal (modo carretero)	87
3.8.2. Costos de transporte para el Sistema Intermodal (Carretero - Férreo)	91
3.8.3. Costos de transporte para el Sistema Intermodal (Carretero - Fluvial)	95
3.9. Evaluación Multicriterio a los corredores con menor costo de transporte	100
Capítulo 4. Conclusiones	113
Bibliografía	115

## Índice de tablas

Tabla 1. Identificación de Crudos	14
Tabla 2. Cuencas Productivas Nacionales	15
Tabla 3. Cuencas Inactivas Nacionales	15
Tabla 4. Producción de petróleo por cuenca Año 2012	18
Tabla 5. Datos de producción de petróleo por departamento. Años 2005-2012	19
Tabla 6. Corredores por modo carretero	49
Tabla 7. Corredores Intermodales (Carretero – Férreo)	65
Tabla 8. Corredores intermodales Carretero- Fluvial	77
Tabla 9. Costo promedio de operación vehicular de un camión (\$/km)	87
Tabla 10. Cálculo del costo/ton/km para el corredor 1-Modo Carretero	88
Tabla 11. Costo ton/km para corredores de modo carretero	89
Tabla 12. Costos ton/km consultados para el modo férreo	91
Tabla 13. Cálculo del costo/ton/km para el corredor 1	92
Tabla 14. Costo/ton/km para los corredores intermodales carretero-férreo.	93
Tabla 15. Cálculo de costos por viaje ida y regreso en tramos fluviales.	96
Tabla 16. Cálculo del costo/ton/km para el corredor 1-Intermodal Carretero-Fluvial	97
Tabla 17. Costo/ton/km para rutas intermodales Carretero- Fluvial	98
Tabla 18. Corredor de menor costo para escenario	100
Tabla 19. Costo de Transporte de cada corredor a evaluar	104
Tabla 20. Rangos y Calificación	107
Tabla 21. Resultados del Análisis Multicriterio. Valor de cada factor	108
Tabla 22. Resultados del Análisis Multicriterio. Calificación de cada factor	108
Tabla 23. Resultados Matriz Multicriterio – Iteración 1	109
Tabla 24. Sistema de Transporte con mayor calificación	112

## Índice de gráficos

Gráfico 1. Histórico de producción de petróleo en kbpd. Años 1926 - 2012	17
Gráfico 2. Participación en la producción de crudo por cuenca. Año 2012	18
Gráfico 3. Participación en la producción de crudo por departamento.	19
Gráfico 4. Producción de crudo por departamento. 2012	20
Gráfico 5. Producción de petróleo, según principales campos (2009 – 2012)	21
Gráfico 6. Comparativa de costes Ferrocarril - Carretera	29
Gráfico 7. Comparativa de costes Ferrocarril - Carretera	30
Gráfico 8. Estructura de costes del transporte por carretera e intermodal	35
Gráfico 9. Relación entre los costos generalizados de transporte y la distancia de transporte para el transporte por carretera y para el transporte intermodal	43
Gráfico 10. Etiquetas temporales para el algoritmo de DIJKSTRA	47

## Índice de figuras

Figura 1. Mapa de las Cuencas Sedimentarias de Colombia	16
Figura 2. Localización de la producción de petróleo nacional	21
Figura 3. Transporte Intermodalidad	24
Figura 4. Modo Carretero Corredor 1:	50
Figura 5. Modo Carretero Corredor 2:	51
Figura 6. Modo Carretero Corredor 3:	52
Figura 7. Modo Carretero Corredor 4:	53
Figura 8. Modo Carretero Corredor 5:	54
Figura 9. Modo Carretero Corredor 6:	55
Figura 10. Modo Carretero Corredor 7:	56
Figura 11. Modo Carretero Corredor 8:	57
Figura 12. Modo Carretero Corredor 9:	58
Figura 13. Modo Carretero Corredor 10:	59
Figura 14. Modo Carretero Corredor 11:	60
Figura 15. Modo Carretero Corredor 12:	61
Figura 16. Modo Carretero Corredor 13:	62
Figura 17. Modo Carretero Corredor 14:	63
Figura 18. Modo Carretero Corredor 15:	64
Figura 19. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 1	66
Figura 20. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 2	67
Figura 21. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 3	68
Figura 22. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 4	69
Figura 23. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 5	70
Figura 24. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 6	71
Figura 25. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 7	72
Figura 26. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 8	73
Figura 27. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 9	74
Figura 28. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 10	75
Figura 29. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 11	76
Figura 30. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 1	78

Figura 31. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 2	79
Figura 32. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 3	80
Figura 33. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 4	81
Figura 34. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 5	82
Figura 35. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 6	83
Figura 36. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 7	84
Figura 37. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 8	85
Figura 38. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 9	86
Figura 39. Corredor más económico modo carretero	90
Figura 40. Corredor más económico Carretero - Férreo	94
Figura 41. Corredor más económico Carretero - Fluvial	99

## Introducción

A continuación se describe algunos aspectos y problemática general que motivaron la propuesta y desarrollo del presente trabajo de grado:

- ✓ En la última década Colombia ha tenido un crecimiento importante en producción de petróleo al pasar de cerca de 570 mbpd en 2002 a más de 1000 mbpd en 2013, principalmente por lo desarrollos productivos de la región de la Altillanura conformada por los departamentos del Meta, Casanare y Vichada, los cuales producen el 74% de la producción total de petróleo del país.
- ✓ Para los próximos años se plantean ritmos de crecimiento de producción entre el 7% y el 17% anualmente.
- ✓ En la actualidad el 93% del petróleo producido en la Altillanura con destino hacia las refinerías y los puertos de exportación se transporta por oleoducto y el restante 7% por carretera.
- ✓ El transporte del petróleo por modo fluvial se utiliza solo en unos casos específicos, por modo férreo no se utiliza
- ✓ Existen diferentes modos de transporte que actualmente no se están utilizado y que podrían potenciar su utilización para el transporte del petróleo ya sea de manera unimodal o como una combinación de ellos
- ✓ Las zonas portuarias, por donde se exporta el petróleo, se encuentran a grandes distancias de las zonas de producción de la Altillanura.
- ✓ Los transportes, en el mundo, avanzan hacia la intermodalidad, de acuerdo a criterios de sostenibilidad a largo plazo

Teniendo en cuenta lo anterior, el trabajo de tesis plantea la elaboración e identificación del modelo de transporte (unimodal o intermodal) que minimice los costos de transporte del petróleo generado en la altillanura a los puertos de Cartagena. Realizando una aplicación de los temas y conocimientos adquiridos en las asignaturas cursadas en el programa de Maestría de Ingeniería Civil, especialmente en las asignaturas de investigación de operaciones, planeación del transporte, logística y diseño y operación de sistemas marítimos y fluviales.

## Capítulo 1

### Caracterización del Petróleo

#### 1.1 Aspectos Generales

El petróleo es una mezcla en la que coexisten en fases sólida, líquida y gas, compuestos denominados hidrocarburos, constituidos por átomos de carbono e hidrógeno y pequeñas proporciones de heterocompuestos con presencia de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales, ocurriendo en forma natural en depósitos de roca sedimentaria. Su color varía entre ámbar y negro. La palabra petróleo significa aceite de piedra. (Chiriboga Pinos, 2007, pág. 19).

Los petróleos se clasifican según criterios de procedencia, densidad, gravedad específica o grados API<sup>1</sup>. Cuantos más grados API tenga un petróleo, menos refinación se requiere para obtener de él productos como la gasolina. Es por ello que los petróleos con mayor API son considerados los de mejor calidad (Ecopetrol, s.f). Según el grado API los crudos pueden ser:

- Super ligero (Gravedad API superior a 39° API)
- Liviano o ligero (Gravedad API entre 31,1 y 39° API)
- Mediano (Gravedad API entre 22,3 y 31,1° API)
- Pesado (Gravedad API entre 10,0 y 22,3° API)
- Extrapesado (Gravedad API inferior a 10,0° API)

En Colombia se han encontrado petróleos con diferentes rangos de API, desde los livianos de Cusiana hasta los más pesados del Magdalena Medio o de los Llanos. En promedio, los crudos extraídos en el país tienen una gravedad API de alrededor 26,71° API. Así mismo, en Colombia los crudos se identifican según la región de procedencia, como se observa en la Tabla 1:

---

<sup>1</sup>Parámetro del American Petroleum Institute que denota la relación correspondiente de peso específico y de fluidez de los crudos con respecto al agua

**Tabla 1. Identificación de Crudos**

Nombre del Crudo	Grados API	Descripción
Crudo Cusiana	42°API	El campo Cusiana está ubicado en el piedemonte llanero colombiano, en el Departamento de Casanare
Crudo Caño Limón	29.1°API	Producido en la Cuenca de los Llanos Oriental en el campo Caño Limón está ubicado en la planicie oriental colombiana, en el Departamento de Arauca. Este crudo se transporta por el oleoducto Caño Limón - Coveñas hasta la línea costera del Caribe colombiano
Crudo Vasconia	24.3°API	Resulta de una mezcla de crudos producidos en los campos de los llanos y el Alto Magdalena, cuyas corrientes se unen en la Estación Vasconia. Este crudo se exporta a través del puerto de Coveñas, el cual se encuentra a lo largo del Golfo de Morrosquillo en la Costa Atlántica
Crudo South Blend	28.6°API	Los campos de producción del crudo South Blend están ubicados en el suroeste de Colombia. En la actualidad se tiene una producción de 12,000 barriles por día, y en su mayoría se exporta.  Este crudo se exporta a través del Puerto de Tumaco en la Costa del Pacífico, cuya capacidad de carga es de 400 mil barriles, a una tasa de carga de hasta 24,000 barriles por hora
Crudo Castilla Blend	18.8°API	Es un crudo pesado que resulta de la mezcla de Crudo Castilla con otros crudos pesados producidos en campos de la Orinoquía, a la cual se le agrega nafta virgen como diluyente para su transporte por el sistema de oleoductos hasta Coveñas. Este crudo se exporta a través del puerto de Coveñas.
Crudo Castilla	22°API	Es un crudo pesado con características muy particulares que lo clasifican dentro de los combustibles negros y que lo hacen indeseable para ser procesado en refinerías. El campo Castilla está ubicado en el departamento del Meta
Crudo Rubiales	12.3°API	Es un crudo pesado que se extrae del campo rubiales localizado en el departamento del Meta, utilizado como combustible industria en hornos, secadores y calderas. Su poder calorífico superior está alrededor de los 38.8 MJ/kg
Crudo Magdalena	20.4°API	Es un crudo pesado que resulta de la mezcla de algunas corrientes de crudo agrío producido en la cuenca del Magdalena Medio y el crudo de Castilla, producido en la cuenca de los Llanos Orientales.

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH

## 1.2 Caracterización de las Cuencas de Producción Nacional

Según información de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (2009), Colombia se encuentra dividida en 18 cuencas sedimentarias de producción de hidrocarburos, de las cuales nueve cuencas producen hidrocarburos a escala comercial clasificándose como “Cuencas Productivas”, y las restantes se clasifican como “Cuencas Inactivas” en el sentido que han producido pequeñas cantidades o han tenido muestras significativas de producción pero no a escala comercial, ver Tabla 2 y Tabla 3.

**Tabla 2. Cuencas Productivas Nacionales**

Nombre	Sigla	Área-Km <sup>2</sup> (Continental)	Área-Km <sup>2</sup> (Marino)	Área-Km <sup>2</sup> Total
Llanos Orientales	LLA	212		212
Valle Superior del Magdalena	VSM	26		26
Valle Medio del Magdalena	VMM	34		34
Valle Inferior Magdalena	VIM	42		42
Putumayo	PUT	28		28
Catatumbo	CAT	7		7
Guajira	GUA	12	28	40
Cesar Ranchería	CES	12		12
Cordillera Oriental	COR	56		56
<b>Subtotal</b>		<b>429</b>	<b>28</b>	<b>457</b>

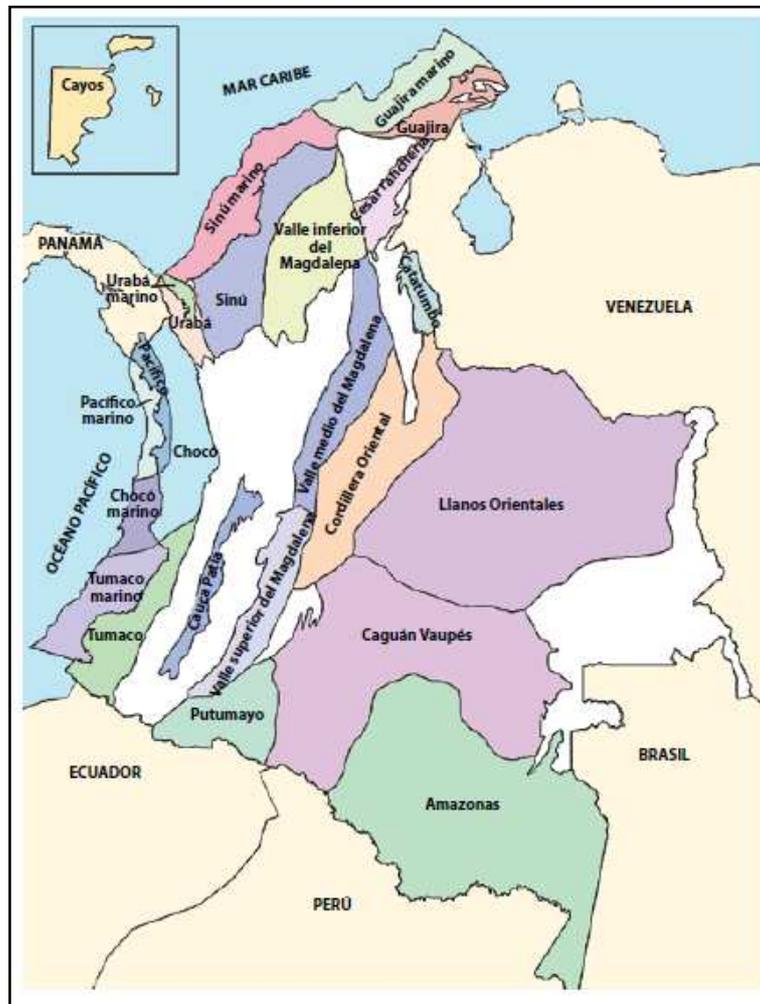
Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH

**Tabla 3. Cuencas Inactivas Nacionales**

Nombre	Sigla	Área-Km <sup>2</sup> (Continental)	Área-Km <sup>2</sup> (Marino)	Área-Km <sup>2</sup> Total
Sinú	SIN	38	31	69
Los Cayos	CAY		73	73
Urabá	URA	3	7	10
Caguán Vaupés	CAG	144		144
Cauca Patía	CAU	13		13
Chocó	CHO	31	9	40
Tumaco	TUM	24	25	49
Pacífico	PAC	9	8	17
Amazonas	AMA	169		169
Subtotal		431	153	548
<b>Total</b>		<b>860</b>	<b>181</b>	<b>1041</b>

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH

La Figura 1 muestra las 18 cuencas que comprenden un área de 1.041.000 Km<sup>2</sup> (50,3% del área total de Colombia):



**Figura 1. Mapa de las Cuencas Sedimentarias de Colombia**

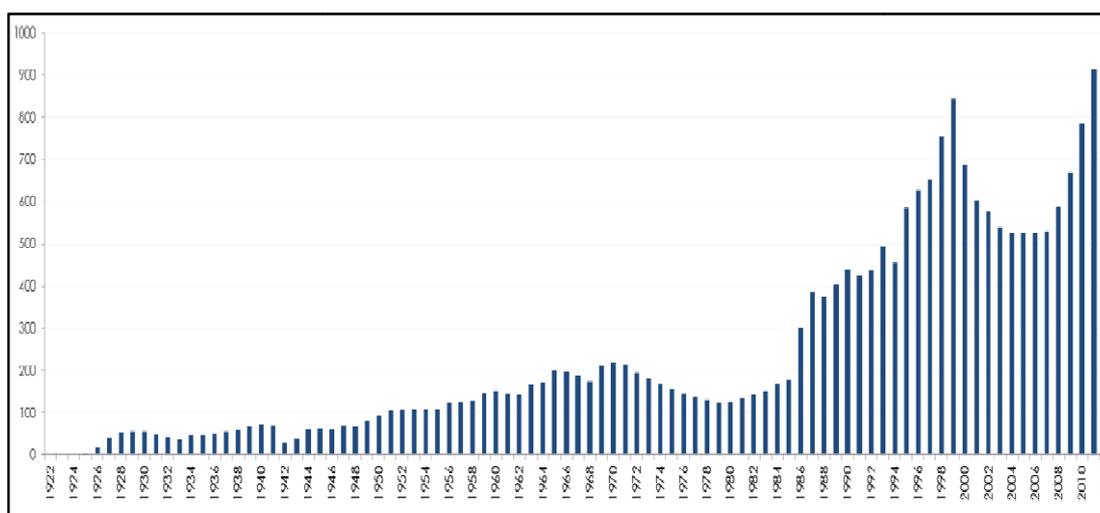
Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH

La producción de las cuencas de los Llanos Orientales, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena [VMM] está constituida de manera importante por crudos pesados, mientras que la producción de las cuencas Caguán-Putumayo y Valle Superior del Magdalena [VSM] está basada en su mayor parte por crudos medianos. Finalmente, la producción de las cuencas Catatumbo y Valle Inferior del Magdalena [VIM] está sustentada principalmente por crudos livianos.

### 1.3 Producción Histórica de Petróleo en Colombia

Los datos de producción nacional de petróleo muestran un comportamiento cíclico (ver Gráfico 1), que representan una tasa promedio del 3,9% anual de crecimiento en los últimos 50 años. En 1962 la producción fue de 142 miles de barriles de petróleo diarios - kbpd y en 2012 de 944 kbpd.

Esta media, no obstante, según se aprecia en el Gráfico 1, está muy condicionada por la existencia de dos períodos en los que la producción nacional tuvo un comportamiento marcadamente regresivo: la década de los 70, en el siglo pasado, y, más recientemente, durante la primera mitad de la década pasada.



**Gráfico 1. Histórico de producción de petróleo en kbpd. Años 1926 - 2012**  
Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)

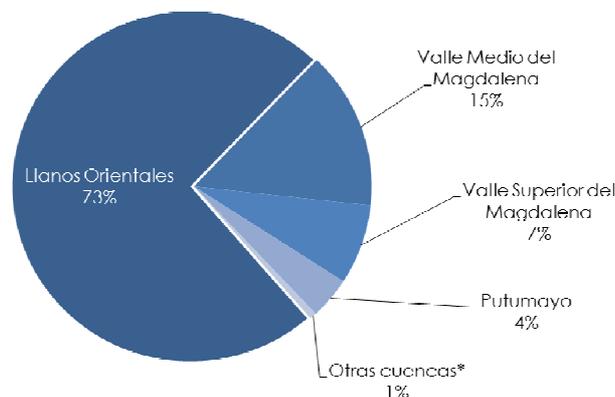
### 1.4 Distribución Territorial de la Producción Nacional de Petróleo

En el ámbito nacional, la producción de petróleo se reparte heterogéneamente en el territorio nacional, estando la misma concentrada en territorios localizados. En este sentido se destaca la cuenca de los Llanos Orientales que en los últimos años viene produciendo entorno al 67%-73% del petróleo nacional, ver Tabla 4 y Gráfico 2.

**Tabla 4. Producción de petróleo por cuenca Año 2012**

Cuenca	Producción promedio 2012 (bpd <sup>2</sup> )
Llanos orientales	694.099
Valle Medio del Magdalena	137.884
Valle Superior del Magdalena	69.752
Putumayo	36.542
Catatumbo	3.439
Cordillera Oriental	1.577
Valle Inferior del Magdalena	826
Total 2012	944.119

Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)



**Gráfico 2. Participación en la producción de crudo por cuenca. Año 2012**

Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)

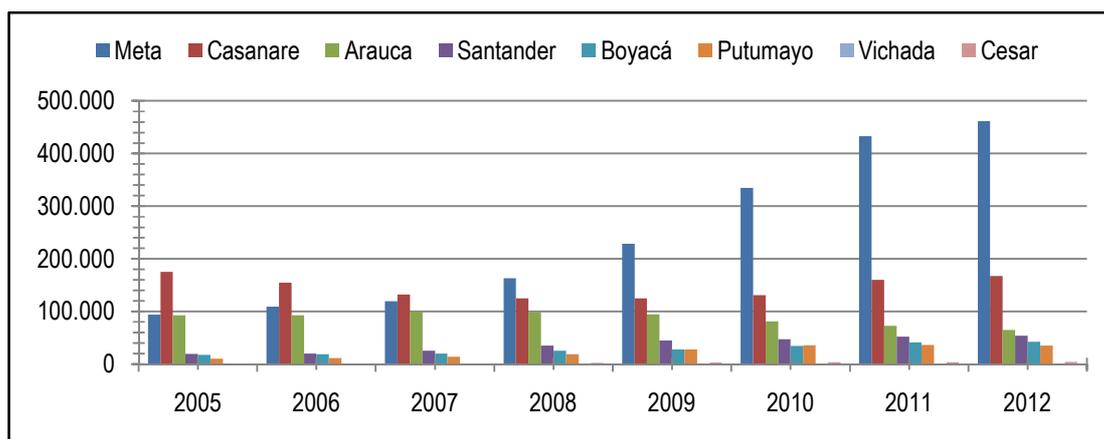
Cabe destacar que, aunque en los últimos años se ha mantenido constante este porcentaje de participación de los Llanos Orientales, no es así al desagregar por departamentos que conforman las cuencas, pues en los mismos llanos se ha producido una variación de productividad entre los pozos que se localizan en los departamentos que conforman dicha cuenca (Meta, Casanare, Vichada y Arauca), como se ve en la Tabla 5, Gráfico 3 y 4.

<sup>2</sup>bpd: Barriles de petróleo diarios

**Tabla 5. Datos de producción de petróleo por departamento. Años 2005-2012**

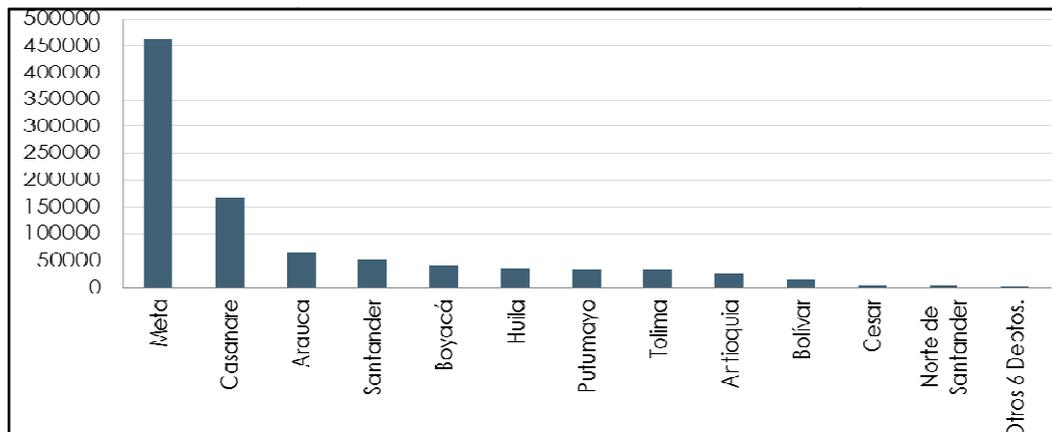
Dpto.	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Crecimiento 2005 - 2012
Meta	94.073	109.034	119.385	162.885	228.611	334.427	432.936	461.816	56%
Casanare	175.455	154.761	132.206	125.023	124.472	130.760	159.913	166.847	-1%
Arauca	92.417	92.580	99.777	98.301	94.740	81.451	72.477	65.001	-4%
Santander	19.204	19.909	25.597	34.687	44.787	47.460	51.738	53.437	25%
Boyacá	17.818	18.669	20.099	25.493	27.829	34.067	41.164	42.462	20%
Huila	50.441	47.661	43.082	43.696	45.058	44.297	41.911	36.222	-4%
Putumayo	10.044	11.500	13.509	18.640	27.466	35.636	36.770	35.055	36%
Tolima	37.895	42.376	45.524	43.950	41.373	35.938	32.054	32.655	-2%
Antioquia	11.128	11.115	11.788	13.704	15.580	18.887	20.604	24.986	18%
Bolívar	9.267	12.056	12.928	13.299	11.886	12.011	14.894	15.109	9%
Cesar	1.333	1.259	1.165	2.195	2.771	3.489	3.758	4.136	30%
Norte de Santander	2.555	2.551	3.018	3.162	3.342	3.474	3.361	3.506	5%
Cauca	2.199	2.161	1.421	1.161	1.114	905	839	974	-8%
C/marca	2.273	1.748	1.399	1.168	1.015	858	902	772	-9%
Nariño	116	-	164	205	193	1.016	893	511	49%
Vichada		-	-	24	43	526	210	167	2375%
Sucre		0	0	16	20	29	31	29	399%
Magdalena		-	-	-	0	-	7	12	157%
Caquetá		-	-	-	-	-	-	2	8%
<b>Total general</b>	<b>526.223</b>	<b>527.381</b>	<b>531.061</b>	<b>587.609</b>	<b>670.301</b>	<b>785.228</b>	<b>914.464</b>	<b>943.698</b>	<b>15%</b>

Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)



**Gráfico 3. Participación en la producción de crudo por departamento. Años 2005-2012**

Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)



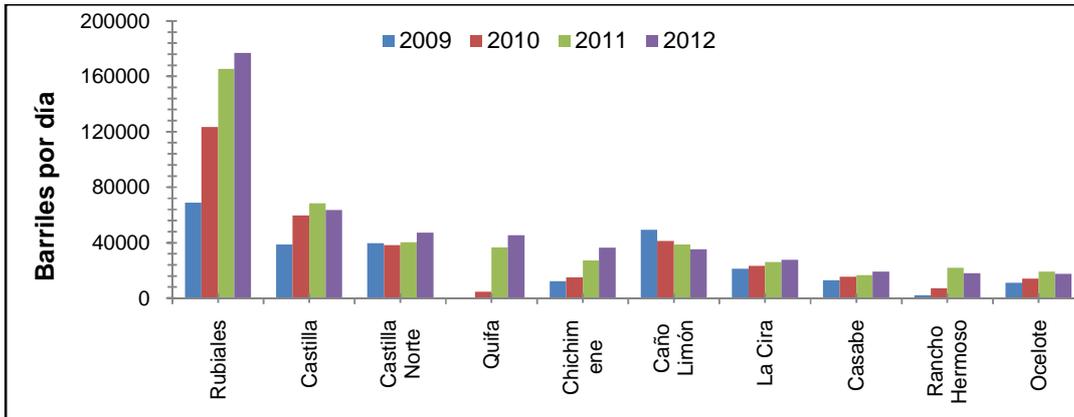
**Gráfico 4. Producción de crudo por departamento. 2012**

Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)

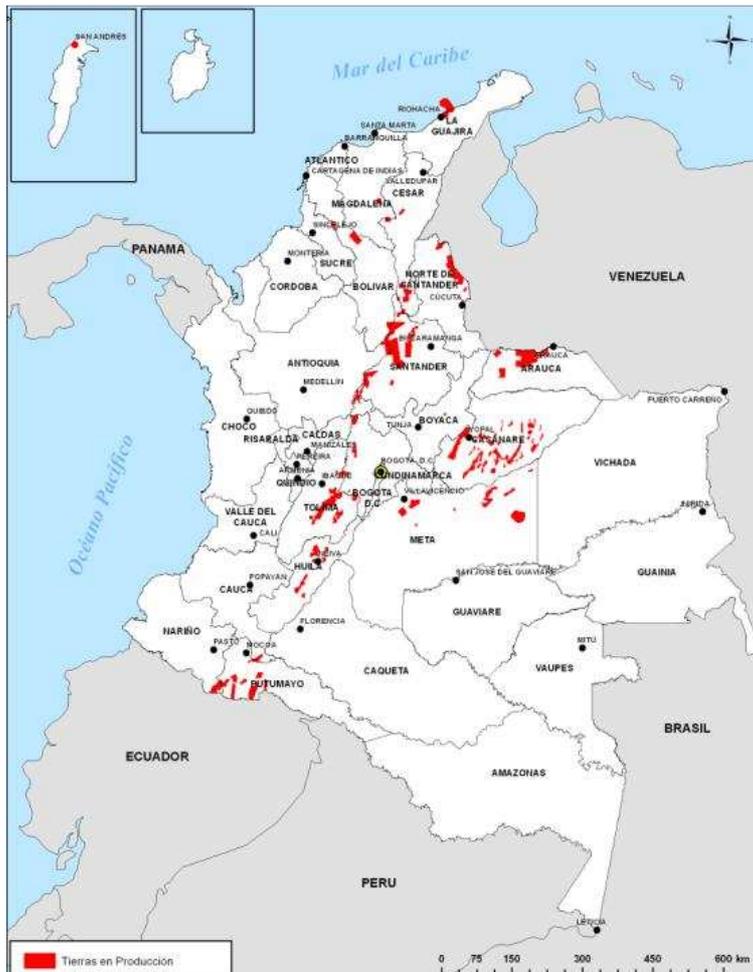
Como se observa en los datos y la figura anteriores, los departamentos de Arauca y Casanare han disminuido su producción de petróleo desde 2005. En contraposición, ha sido el departamento del Meta el que ha incrementado sustancialmente su participación en este periodo, con un aumento de la producción del 391%, pasando de 95 kbpd a 461 kbpd.

Entre los otros departamentos destacan los crecimientos, tanto en porcentaje como en volúmenes totales representativos, registrados en los campos de Boyacá (cuena de la Cordillera Oriental), Santander (Cuenca del Valle medio del Magdalena principalmente) y Putumayo (en la cuena de Caguán-Putumayo) y Cesar (Cuenca del Valle medio del Magdalena).

De igual forma, la producción petrolera colombiana se encuentra diversificada en campos localizados en distintas regiones o espacios geográficos del país; entre otros, los yacimientos de Casabe en Antioquia; Caño Limón en Arauca; Pauto y Rancho Hermoso en Casanare; Rubiales y Quifa en el Meta; además de otros centros de explotación ubicados en Huila, Tolima, Boyacá, Putumayo y Norte de Santander. Se destaca el comportamiento de la explotación de Campo Rubiales que ha pasado de 68 kbpd en 2009 a 177 kbpd en 2012, o Castilla y Castilla Norte que entre ambos han incrementado de 67 kbpd a 110 kbpd, en igual periodo. En el Gráfico 5 y la Figura 2 se observa la localización de la producción del petróleo nacional.



**Gráfico 5. Producción de petróleo, según principales campos (2009 – 2012)**  
 Fuente: Informe Estadístico Petrolero de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP)



**Figura 2. Localización de la producción de petróleo nacional**  
 Fuente: Asociación Colombiana de Petróleo (ACP)

## **Capítulo 2**

### **Transporte Multimodal**

#### **2.1 Aspectos Generales**

La logística en el transporte ha ido consolidándose cada vez más como una herramienta esencial para el comercio, el crecimiento y el desarrollo económico, tanto a nivel nacional, como regional e internacional. En la comercialización de bienes los dos principales determinantes de costos que establecen si un producto será o no competitivo en el mercado son el costo de producción y el costo logístico. Siempre que se mejore el desempeño logístico de una economía podrá reducirse el costo de comercialización, obtener mayor competitividad, estimular nuevas inversiones, brindar mayor nivel de satisfacción al cliente del exterior y ganar nuevos mercados.

La globalización económica obliga a que los países busquen optimizar sus procesos productivos, aprovechando eficientemente aquellas actividades en las que tienen ventajas comparativas. En este marco, para que las economías aumenten su competitividad en la arena internacional necesitan mejorar los costos, la variedad, la disponibilidad y la facilitación de los flujos de bienes. Para cumplir tal condición, los agentes intervinientes de una economía tendrán que promover y consolidar los procesos de producción y comercialización; y es aquí en donde el transporte y la logística se constituyen en un instrumento fundamental para el logro integral de este objetivo.

En el transporte de mercancías se tiende a una intensificación del tráfico y a un desequilibrio creciente en la utilización de los distintos modos de transporte, con un aumento de la parte correspondiente al transporte por carretera y una reducción en correspondencia al transporte ferroviario y fluvial. Y es allí donde necesariamente surge el término de “intermodalidad” que busca mediante un planteamiento global, una utilización más racional de la capacidad de transporte disponible, lo que sugiere una mejor utilización de los modos de transporte masivo de carga como el ferrocarril, las vías navegables y el transporte marítimo, que por sí solos no permiten el transporte puerta a puerta.

## 2.2 Descripción del Transporte Multimodal

Transporte Multimodal se define de forma genérica como: “el movimiento de mercancía usando dos o más modos de transporte” (United Nations; Economic Commission for Europe, 2000, pág. 4).

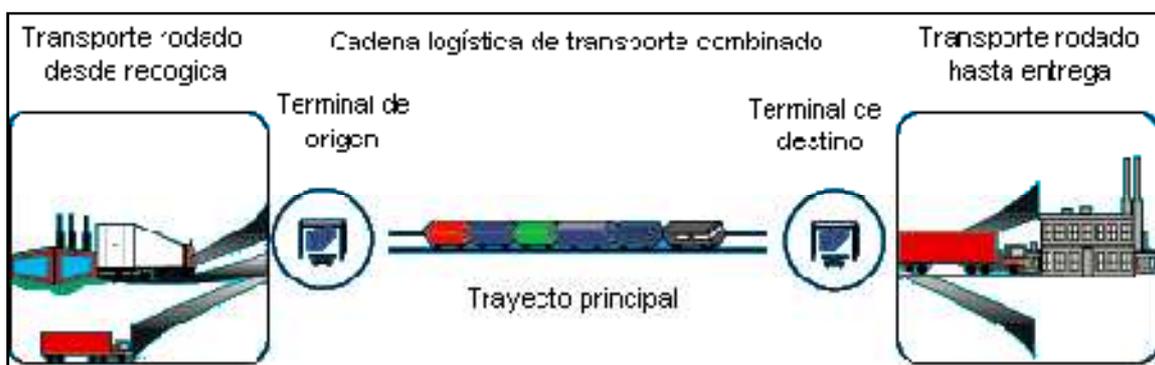
Además de esta definición básica, se pueden encontrar otras que introducen conceptos adicionales como la definición del **transporte multimodal internacional** en la que se hace referencia al transporte entre países diferentes y al contrato multimodal de transporte: "*El transporte multimodal internacional es el movimiento de mercancías, usando como mínimo dos modos diferentes de transporte sobre las bases de un contrato multimodal de transporte, desde un lugar donde la mercancía es cargada por el operador de transporte multimodal a un lugar designado para la entrega situado en un país diferente*". (Naciones Unidas, 1981, pág. 5)

La principal diferencia entre el transporte unimodal y el multimodal es la necesidad de realizar operaciones de intercambio de modo en el transporte multimodal. La eficiencia de estas operaciones suele ser un componente crítico para la competitividad del transporte multimodal, al tratarse de un extra-coste que no aparece en las soluciones de transporte unimodales.

La unitización de la carga y el uso de unidades de transporte compatibles e intercambiables entre diferentes modos (como contenedores, cajas móviles o semirremolques) han permitido mejorar de forma significativa la eficiencia de estas operaciones de intercambio modal, siendo esta unidad de transporte la que pasa de un modo a otro sin necesidad de que se produzca la manipulación de la carga en la operación.

Esto ha dado lugar a la aparición de conceptos como el de **transporte intermodal**, el cual es un tipo de transporte multimodal definido como el "*movimiento de mercancías en una misma unidad o vehículo usando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo*" (United Nations; Economic

Comission for Europe, 2000, pág. 4)., o el concepto genérico de **intermodalidad** que se define como “una característica de un sistema de transporte, que permite al menos el uso de dos modos de transporte diferentes de manera integrada, en una cadena de transporte puerta-a-puerta” (United Nations; Economic Comission for Europe, 2000, pág. 4). Ver Figura 3.



**Figura 3. Transporte Intermodalidad**  
Fuente:(Ministerio de Fomento España, 2003)

El transporte intermodal, permite a su vez la combinación de los regímenes de carga completa y grupaje, favoreciendo con ello atender la demanda de aquellos exportadores que no necesitan de la totalidad de espacio de un contenedor.

Bajo este enfoque, los sistemas de transporte intermodales consisten en sistemas de distribución / recolección de mercancías para su adecuada distribución, utilizando: la flexibilidad del transporte por carretera, un sistema de transporte de larga distancia y los terminales que se conectan a los modos de transporte (Flodén , 2007).

## **2.3 Principales Componentes de Costos en el Transporte Intermodal**

Los principales componentes de costos en el transporte intermodal son:

### **- Pre y Pos Transporte en Sistema Intermodal (PPH)**

El transporte por carretera es a menudo asignado a la recolección y distribución de los bienes en las redes de transporte intermodal (Bergqvist & Behrends, 2011) lo que permite soluciones de transporte intermodal que ofrecen una distribución finamente distribuida y sistemas de recogida con servicios de puerta a puerta.

Pre-transporte por lo general implican la prestación de un contenedor vacío al generador (expedidor) y el transporte subsecuente del contenedor lleno a la terminal, mientras que el post transporte implica la distribución de un contenedor lleno desde la terminal a un receptor y el retorno a la terminal de un recipiente vacío (Macharis & Bontekoning, 2004).

La competitividad de las soluciones de transporte intermodal en gran medida dependerán de los costos de Pre y Post Transporte (PPH) (Kreutzberger, Macharis, & Woxenius, 2006). Los PPH representan entre el 25% y el 40% del coste total de mover una unidad de carga intermodal (Macharis & Bontekoning, 2004). Además, dado que la PPH tiene un costo mayor, por tonelada-km, en comparación con su parte de la distancia total en la cadena de transporte (Bergqvist & Behrends, 2011), la operación de pre y post transporte es cada vez más significativa cuando la distancia de larga distancia disminuye (Woxenius & Bärthel, Developing intermodal transport for small flows over short distances, 2004). En consecuencia, el aumento de la eficiencia de las operaciones de PPH es crucial para la competitividad del transporte intermodal.

### **- Terminales Intermodales**

El núcleo de las redes intermodales son las terminales donde los bienes y proveedores de logística se reúnen físicamente e interactúan (Stokland, Sund, & Netland, 2010) y son fundamentales para hacer redes de transporte intermodal competitivo (Woxenius &

Bärthel, 2008). El costo del transbordo de contenedores en una terminal intermodal se incurre independientemente de la distancia que el contenedor se va a transportar (Rodríguez et al., 2009). Por otra parte, los elevados costos fijos de operación de una terminal intermodal deben ser compartidos entre muchos transbordos (Woxenius & Bärthel, Developing intermodal transport for small flows over short distances, 2004) lo que sugiere importantes economías de escala.

La eficiencia de una red de transporte intermodal depende de dónde se encuentran los terminales (Limbourg & Jourquin, 2009).

El transporte en camión es once veces más costoso, por tonelada-km, que el ferrocarril (Ballou, 2004), lo que conlleva a que la terminal intermodal debe estar ubicada cerca del cargador / receptor (Sandberg Hanssen & Mathisen, 2011) minimizando de esta forma la distancia de transporte por carretera. Así mismo, las terminales intermodales necesitan de adecuados sistemas que garanticen su eficiente operación (Bergqvist, Falkemark, & Woxenius, 2010).

Mediante la introducción de sistemas de gestión de la información, la contenerización y la mecanización de las actividades de cargue y descargue, se han tomado importantes medidas para hacer y operar terminales más eficientes en los últimos décadas (Rodríguez, Comtois, & Slack, 2009).

#### - **Modos de Transporte para los Recorridos de Larga Distancia**

Los modos de transporte predominante para los enlaces más largos de la cadena de transporte intermodal son: el ferrocarril, el transporte fluvial y el transporte marítimo de corta distancia (TMCD), donde las unidades se consolidan y aplican las economías de escala (Bergqvist & Behrends, 2011). En algunos casos, el transporte aéreo es también una alternativa, especialmente para las mercancías de alto valor y perecederos especialmente sensibles al tiempo de transporte.

Los transportes de corta y media distancia siguen siendo el dominio de los transportes por carretera (Woxenius & Bärthel, Developing intermodal transport for small flows over short distances, 2004).

Las estimaciones muestran que en comparación con el transporte fluvial, el costo promedio por tonelada de carga es 3 veces más alta para el transporte por ferrocarril, 35 veces más altos para el transporte por camión y 83 veces más altos en el transporte aéreo (Ballou, 2004).

Sin embargo, el transporte fluvial de bajo costo se ubicó como el más lento de estos modos de transporte, mientras que el transporte aéreo de alto costo es el transporte más rápido (Ballou, 2004).

#### - **Distancias**

La distancia del transporte es uno de los factores clave en la determinación de la viabilidad o competitividad del transporte multimodal.

Existen numerosos estudios que tratan de analizar las distancias mínimas a partir de las cuáles el transporte multimodal o intermodal puede resultar competitivo frente a la alternativa de la carretera. Los resultados varían de unos estudios a otros pudiendo servir como orientación pero no para extrapolar conclusiones sobre otros casos concretos.

Esta variación se debe a que la determinación de la distancia óptima a partir de la cual puede considerarse el transporte multimodal como plenamente competitivo está sujeta a un amplio número de variables que condicionan cada uno de los posibles casos particulares (aspectos como la tipología y configuración de los trenes, el tipo de tracción o la tipología de mercancías transportadas, pueden condicionar enormemente la competitividad del transporte multimodal).

El transporte multimodal o intermodal será más competitivo cuando menores sean las distancias de pre y post transporte. En este sentido resulta básico el contar con una adecuada red de terminales o centros de intercambio modal que acerquen el transporte fluvial y ferroviario a los puntos de generación y atracción de la carga.

Para el caso del transporte combinado o multimodal que combina el ferrocarril (como modo de transporte para el tramo de mayor distancia) y el transporte terrestre por carretera (para los acarreos), diferentes estudios concluyen que la distancia mínima para que sea una opción competitiva, más allá de los diversos factores mencionados que puedan condicionar la cadena logística, debe de ser superior a los 400 kilómetros.

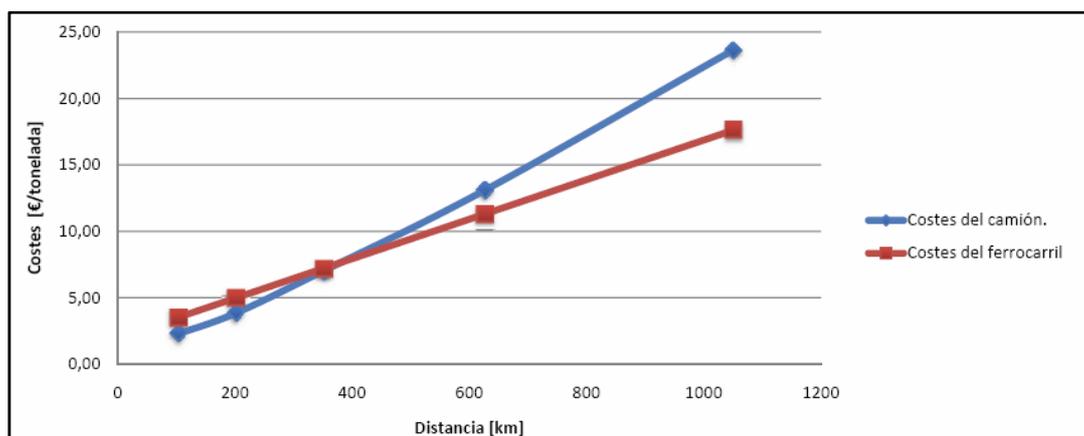
En el estudio “Transporte ferroviario de mercancías: Identificación de los factores críticos y propuestas de acción para su desarrollo en casos específicos de demanda” contratado por CIMALSA en Junio de 2009, los autores plantean una serie de casos prácticos basados en los costes asumidos por el cargador para el transporte de contenedores, y comparan los costes del transporte unimodal por carretera y los del transporte combinado ferrocarril – carretera, con acarreos de 20 km en origen y 40 km en destino.

Los resultados de este trabajo señalan que la distancia que define claramente la mayor competitividad del transporte intermodal, bajo dichos supuestos, son los 800 km. Mientras que en el caso de distancias comprendidas entre los 600 y los 800 km el posicionamiento del punto de origen y destino con respecto a la terminal (distancia de los acarreos) influye de forma decisiva en la competitividad.

De otra parte, en el modelo planteado por Escudero, Delgado, Muñuzuri, & Onieva (2007), los autores señalan que la opción del transporte intermodal únicamente es rentable a partir de los 500 km de distancia entre origen y destino. Este resultado se alcanza a partir de la aplicación de una herramienta de ayuda a la decisión para la elección de un modo u otro de transporte, según la rentabilidad económica del mismo.

Ferromex, el mayor operador mexicano de transporte ferroviario, considera que una distancia de 500 Km es adecuada para garantizar la eficiencia en costes de la opción intermodal.

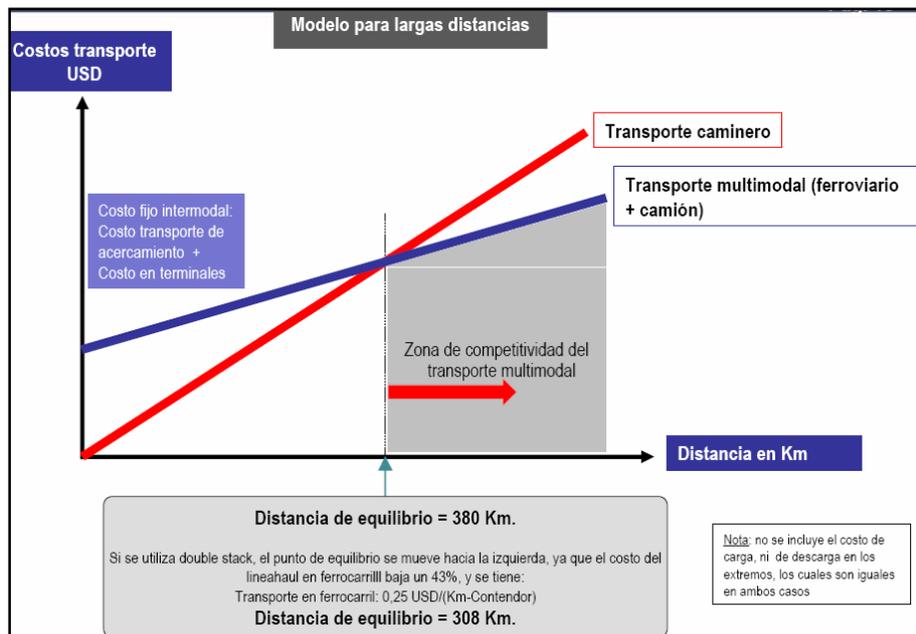
En España, tras analizar los diferentes costes de transporte de forma individualizada tanto del transporte por carretera como del ferrocarril (extraídos del Observatorio de costes por carretera y del Observatorio del Ferrocarril), Feria Ríos (2010) concluye que la distancia a partir de la cual el transporte ferroviario sería más competitivo que el camión está situada a partir de los 400 km (Gráfico 6). La medida empleada para ello en sus conclusiones es la del coste por tonelada transportada.



**Gráfico 6. Comparativa de costes Ferrocarril - Carretera**  
Fuente: Elaboración propia basada en Feria Ríos (2010)

Estos dos últimos casos, hacen referencia a una distancia similar a la contemplada en el estudio de KOM International del año 2013 sobre la Estructura de Costos de Transporte Intermodal: El Caso Chileno. Pues en su análisis basado en los precios del transporte en Chile se apunta que la distancia mínima a partir de la cual la alternativa multimodal será más competitiva se sitúa en los 380 kilómetros, ver Gráfico 7.

En el caso del transporte marítimo de corta distancia (TMCD), la ruta de éxito es aquella en la que el porcentaje de los acarreos no supere el 30% de la distancia total de la cadena logística. Debido a que se calcula que el coste del acarreo terrestre supone aproximadamente el 25% del coste total del transporte de mercancías (Rodríguez, M. y Martínez de Osés (2011).



**Gráfico 7. Comparativa de costes Ferrocarril - Carretera**

Fuente: Elaboración propia basada en el estudio de KOM International del año 2013 sobre la Estructura de Costos de Transporte Intermodal: El Caso Chileno

Por último, en relación al transporte fluvial, la distancia en sí misma representa en ocasiones el principal obstáculo para poder competir con el transporte unimodal terrestre (Konings, 2009) debido a las propias restricciones de velocidad de recorrido que tiene este modo de transporte. Sin embargo, hay que poner en valor que el transporte fluvial es el modo de transporte más económico (en términos de toneladas – kilómetros) cuando no se considera la velocidad como el factor decisivo (CEPAL).

#### - Volúmenes

Los modos de transporte marítimo, fluvial o ferroviario se caracterizan por la capacidad de transportar grandes volúmenes de carga de forma eficiente, frente a las mayores limitaciones del transporte carretero en cuanto a capacidad de carga.

Este factor puede convertirse por tanto en una ventaja del transporte multimodal para aquellos cargadores que requieran del movimiento de grandes volúmenes de carga. Este es el caso típico de los tráficos tramp en transporte marítimo: “Opción destinada

*principalmente a carga homogénea de poco valor y generalmente del mismo cargador. No tiene rutas ni fechas predeterminadas y su organización y contratación es sencilla amparada en una póliza de fletamento"* (Sandberg Hanssen, Mathisen, & Jørgensen, Generalized transport costs in intermodal freight transport, 2012).

Se puede encontrar su equivalente para el transporte fluvial o el ferrocarril con la contratación de trenes completos. Sin embargo, la mayor capacidad de carga también podría convertirse en una desventaja para aquellos cargadores que mueven bajos volúmenes, puesto que en estos casos resulta necesaria la concentración o consolidación de cargas de múltiples cargadores. La aparición del contenedor simplificó significativamente el proceso, revolucionando el transporte marítimo al hacerlo mucho más atractivo para pequeños cargadores usuarios de los servicios de las líneas regulares: *"Opción destinada principalmente a carga heterogénea de alto valor unitario y varios cargadores. Sigue unas rutas y fechas preestablecidas. Su organización es más compleja y la contratación es bajo conocimiento de embarque"*. (Sandberg Hanssen, Mathisen, & Jørgensen, Generalized transport costs in intermodal freight transport, 2012).

Al igual que ocurrió con los tráficos tramp, también podemos encontrar el equivalente de los tráficos de línea regular para el transporte ferroviario y fluvial, con servicios regulares que se comercializan y completan con la carga de múltiples cargadores. La unitización de la carga con el uso de contenedores, cajas móviles, semirremolques, etc., es también en estos casos uno de los aspectos clave para el éxito de estos servicios, al permitir reducir de forma significativa los costes de las operaciones de intercambio modal.

La concentración de volúmenes de carga permite alcanzar economías de escala y el mejor uso de los medios y equipos, lo que se traduce en una considerable reducción del coste unitario de la carga transportada.

El desarrollo de corredores multimodales que utilicen el ferrocarril o las vías navegables, requiere disponer de volúmenes y tráficos mínimos críticos:

- Por la mayor capacidad de carga de estos modos (que dependerá de la tipología de barcazas y trenes utilizadas)

- Por la necesidad de soportar unas frecuencias mínimas de servicio capaces de adaptarse a las necesidades o requerimientos de los usuarios.
- Por la necesidad de disponer de un volumen de operaciones suficiente en las terminales que permita soportar las inversiones necesarias y minimizar los costes de operación en las mismas.

De igual modo, otro de los aspectos importantes que incide en la eficiencia de las cadenas logísticas es la compensación de cargas, es decir, la posibilidad de contar con corredores equilibrados que minimicen los kilómetros en vacío. Una vez más con la concentración de grandes volúmenes de carga de cargadores y orígenes heterogéneos se consiguen mayores eficiencias en este sentido.

La figura del operador de transporte (multimodal, ferroviario, marítimo, fluvial), juega un papel determinante en la configuración y oferta de servicios interesantes que cubran las necesidades de los cargadores, y la consiguiente consecución de la concentración de los volúmenes de carga necesarios.

Es difícil establecer cuáles son los volúmenes mínimos de carga requeridos que garantizan la viabilidad de un determinado corredor o servicio de transporte intermodal, siendo necesario un análisis individualizado en cada caso. Para el caso de transporte intermodal ferrocarril-carretera, en Europa se están manejando estándares o referencias cercanas a las siguientes (Feo-Valero, Garcia Menendez, & Saez Carramolino, 2010):

- El tren es competitivo transportando unos 70 TEUs o 1000 toneladas,
- Con una frecuencia diaria (5 trenes semanales),
- Requiere un alto y constante nivel de ocupación o utilización debido al importante porcentaje de costes fijos,
- Requiere flujos equilibrados que permitan cubrir los costes y mantener las frecuencias,
- Necesita mayor planificación que la carretera
- Necesita consolidación de cargas para conseguir los volúmenes necesarios

## 2.4 Condicionantes para la Viabilidad del Transporte Multimodal

El continuo crecimiento de los volúmenes de transporte de mercancías y la presencia de una red de carreteras más congestionadas, ha hecho que el transporte intermodal este en la agenda de los actores públicos y privados del sector transporte.

De modo general, el transporte multimodal y en particular el intermodal, permite realizar un mejor aprovechamiento de las ventajas inherentes a cada uno de los modos de transporte, reduciendo costes y mejorando la eficiencia de las cadenas de transporte. Así mismo:

- A nivel social, puede contribuir a la mejora de la seguridad viaria, la reducción de la contaminación atmosférica y acústica, menor consumo de energía, etc.
- A nivel infraestructural se pueden conseguir reducciones en la congestión de las carreteras, accesos portuarios, etc., y permitir un mejor aprovechamiento de las capacidades actuales de los sistemas de transporte.
- Desde el punto de vista del transporte, facilita el movimiento de medios y grandes volúmenes a medias y largas distancias.

Sin embargo, el desarrollo del transporte intermodal requiere vencer ciertos “condicionantes” para convertirse en una alternativa real al transporte unimodal por carretera (Sandberg Hanssen, Mathisen, & Jørgensen, Generalized transport costs in intermodal freight transport, 2012). Entre estos condicionantes se pueden mencionar los siguientes:

- Altos precios, derivados de la carencia de infraestructuras, de ineficiencias en los nodos y operaciones de intercambio modal, y/o de la situación precaria del ferrocarril y las vías navegables como consecuencia de la falta de inversión, modelos anticuados, existencia de monopolios, etc.
- Requerimiento de volúmenes y distancias mínimas para resultar competitivo
- Retrasos y falta de fiabilidad en los plazos
- Baja disponibilidad de servicios de calidad
- Posibles limitaciones en la tipología de bienes o productos transportables

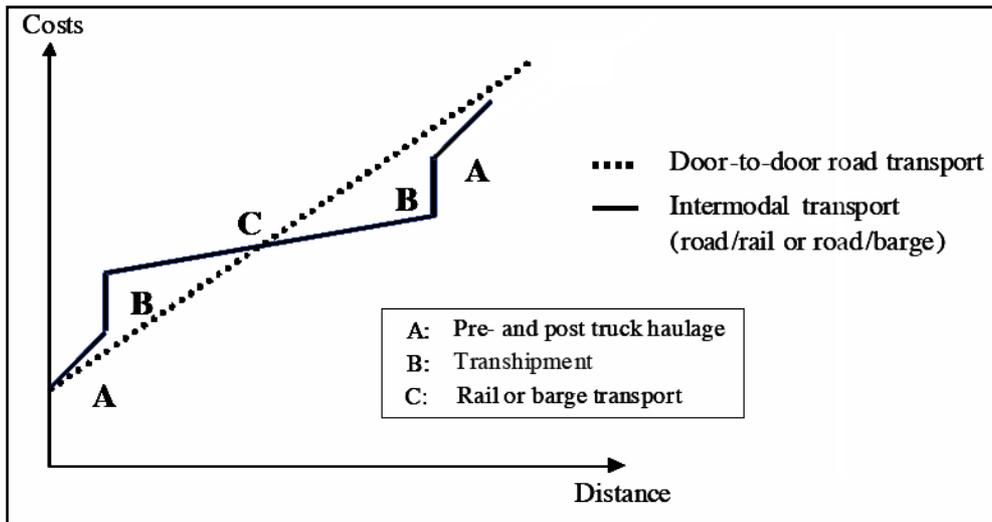
- Mayor riesgo de daño en la mercancía por el incremento del número de manipulaciones
- Complejos procesos administrativos

Numerosos estudios analizan los diferentes parámetros o criterios que influyen en la elección de un determinado modo de transporte, pudiéndose distinguir entre criterios de mercado y criterios de coste y calidad. Entre los criterios de mercado encontramos:

- Aquellos relativos al cargador como el tamaño de la empresa, la ubicación geográfica, la distancia entre terminales o la percepción que tenga del transporte intermodal.
- Los relativos al tipo de transporte como los volúmenes y frecuencia de los envíos, la compensación de cargas (equilibrio de los flujos por sentido), el número de recogidas y entregas, los requisitos específicos de la carga o los requisitos de la unidad de transporte intermodal para optimizar el transporte.
- Los relativos al entorno económico como la estabilidad económica e institucional, la organización del sector del transporte y el tamaño de las empresas, etc.

Por lo que se refiere a los criterios de coste y calidad, el coste puede ser definido como el precio que paga el cargador al operador por el transporte, los transbordos necesarios y otros servicios logísticos.

Los decisores comparan el costo del transporte y evalúan el diferencial de coste entre una misma cadena de transporte por carretera y una cadena intermodal. En este sentido, para hacer que el transporte intermodal sea una alternativa a considerar sobre el transporte por carretera sus costos de transporte tendrían que ser igual o menor (Van Klink & Van Den Berg, 1998), por lo tanto los costos adicionales por pre y post transporte, así como los trasbordos en terminales intermodales deberían ser compensados por los menores costos de transporte de larga distancia (Woxenius & Bärthel, Developing intermodal transport for small flows over short distances, 2004). Ver Gráfico 8.



**Gráfico 8. Estructura de costes del transporte por carretera e intermodal**  
 Fuente: (Konings, 2009)

Entre los criterios de calidad se puede señalar la fiabilidad, la flexibilidad, la seguridad, el tiempo de tránsito puerta a puerta, los tiempos de espera, la eficiencia de la operación de transbordo, la trazabilidad y la posibilidad de servicios logísticos adicionales.

El costo es por lo general el factor más relevante en la elección modal. En la determinación de los costes del transporte multimodal es necesario tener en cuenta tanto el coste propio del transporte o desplazamiento de la carga, como el coste de las operaciones de intercambio de modo y logísticas asociadas.

Los aspectos que se han mencionados, son la base de la formulación del modelo de transporte que se desarrolla en el presente trabajo con el fin de buscar un sistema de transporte que optimice los costos de transporte del petróleo producido en la región de la altillanura con destino a Cartagena.

## Capítulo 3

### Modelo de Transporte que Minimice los Costos de Transporte del Petróleo Generado en la Altillanura con destino a Cartagena

Este capítulo muestra los aspectos metodológicos para la formulación y elaboración del modelo de transporte, cuya función objetivo es optimizar (minimizar) los costos del transporte del petróleo producido en la región de la Altillanura con destino Cartagena.

#### 3.1 Aspectos Generales del Costo Generalizado del Transporte

Supóngase que un expedidor de mercancías busca minimizar los costos totales de transporte y, por lo tanto, elige la solución de transporte de costos generales más bajos. Los costos generalizados por tonelada para el comprador de servicios de transporte,  $G$ , se define como:

$$G(D) = P(D) + HT, \quad \text{donde } \frac{\partial P}{\partial d}, \frac{\partial T}{\partial D} > 0 \Rightarrow \frac{\partial G}{\partial D} > 0 \quad (1)$$

El costo de transporte generalizado en (1) es la suma de dos elementos. En primer lugar, los costos pecuniarios,  $P$ , están relacionados con el precio para el servicio de transporte. En segundo lugar, el costo de tiempo es el producto de coste de tiempo por hora,  $H$ , y el tiempo de transporte,  $T$ .

Asumiendo que  $P$  y  $T$ , y por lo tanto también  $G$ , se relaciona positivamente con la distancia de transporte en kilómetros (Km),  $D$ , mientras que  $H$  es independiente de la distancia de transporte.

La definición de los costos generalizados de transporte en la ecuación (1) incluye los costos importantes relevantes para el cargador de mercancías. Desde la perspectiva de la economía del bienestar también los costes externos deben incluirse. Si todos los costes externos son interiorizado en la función de costos de transporte generalizado, los costos económicos privados y de bienestar social deberían considerarse igualmente con

Llevando a que las soluciones de transporte elegidos serían óptimos para la sociedad en su conjunto (Sandberg Hanssen, Mathisen, & Jørgensen, 2012).

Un enfoque mayor en cuestiones ambientales y campañas de actitud podría hacer que las empresas de transporte sean más conscientes de los costos que imponen a los demás.

$$C = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 XD \text{ donde } \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 > 0 \quad (2)$$

Es razonable que los costes para la empresa de transporte, C, dependan de la cantidad transportada, X, y de la distancia del transporte, D. En (2) la influencia de X y D en C están representados por relaciones lineales, que es un ejemplo de una función sencilla de costos que permite interpretaciones simples.

Sin embargo, existen ecuaciones más específicas que son utilizadas para analizar una mayor variación en los costos. A pesar de la debilidad de tratar a todos los servicios de transporte como producto homogéneo, las medidas de producción comunes son tonelada y/o tonelada kilómetro (Pels & Piet, 2008).

En la ecuación (2) los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  representan el incremento marginal en los costos cuando X y XD aumentan en una unidad, respectivamente. Los costos que son independientes de la cantidad y la distancia son dadas por el parámetro  $\alpha_0$ . Los costos marginales,  $\partial C / \partial X$ , para esta ecuación simple se incrementan linealmente con las distancias de transporte.

### 3.2 Precios y Distancia de Transporte

Al asumir un mercado de competencia alta, la relación entre el precio (igual a los costos marginales) y la distancia para el transporte por agua (w), camión (t) o férreo (r) se define en la ecuación (3):

$$\begin{aligned} P_w &= \beta_{0w} + \beta_{1w} D(\text{Agua}) \\ P_t &= \beta_{0t} + \beta_{1t} D(\text{truck}) \\ P_r &= \beta_{0r} + \beta_{1r} D(\text{rail}) \end{aligned}$$

Donde:  $\beta_{0w}, \beta_{1w}, \beta_{0t}, \beta_{1t}, \beta_{0r}, \beta_{1r} > 0 \quad (3)$

El parámetro  $\beta_{0i}$ , donde  $i = \{w, t, r\}$ , indica que hay precios independientes a la distancia por servicios tales como carga y descarga. Es razonable  $\beta_{0w} > \beta_{0r} > \beta_{0t}$  porque los costos son más altos en los terminales de transporte marítimo y más bajos en los de transporte por carretera (Rodríguez, Comtois, & Slack, 2009). Se obtiene de (3) que  $\partial P_i / \partial D \geq 0$  y  $\partial^2 P / \partial D^2 = 0$ .

La evidencia empírica muestra que la relación entre el precio y la distancia generalmente es más pronunciada para el transporte por carretera y menos para el transporte por mar (Ballou, 2004). Este incremento marginal en precio con respecto a distancia es representado por  $\beta_i$  y relacionado con  $\alpha_2$  en (2). Por lo tanto,  $\beta_{1t} > \beta_{1r} > \beta_{1w}$  lo que implica que  $\partial P_t / \partial D > \partial P_r / \partial D > \partial P_w / \partial D$ .

Los parámetros restrictivos en (3) implican que para todos los tres modos de transporte el precio por kilómetro disminuye con la distancia,  $\partial(P_i/D) / \partial D < 0$ . Cuando la distancia se mueve hacia el infinito, el precio por kilómetro,  $(P_i/D)$ , se aproxima a  $\beta_{1i}$ .

### 3.3 Costos de Tiempo y Distancia de Transporte

La relación entre los costos de tiempo,  $HT_i$ , y la distancia del viaje,  $D$ , es definida en (4) mediante la combinación de los costos de tiempo por hora por el tiempo de uso:

$$\begin{aligned} HT_w &= \gamma_{0w} + \gamma_{1w}D(\text{agua}) \\ HT_t &= \gamma_{0t} + \gamma_{1t}D(\text{camión}) \\ HT_r &= \gamma_{0r} + \gamma_{1r}D(\text{tren}) \end{aligned} \quad (4)$$

Los costos del tiempo independiente de la distancia están representados por,  $\gamma_{0i}$ , por su parte  $\gamma_{1i}$  es interpretado como el incremento en el costo del tiempo cuando la distancia de transporte se incrementa en un kilómetro.

En (4)  $\gamma_{0i} = H\tau_i$  y  $\gamma_{1i} = H/S_i$  donde  $\tau_i$  y  $S_i$  son positivos y representan que la distancia es independiente del tiempo utilizado para la carga y descarga de la mercancía y de la velocidad del modo de transporte, respectivamente.

Es razonable suponer que  $\tau_w > \tau_r > \tau_t$  y  $S_w < S_t < S_r$ . Siendo  $\tau_w > \tau_r > \tau_t$  entonces  $\gamma_{0w} > \gamma_{0r} > \gamma_{0t}$ . Por otra parte,  $\gamma_{1w} > \gamma_{1t} > \gamma_{1r}$  entonces  $S_w < S_t < S_r$ .

Un incremento en el costo de tiempo por hora, H, hace que todos los tres tipos de relaciones entre los costos de tiempo total y la distancia del viaje se desplacen hacia arriba y se vuelven más empinada. Un valor más alto de H por lo tanto aumenta las diferencias en los costos de tiempo entre los modos de transporte.

Los costos de tiempo por hora, H, es igual para un determinado tipo de bienes independiente del modo de transporte y la distancia. Sin embargo, en la práctica se debe hacer una selección de qué bienes usan un modo de transporte específico. El valor de H para una mercancía puede calcularse al considerar el valor por tonelada, la tasa de interés por hora y los costos de deterioro por hora. El valor, la tasa de interés y tasa de deterioro son todos positivamente relacionados con los costos de tiempo por hora.

Las expresiones en (4) consideran que el vehículo dispone de dos conductores. Si los camiones, al contrario, tienen un solo conductor se deben tener en cuenta las condiciones de tiempos de descanso. El descanso está regulado y es una limitación importante para las operaciones de transporte por carretera (Lowe, 2005), pero garantiza la igualdad de la competencia, la mejora de la seguridad vial y buenas condiciones de trabajo dentro de la Unión Europea (Comisión Europea, 2006). El uso de un conductor implica que la curva de tiempo de uso de los vehículos aumenta gradual y no de forma continua con respecto a la distancia de transporte. Sin embargo, el costo por kilómetro será menos pronunciado si sólo se incluye el salario de un conductor. Dado que estos dos factores de atracción en direcciones opuestas, no es posible concluir de forma inequívoca si es rentable usar dos conductores en lugar de uno sólo.

### 3.4 Costos Generalizado de Transporte y Distancia de Transporte

Una expresión general de los costos generalizados de transporte para cada uno de los modos se obtiene reemplazando las ecuaciones de precio (3) y de costo de tiempo total (4) en (1), obteniéndose la siguiente ecuación (5):

$$\begin{aligned}G_w &= \rho_{0w} + \rho_{1w}D(\text{agua}) \\G_t &= \rho_{0t} + \rho_{1t}D(\text{camión}) \\G_r &= \rho_{0r} + \rho_{1r}D(\text{tren})\end{aligned}\tag{5}$$

En (5) el componente de los costos generalizados independiente de la distancia está representado por  $\rho_{0i} = (\beta_{0i} + \gamma_{0i})$  donde  $i = \{w, t, r\}$ . De acuerdo con las consideraciones previas  $\rho_{0w} > \rho_{0r} > \rho_{0t}$ . Los elementos dependientes que se incrementan linealmente con la distancia están definidos por  $\rho_{1i} = (\beta_{1i} + \gamma_{1i})$  que incluyen tanto los costos de precio como de tiempo.

Previamente se mencionó los elementos dependientes de la distancia (precio y tiempo) son más altos para el transporte por camión que en el transporte férreo. En este sentido, las dos curvas se cruzarán, el camión tiene un elemento independiente de la distancia menor que el ferrocarril y por ende en distancias cortas tendrá costos generalizados de transporte más bajos, pero en distancias largas es mayor.

Sin embargo, para el transporte por agua no es claro cómo se desarrollan los costos generalizados en función de las distancias en comparación con otros modos de transporte. Comparando con los otros modos de transporte se define que el precio ( $\beta_{1w}$ ) y el costo de tiempo ( $\gamma_{1w}$ ) para el transporte fluvial aumentan menos y más con la distancia, respectivamente.

El efecto total depende del tamaño relativo entre estos parámetros. Si, por ejemplo, los costos de tiempo se reducen (menor valor de la mercancía) entonces ( $\gamma_{1i}$ ) se vuelve menos importante y aumenta la probabilidad para el transporte por agua al tener un incremento menos pronunciado de costo generalizado con respecto a la distancia.

El umbral de la distancia para preferir un modo de transporte respecto a otro en el marco de la minimización de los costos generalizados de transporte se puede obtener a partir de (5). La ecuación (6) muestra las condiciones que deben existir para garantizar que el costo generalizado de transporte por camión sea más bajo que el transporte por agua,  $D_{tw}$ , el transporte por camión es más bajo que el transporte por ferrocarril,  $D_{tr}$ , y el transporte por ferrocarriles más bajo que el transporte por agua,  $D_{rw}$ .

$$\begin{aligned}
 G_t < G_w &\Rightarrow \rho_{0t} + \rho_{1t}D < \rho_{0w} + \rho_{1w}D \Rightarrow D_{tw} < \frac{\rho_{0w} - \rho_{0t}}{\rho_{1t} - \rho_{1w}} \\
 G_t < G_r &\Rightarrow \rho_{0t} + \rho_{1t}D < \rho_{0r} + \rho_{1r}D \Rightarrow D_{tr} < \frac{\rho_{0r} - \rho_{0t}}{\rho_{1t} - \rho_{1r}} \\
 G_r < G_w &\Rightarrow \rho_{0r} + \rho_{1r}D < \rho_{0w} + \rho_{1w}D \Rightarrow D_{rw} < \frac{\rho_{0w} - \rho_{0r}}{\rho_{1r} - \rho_{1w}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Las distancias donde las curvas se interceptan, definidas por  $D_{tw}$ ,  $D_{tr}$  y  $D_{rw}$ , será positiva siempre y cuando se cumplan los rangos de los parámetros supuestos.

La distancia de intersección aumentan con la diferencia entre los elementos independientes de la distancia y disminuyen con la diferencia entre el aumento marginal del precio con relación a la distancia del transporte. Si  $\rho_{1w} < \rho_{1r} < \rho_{1t}$  puede esperarse que  $D_{tr} < D_{tw} < D_{rw}$ .

Entonces, el transporte por camión tiene el costo generalizado más bajo para distancias inferiores  $D_{tr}$ , el de ferrocarril es más bajo para las distancias entre  $D_{tr}$  y  $D_{rw}$  y el fluvial es más bajo para distancias superiores  $D_{rw}$ .

### 3.5 Comparación de costo generalizado en soluciones de transporte intermodal y unimodal

La pregunta importante es si una solución de transporte intermodal es preferida sobre un transporte unimodal para un generador de carga que busca minimizar los costos generalizados de transporte. Supongamos que un contenedor tiene que ser transportado de un origen a un destino con una distancia total denotada por  $\widehat{D}$ . Para una alternativa unimodal, únicamente transporte por carretera, la ecuación de costo generalizado se define como (7):

$$G_t = \rho_{0t} + \rho_{1t}\widehat{D} \quad (7)$$

El contenedor alternativamente puede primero ser transportado en camión (Pretransporte) a la distancia  $D_1$ , luego por ferrocarril o por agua en el trayecto de larga distancia ( $D_2 - D_1$ ) y finalmente en camión hasta el destino final (Post transporte),  $\widehat{D}$ . Los costos de pasar el contenedor (manejo en el terminal) del camión al tren o al río y nuevamente al camión son simétricos y definidos cada uno por  $L$ .

Note que estos costos de manejo comprenden tanto costos monetarios como costos de tiempo. Los costos generalizados de transporte para esta solución intermodal que usa el camión y el tren, son definidos en (8):

$$G_{int} = (\rho_{0t} + \varphi\rho_{1t}D_1) + (L + \rho_{1r}(D_2 - D_1)) + (L + \varphi\rho_{1t}(\widehat{D} - D_2)) \quad (8)$$

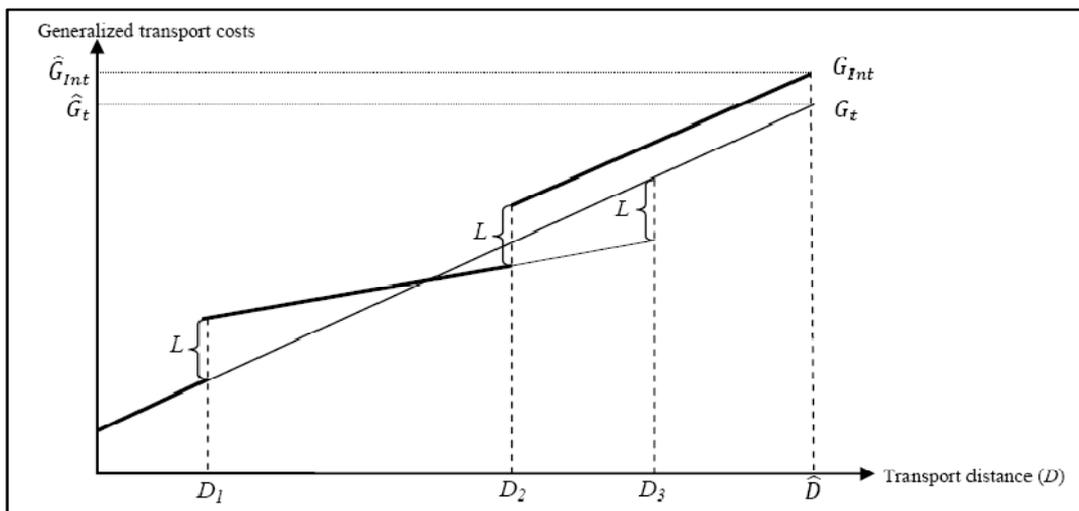
Además, en (8) los costos de PPH (pre y post transporte) son ajustados por  $\varphi \geq 1$ . Este factor tiene en cuenta que para el camión los costos generalizados de transporte pueden ser más altos por kilómetro debido a la baja velocidad de este transporte en el trayecto largo al realizarse por carretera.

Comenzando en la izquierda de (8), el primer elemento,  $(\rho_{0t} + \varphi\rho_{1t}D_1)$ , representa los costos generalizados de transporte por carretera desde el origen hasta el terminal localizado en la distancia  $D_1$ . El segundo paréntesis,  $(L + \rho_{1r}(D_2 - D_1))$ , representa el

costo de colocar el contenedor en el tren y costo del transporte del trayecto largo por tren entre las terminales localizadas en  $D_1$  y  $D_2$ . Finalmente, el último paréntesis  $(L + \varphi\rho_{1t}(\widehat{D} - D_2))$  representa el costo de cargar nuevamente en el camión y transportarlo hasta el destino final.

Los costos generalizados de transporte para la distancia total del recorrido se define para el caso intermodal y unimodal por  $\widehat{G}_{Int}$  y  $\widehat{G}_t$ , respectivamente. Esto asumiendo que el costo generalizado marginal con respecto a la distancia son iguales para las distancias de pre y post transporte y son iguales a  $\varphi\rho_{1t}$ . Previamente se definió que  $\rho_{1w}, \rho_{1r} < \rho_{1t}$ . Esto significa que los costos generalizados de transporte aumentan más rápidamente con la distancia para el camión en comparación con el río y el ferrocarril.

En el Gráfico 9 se observa que el transporte unimodal se prefiere sobre el intermodal cuando la longitud del trayecto de larga distancia es  $(D_2 - D_1)$ . Sin embargo, si la longitud del trayecto de larga distancia se incrementa a  $D_3$  los costos generalizados de transporte para las dos alternativas serían iguales. Si la longitud de larga distancia se incrementa aún más entonces el transporte intermodal se convierte en la mejor alternativa.



**Gráfico 9. Relación entre los costos generalizados de transporte y la distancia de transporte para el transporte por carretera y para el transporte intermodal**

Fuente: Elaboración propia

Se prefiere la solución de transporte intermodal a la unimodal si los costos de intermodal  $G_{int}$  (8) son inferiores a los costos de unimodal  $G_t$  (7), tal como se define en (9):

$$G_{int} < G_t \Rightarrow (D_2 - D_1) > \frac{2L + \rho_{1t}\widehat{D}(\varphi-1)}{\varphi\rho_{1t} - \rho_{1r}} \quad (9)$$

La condición para seleccionar el transporte intermodal se expresa de otra manera en (9), con el fin de demostrar como diferentes factores inciden en el rango de la distancia necesaria para el trayecto de largo recorrido por tren (esto aplica también para el río).

Las derivadas de  $(D_2 - D_1)$  con respecto a  $L, \widehat{D}, \varphi, \rho_{1r}$  son positivas, mientras que la derivada con respecto a  $\rho_{1t}$  es negativa. Esto implica que el umbral de la distancia de transporte por tren en el transporte intermodal se incrementa cuando:

- Los costos de operación en el terminal L, se incrementan
- La distancia total de transporte,  $\widehat{D}$ , aumenta
- El factor de ajuste por pre y post transporte en camión,  $\varphi$ , aumenta
- El factor dependiente de la distancia en el costo generalizado de transporte por tren,  $\rho_{1r}$ , aumenta
- El factor dependiente de la distancia en el costo generalizado de transporte por camión,  $\rho_{1t}$ , decrece

El caso especial cuando  $\varphi = 1$ , significa que los costos de pre-y post transporte y los del trayecto de larga distancia en camión son iguales, entonces (9) se reduce a  $2L/(\rho_{1t} - \rho_{1r})$ . Así, la distancia del trayecto de largo recorrido por tren es independiente de la distancia total cuando  $\varphi = 1$ .

### 3.6 Influencia de los Costos de Descanso

El Gráfico 9 muestra los costos generalizados de transporte sin embargo no incluye las restricciones de descanso de los conductores de los camiones. En la ecuación (10) los costos adicionales relacionados con la normativa de descanso se incluyen en  $G_t^*$ . Para cada descanso la curva de costo generalizado  $G_t^*$  tiene un cambio positivo igual a  $\Delta G_t$ . Para simplificar los descansos se colocan a intervalos iguales derivados de dividir el tiempo total de viaje en camión,  $D/S_t$ , por el tiempo promedio regulado entre cada descanso  $N$ . Por lo tanto  $D/S_t N$ , indica el número necesario de descansos. En la práctica, la distancia entre descansos variará acorde a las variaciones de velocidad en diferentes partes del viaje y requisitos para más frecuentes y largos descansos a medida que pasa el tiempo.

$$G_t^* = \rho_{0t} - \rho_{1t} \widehat{D} + \frac{\widehat{D}/S_t}{N} \Delta G_t \quad (10)$$

Si los costos de descanso para camiones se incluyen entonces se preferirá una solución de transporte intermodal a unimodal si (8) es inferior a (10) como se define en (11). El umbral de distancia cuando se incluyen los costos de descanso se denota  $(D_2 - D_1)^*$

$$G_{int} < G_t^* \Rightarrow (D_2 - D_1)^* > \frac{2L + \rho_{1t} \widehat{D} (\varphi - 1) - \frac{D/S_t}{N} \Delta G_t}{\varphi \rho_{1t} - \rho_{1r}} \quad (11)$$

Las variables  $L$ ,  $D$ ,  $\varphi$ ,  $\rho_{1r}$ ,  $\rho_{1t}$ , influyen en  $(D_2 - D_1)^*$  en el mismo sentido como influyen en  $(D_2 - D_1)$ . Las diferencias parciales de (11) muestran cómo la distancia de largo recorrido requerida está relacionada con los factores que comprenden los costos adicionales relacionados con los descansos para camiones. La derivada de  $(D_2 - D_1)^*$  con respecto a  $N$  y  $\Delta G_t$  es positiva y negativa, respectivamente. La derivada de (11) con respecto a  $S_t$ , es más clara ya que  $S_t$  es una parte de  $\rho_{1t} = (\beta_{1t} + H/S_t)$ . En consecuencia, con respecto a la regulación de reposo, el umbral de largo recorrido para hacer preferible el transporte intermodal aumenta (es decir, el transporte intermodal se vuelve menos favorable) cuando

el costo de reposo, utilizando sólo camión, se reduce por cualquiera de los intervalos más largos entre reposos,  $N$ , o el costo del tiempo menor para cada descanso  $\Delta G_t$ .

La influencia en  $(D_2 - D_1)^*$  de la distancia dependiente del costo de transporte marginal generalizado es positiva con respecto al transporte férreo ( $\rho_{1r}$ ) y ambiguo con respecto al transporte en camión ( $\rho_{1t}$ ). Sin embargo, si el factor de ajuste del costo para PPH por camión,  $\phi$ , se define como 1, entonces la derivada de  $(D_2 - D_1)^*$  con respecto a ( $\rho_{1t}$ ) es negativa siempre que los costos totales de terminales son más altos que los costos de reposo, es decir

$$2L > \Delta G_t \hat{D} / S_t N$$

Supongamos que una nueva carga se pone en camiones lo que implica que  $(\rho_{1t} - \rho_{1r})$  aumenta. Entonces la distancia largo recorrido requerida por ferrocarril se reduce cuando la diferencia en los costos marginales generalizados con respecto a la distancia para el carro y ferrocarril aumentan. En contraposición, si los costos de descanso son más altos que los costos de manipulación, entonces la distancia de largo recorrido requerida aumentará. También puede ser visto a partir de (11) que los costos relacionados con la manipulación y descanso tienen mayor impacto en la distancia de largo recorrido requerido si la diferencia entre los costos marginales generalizados para los dos modos de transporte con respecto a la distancia es pequeña.

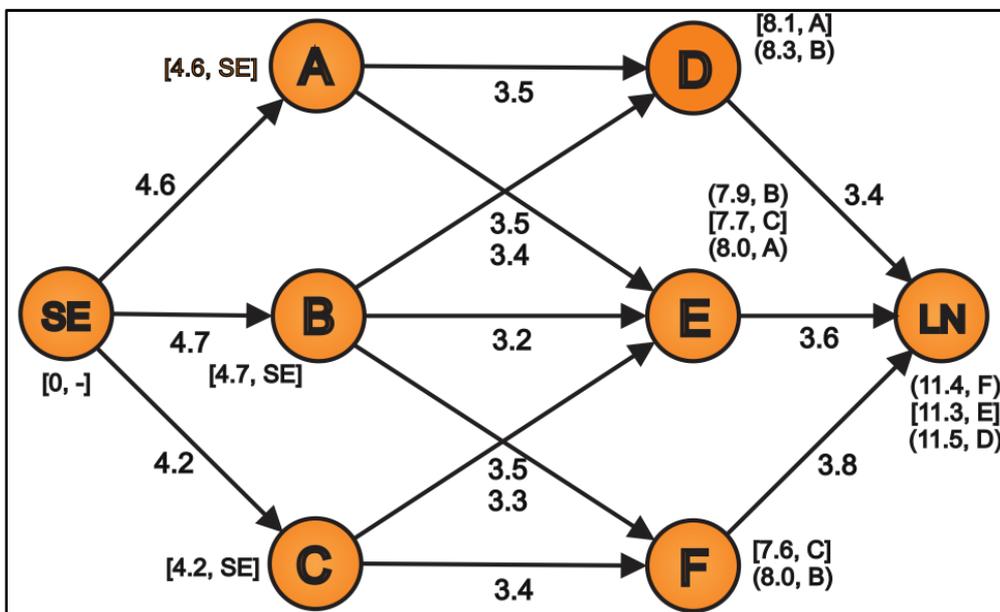
### 3.7 Método de DIJKSTRA

El algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos, es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen al resto de vértices en un grafo con pesos en cada arista.

La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el

grafo, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme, y como tal, no funciona en grafos con aristas de coste negativo (al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por una arista con costo negativo).

Para el algoritmo de DIJKSTRA se trabaja con dos clases de etiquetas: Permanentes y temporales. Las temporales sirven para evaluar el camino mínimo de los nodos antecesores las cuales servirán para elegir la etiqueta fija.



**Gráfico 10. Etiquetas temporales para el algoritmo de DIJKSTRA**

Fuente: Elaboración Propia

### **3.8 Aplicación modelo de transporte - Análisis del sistema de transporte óptimo para el transporte del petróleo de la Altillanura con destino a Cartagena**

Teniendo en cuenta la función objetivo del modelo de transporte descrito en el numeral anterior, se procede a realizar un análisis de los costos de transporte de crudo desde la altillanura hasta Cartagena de cada uno de los posibles sistemas de transporte identificados: i) transporte unimodal (carretero) y ii) transporte intermodal (carretero – férreo y carretero – fluvial).

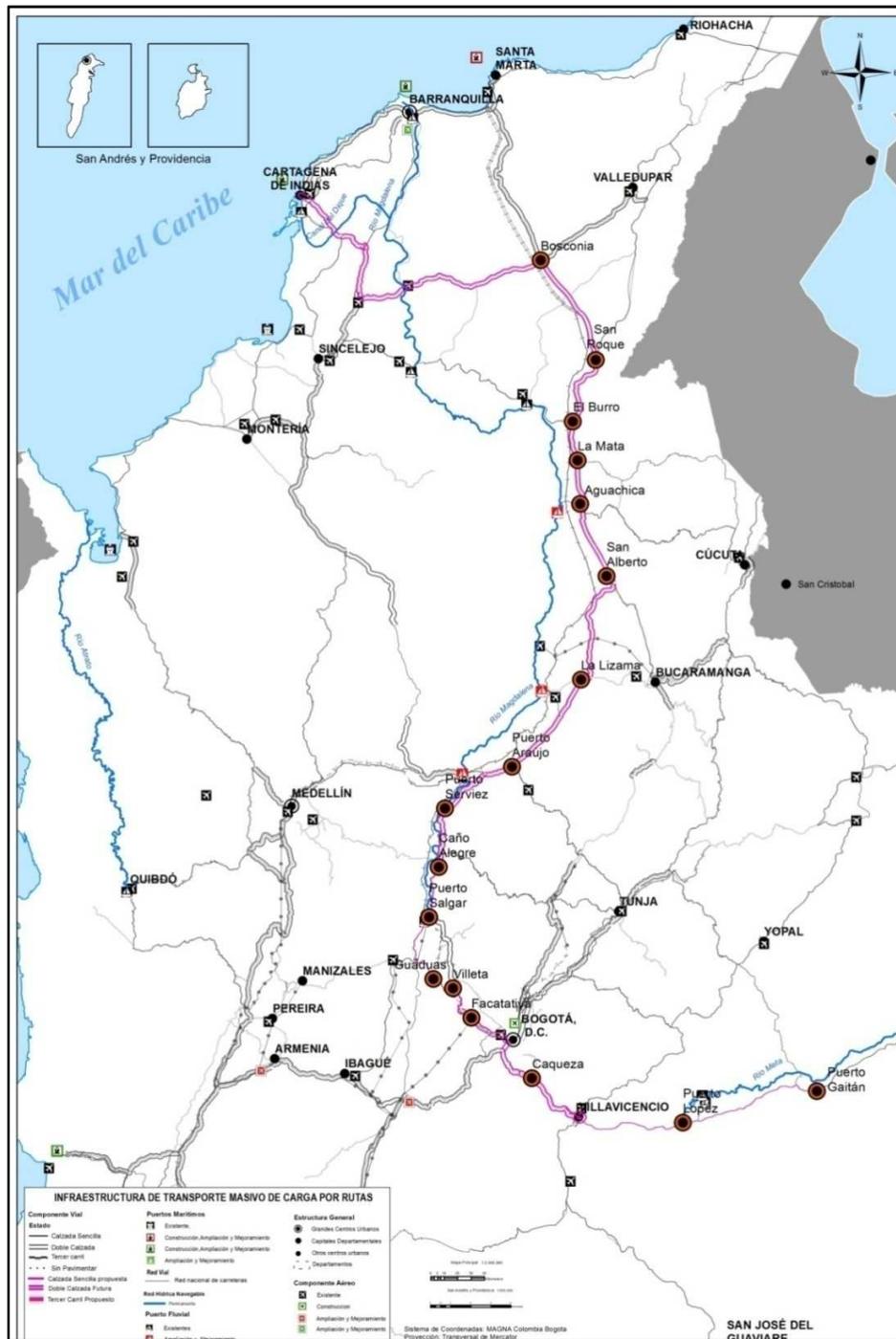
Para el análisis respectivo, se identificaron 15 corredores en modo carretero, 11 en intermodal carretero-férreo y 9 en intermodal carretero - fluvial, analizando en cada una de ellas criterios de costo de operación, longitud, tipo de terreno y puntos de intercambio modal.

En las siguientes tablas y figuras se listan y muestran cada uno de los corredores evaluados en cada uno de los modos, considerando como punto de origen el municipio de Puerto Gaitán, ubicado en el departamento del Meta, y como punto de destino la Zona Portuaria de Cartagena, ubicado en el departamento de Bolívar:

**Tabla 6. Corredores por modo carretero**

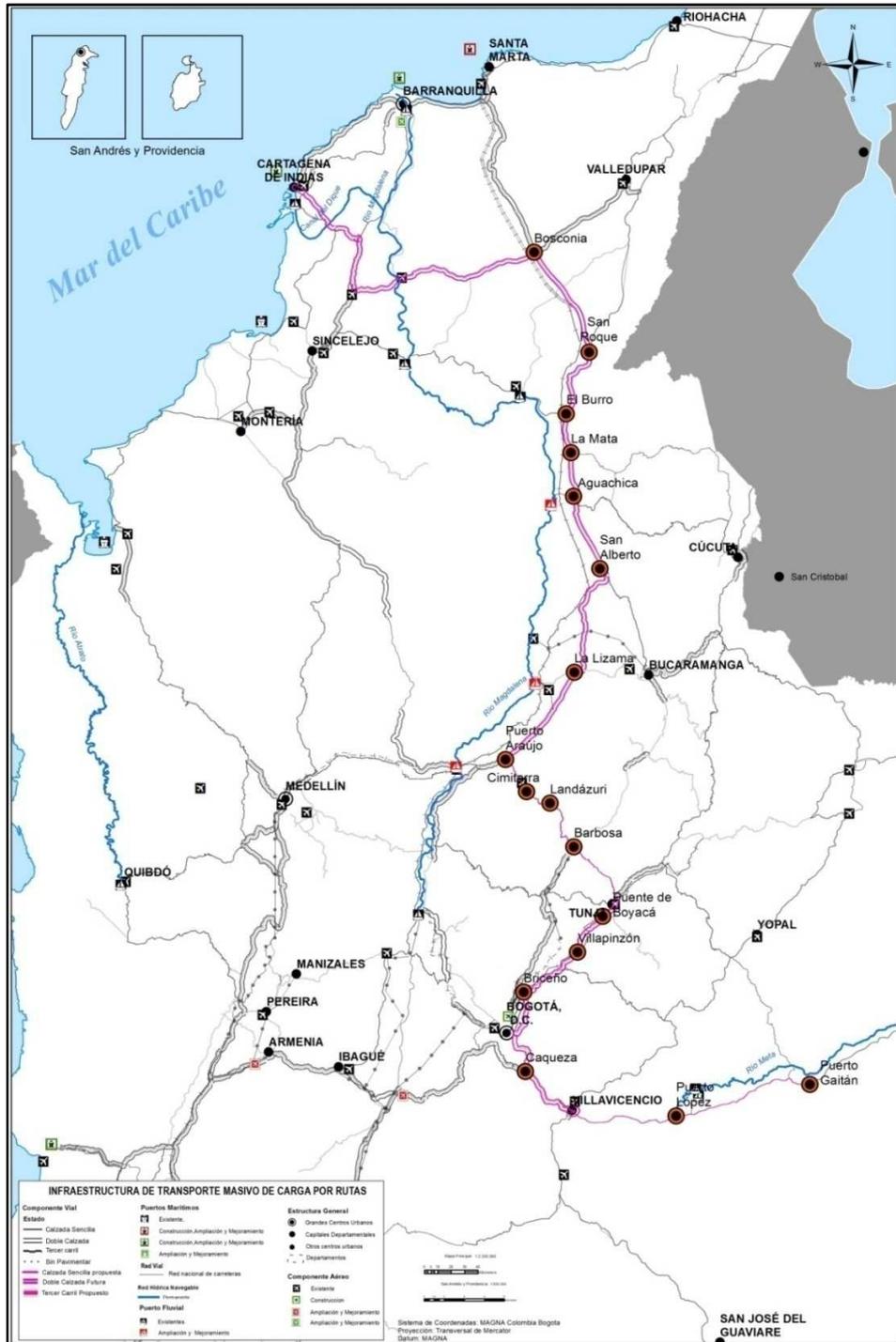
<b>Corredor</b>	<b>Ruta</b>
1	Pto. Gaitán - Villavicencio - Bogotá – Puerto Salgar - Puerto Araujo-San Alberto – Cartagena
2	Pto. Gaitán – Cáqueza – Briceño - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo -San Alberto- Cartagena
3	Pto. Gaitán – Villavicencio – Cáqueza – Briceño – Tunja – Barbosa - Florida Blanca - San Alberto – Cartagena
4	Pto. Gaitán – Villavicencio – Briceño – Tunja – Barbosa – Bucaramanga - El Cero – Aguachica –Cartagena
5	Pto. Gaitán – Villavicencio - El Tablón – Cáqueza - Puente Boyacá – Tunja – Chiquinquirá - Dos y Medio (Pto. Boyacá) - Puerto Araujo - San Alberto - Cartagena
6	Pto. Gaitán – Villavicencio – Cáqueza – Briceño – Zipaquirá - Puerto Servíz - Puerto Araujo - San Alberto - Cartagena
7	Pto. Gaitán – Villavicencio – Bogotá - Zipaquirá – Chiquinquirá – Barbosa - Puerto Araujo - San Alberto - Cartagena
8	Pto. Gaitán –Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá - San Gil - San Alberto – Cartagena
9	Pto. Gaitán – Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá – Bucaramanga - El Cero - San Alberto - Cartagena
10	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Malaga – Floridablanca - La Fortuna - San Alberto–Cartagena
11	Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Malaga – Bucaramanga - San Alberto - Cartagena
12	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – Chiquinquirá - Pto. Serviez - Puerto Araujo - La Fortuna - Cartagena
13	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – Barbosa - Puerto Araujo - Cartagena
14	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Duitama – Tunja – Barbosa – Floridablanca - San Alberto – Aguachica - Cartagena
15	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – Bucaramanga - San Alberto - Cartagena

Fuente: Elaboración propia



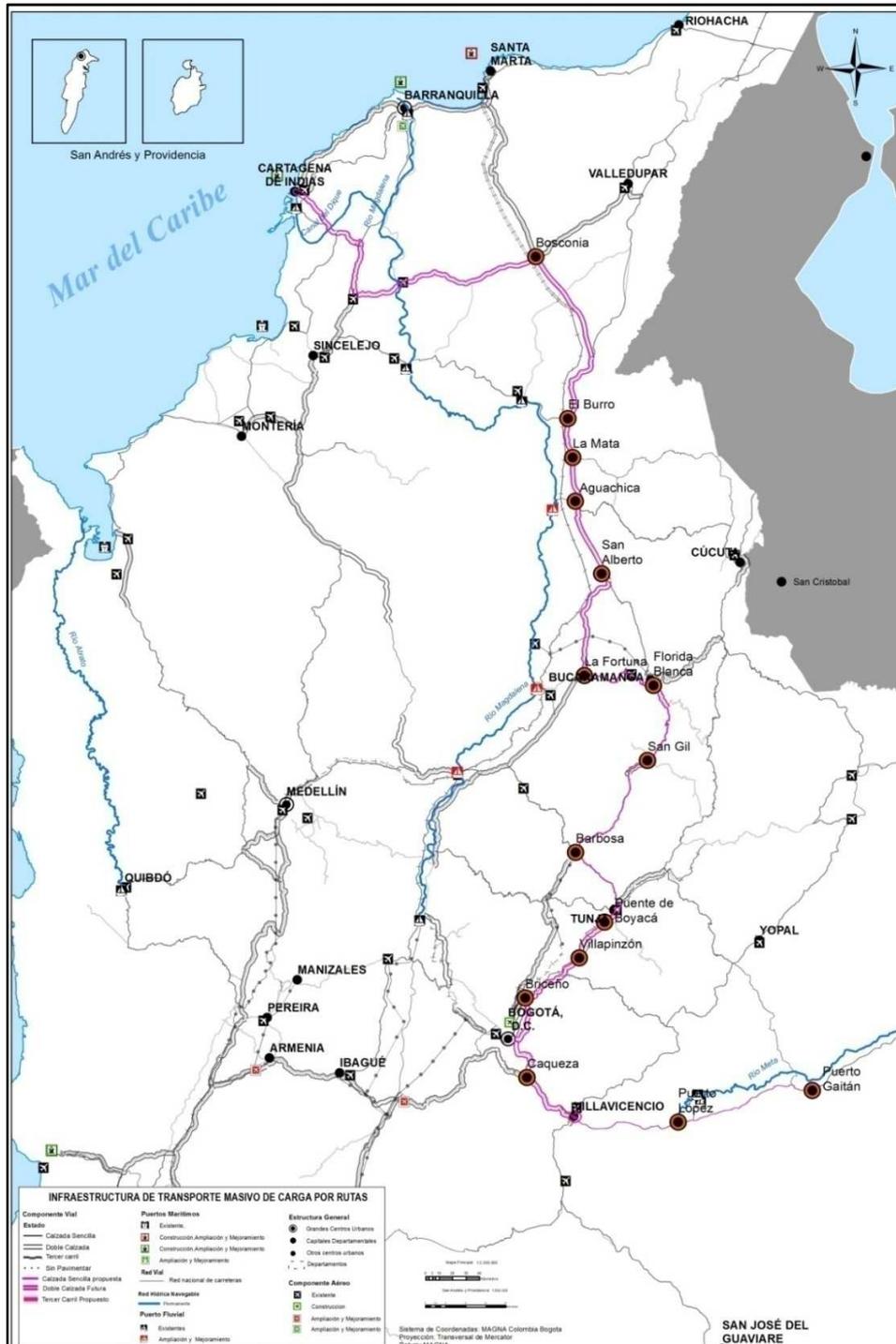
**Figura 4. Modo Carretero Corredor 1:**  
**Pto. Gaitán - Villavicencio - Bogotá – Puerto Salgar - Puerto Araujo-San Alberto –**  
**Cartagena**

Fuente: Elaboración propia

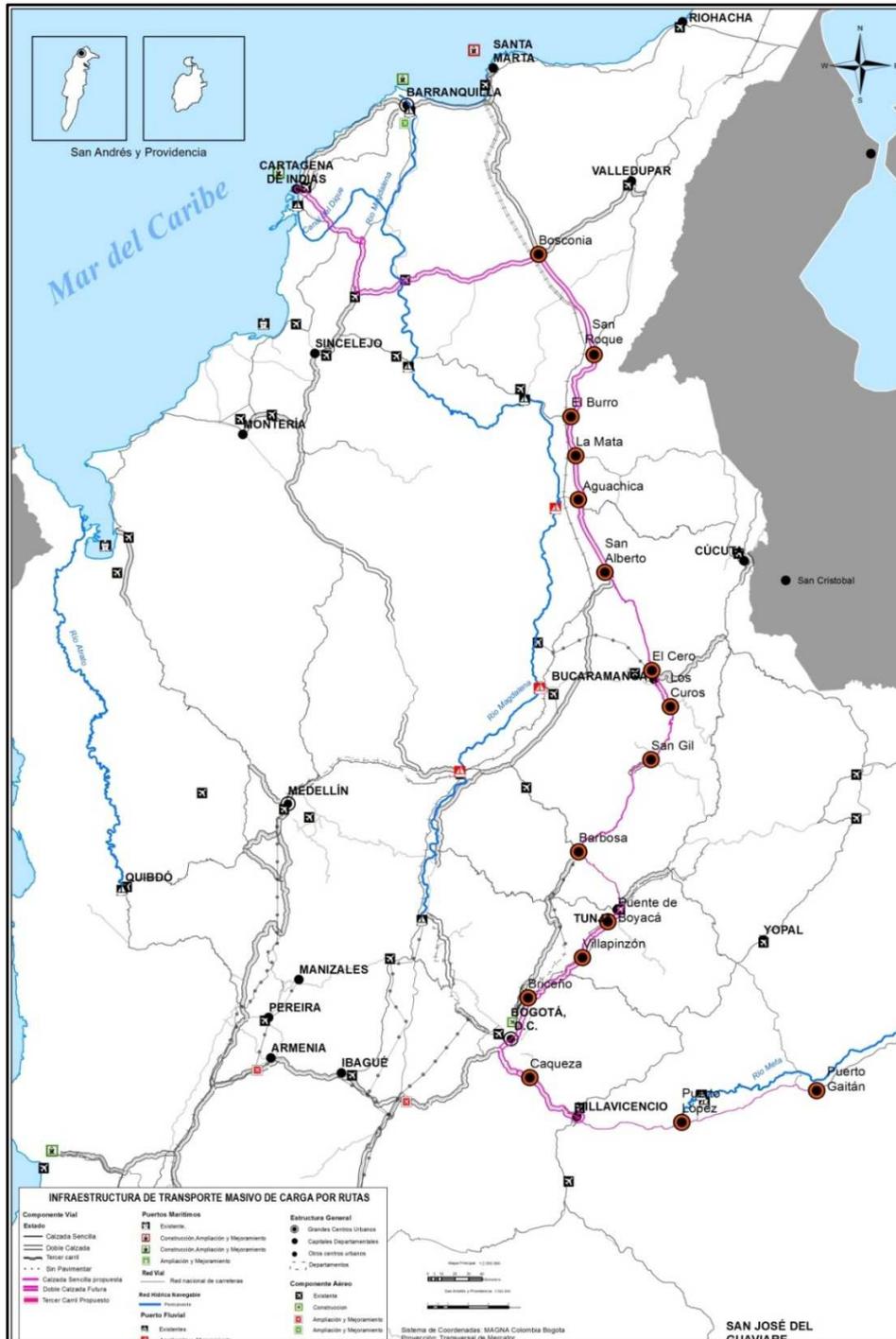


**Figura 5. Modo Carretero Corredor 2:**  
**Pto. Gaitán – Cáqueza – Briceño - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - San Alberto -**  
**Cartagena**

Fuente: Elaboración propia

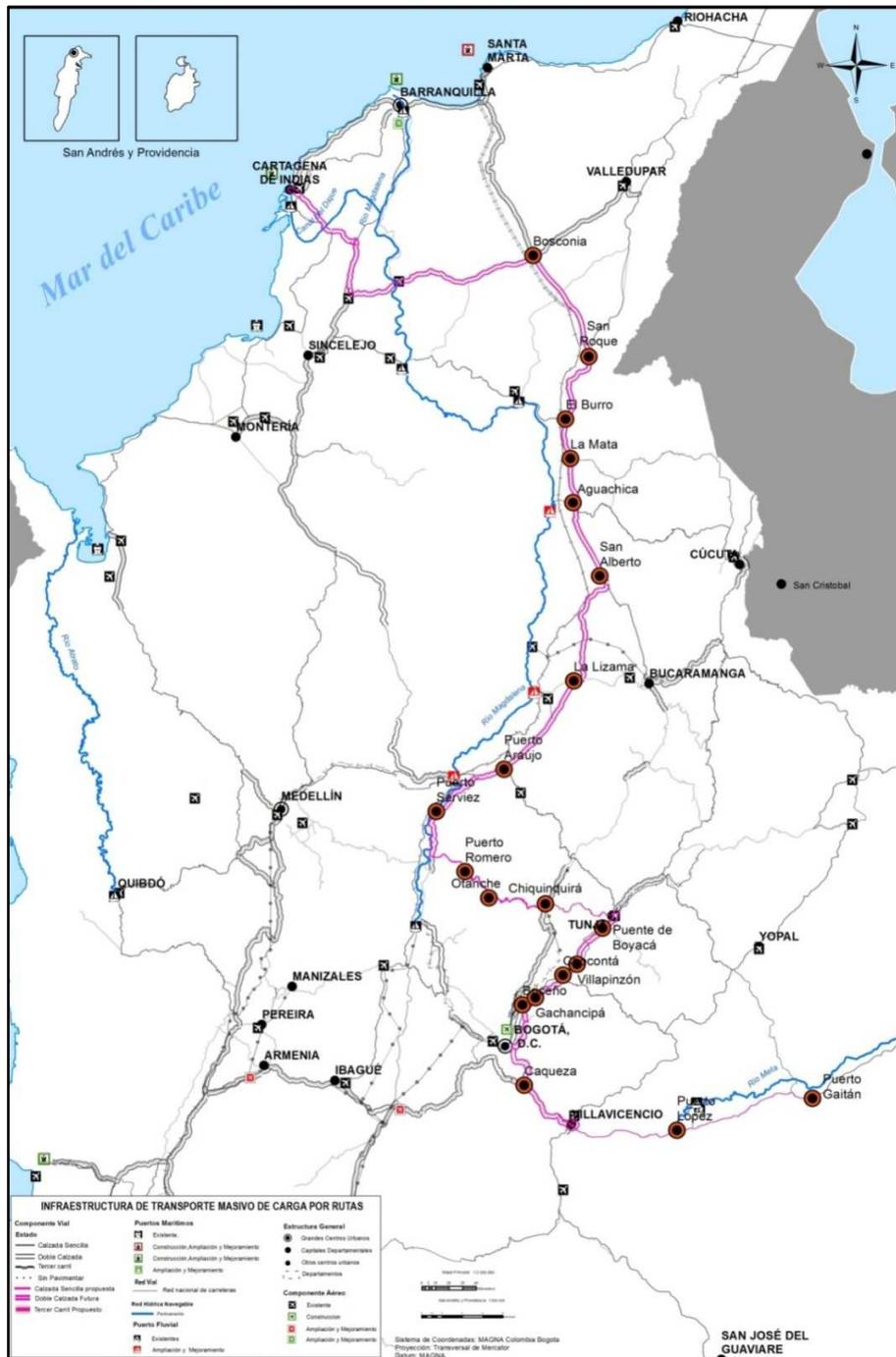


**Figura 6. Modo Carretero Corredor 3:**  
**Puerto Gaitán – Villavicencio – Cáqueza – Briceño – Tunja – Barbosa - Florida**  
**Blanca - San Alberto – Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia

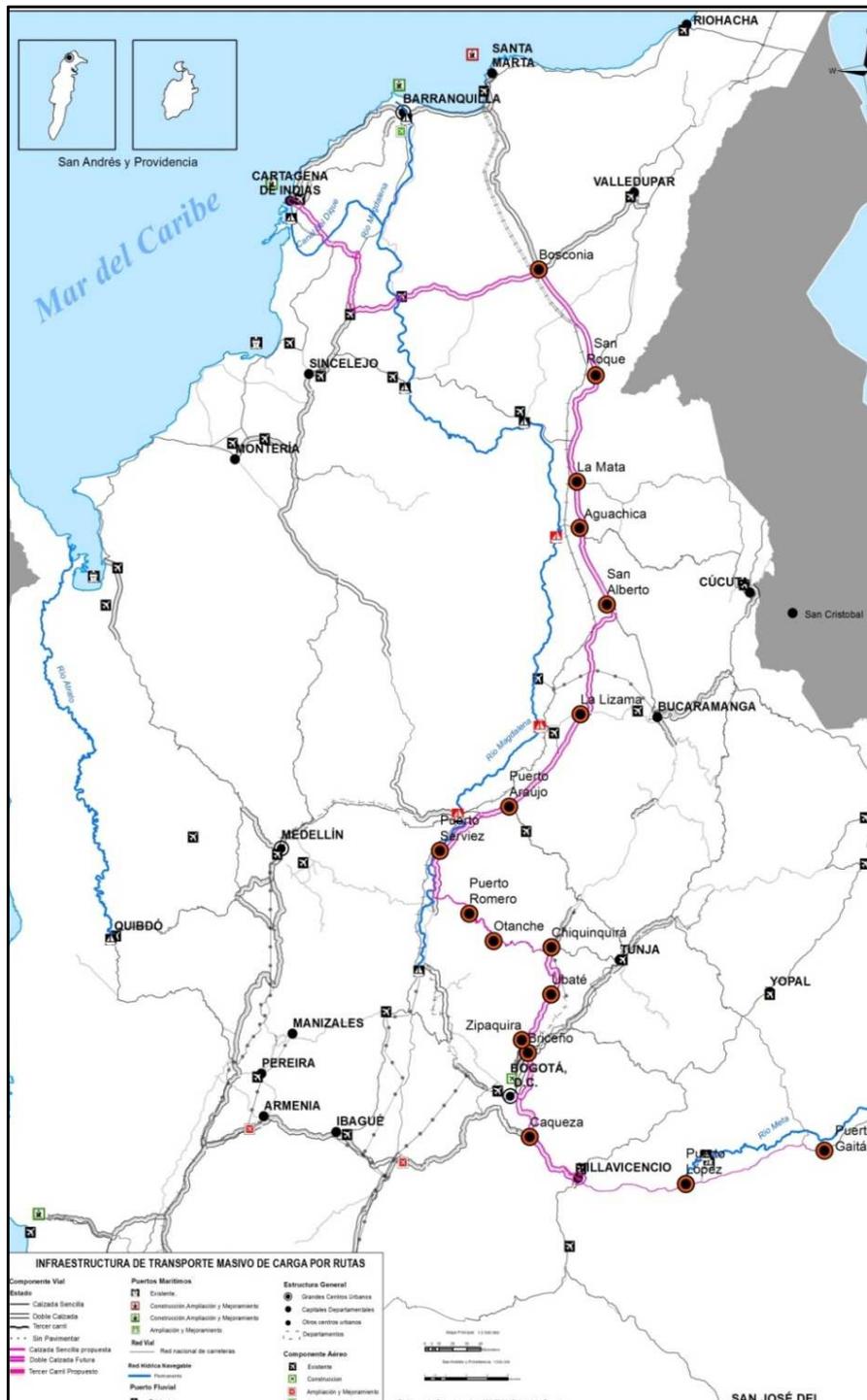


**Figura 7. Modo Carretero Corredor 4: Puerto Gaitán – Villavicencio – Briceño – Tunja – Barbosa – Bucaramanga - El Cero – Aguachica –Cartagena**

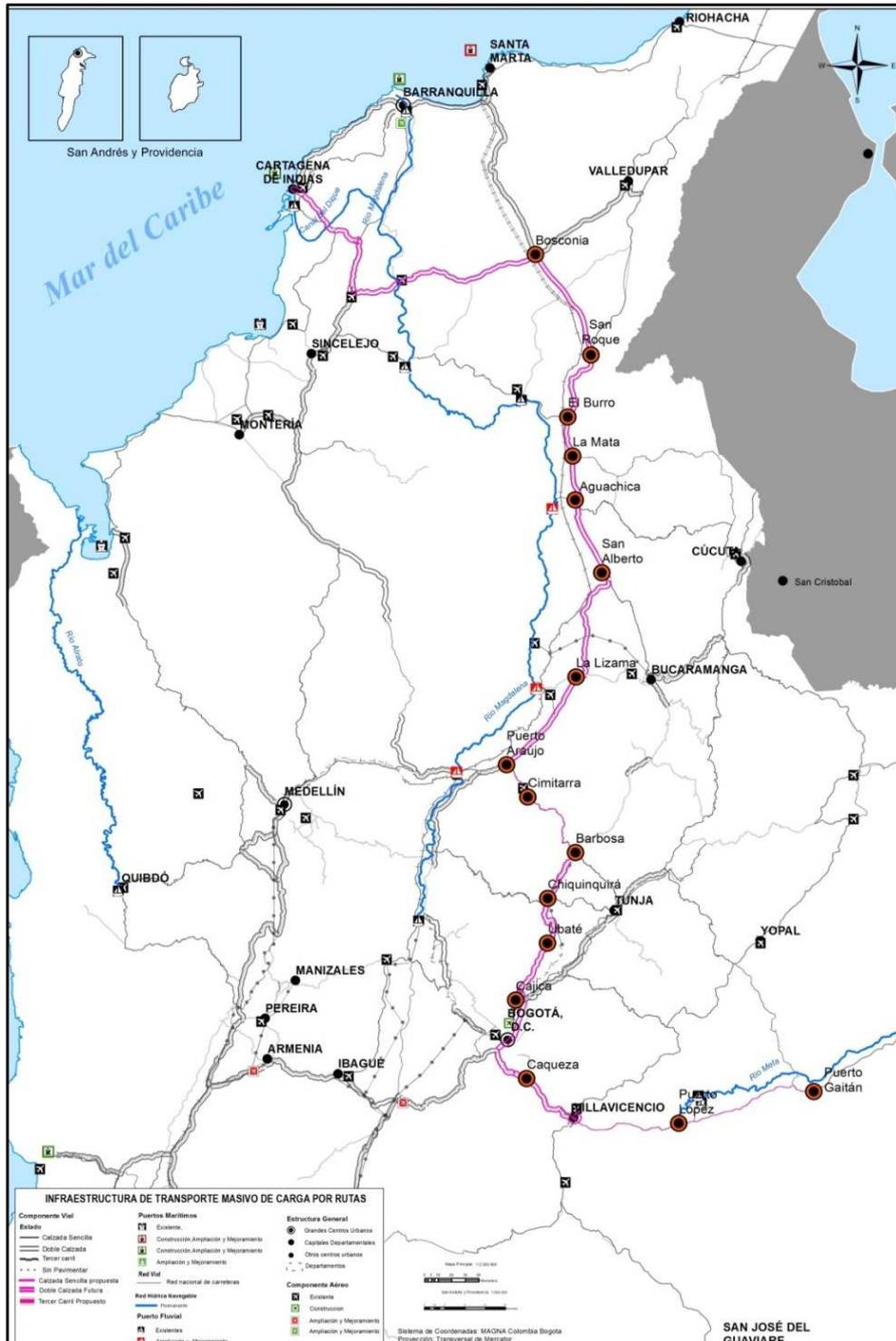
Fuente: Elaboración propia



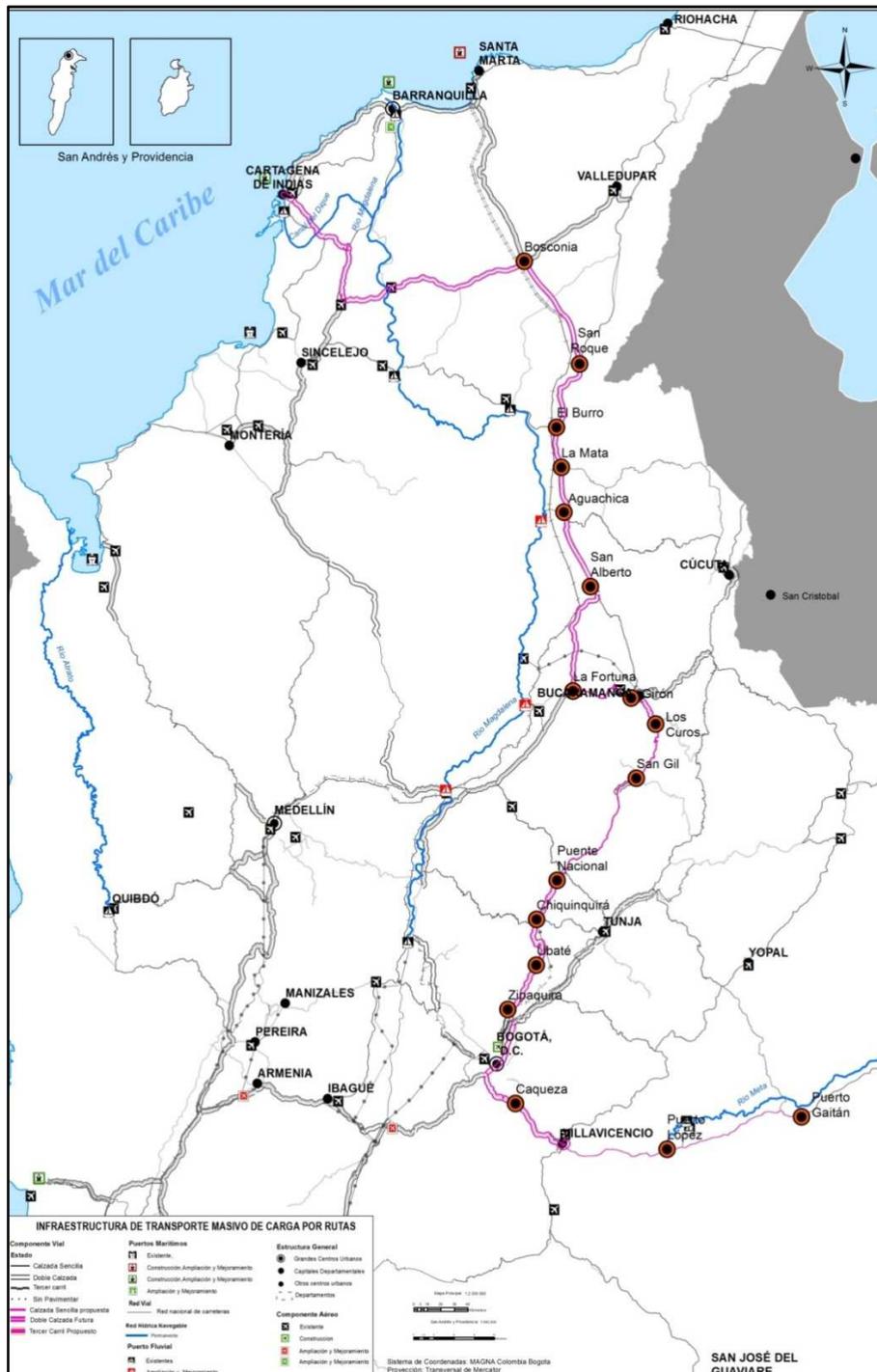
**Figura 8. Modo Carretero Corredor 5:**  
 Puerto Gaitán – Villavicencio - El Tablón – Cáqueza - Puente Boyacá – Tunja –  
 Chiquinquirá - Dos y Medio (Pto. Boyacá) - Puerto Araujo - San Alberto - Cartagena  
 Fuente: Elaboración propia



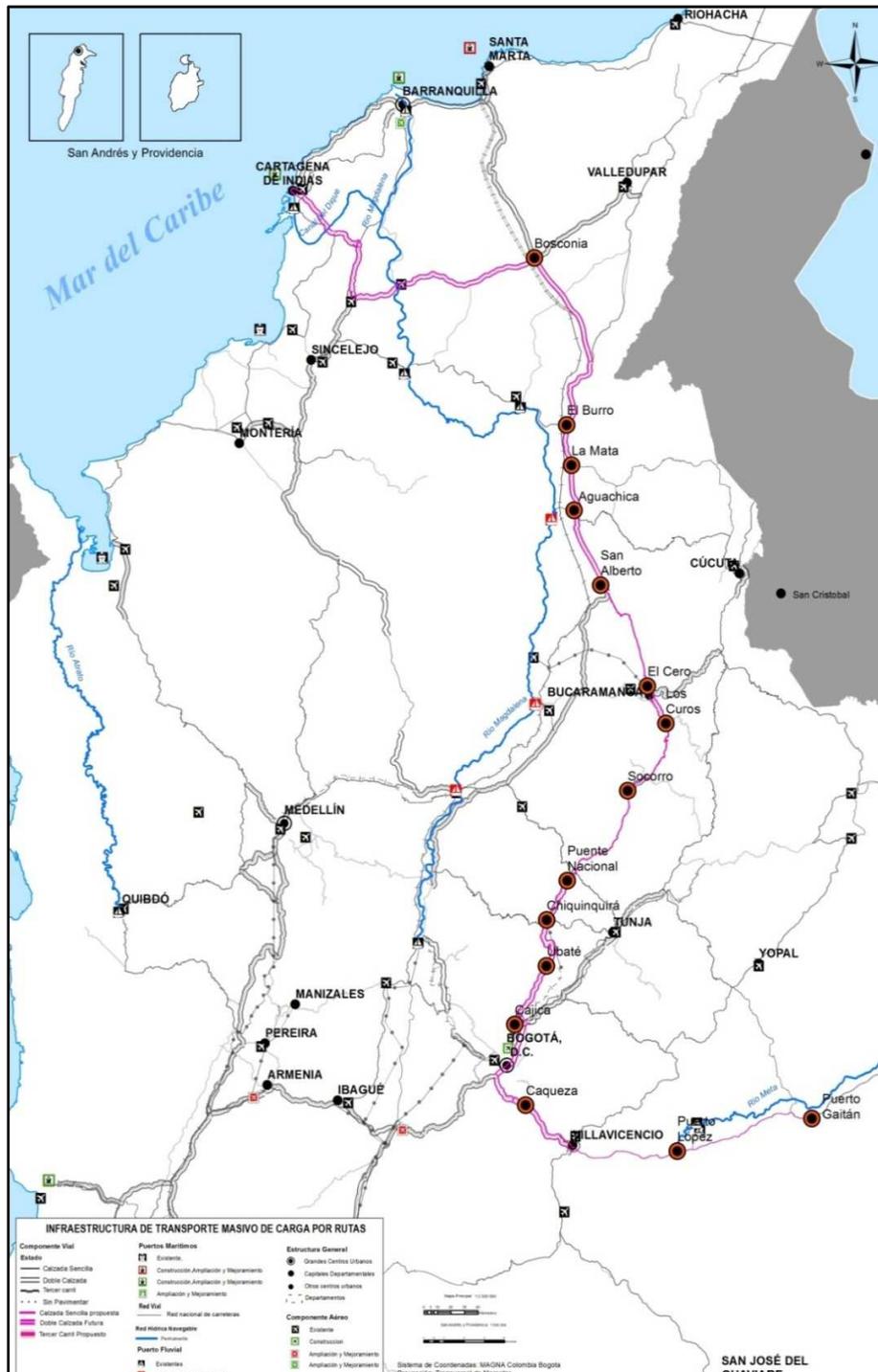
**Figura 9. Modo Carretero Corredor 6:**  
**Puerto Gaitán – Villavicencio – Cáqueza – Briceño – Zipaquirá - Puerto Servíz -**  
**Puerto Araujo - San Alberto - Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia



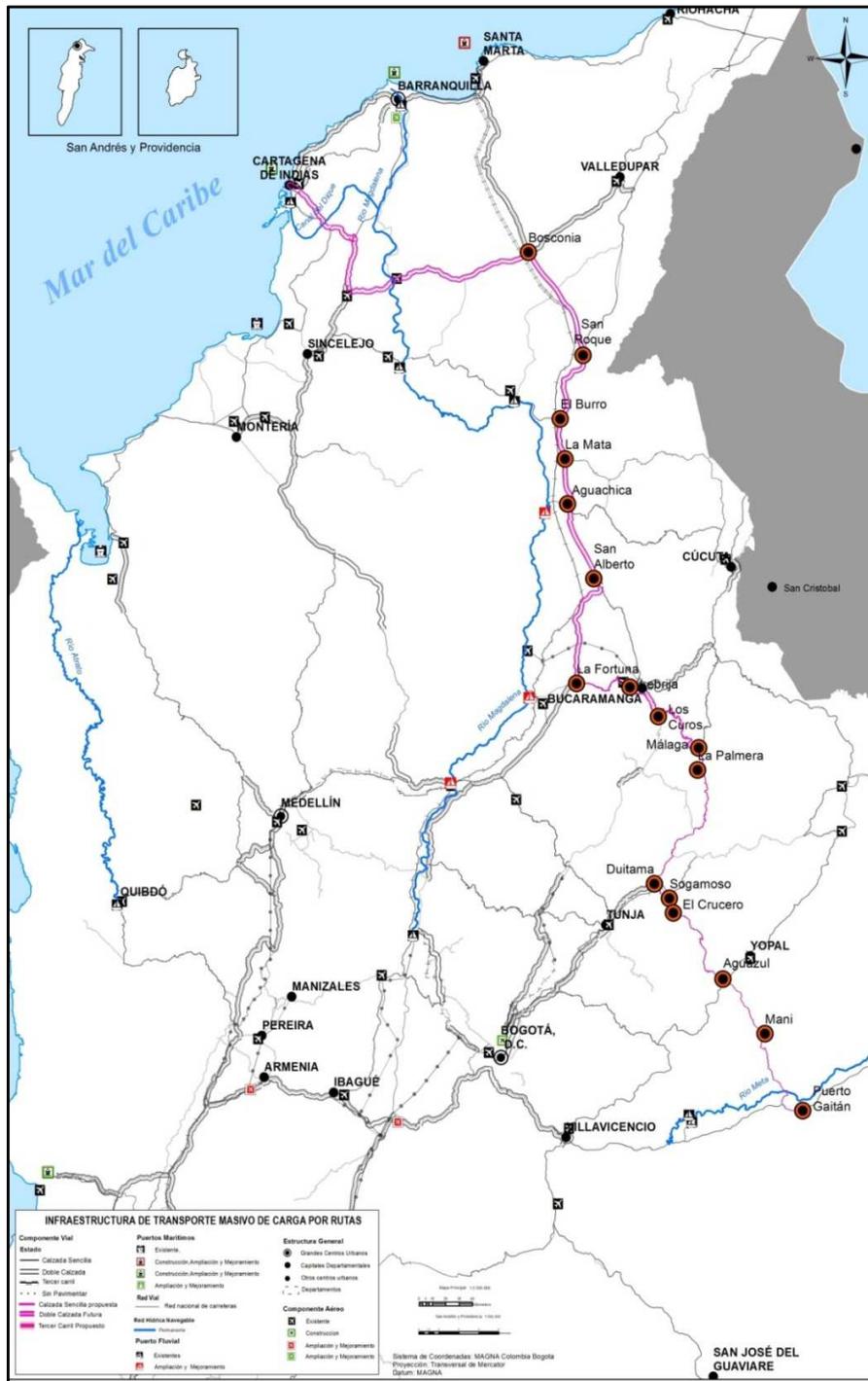
**Figura 10. Modo Carretero Corredor 7:**  
**Puerto Gaitán – Villavicencio – Bogotá - Zipaquirá – Chiquinquirá – Barbosa - Puerto Araujo - San Alberto - Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia



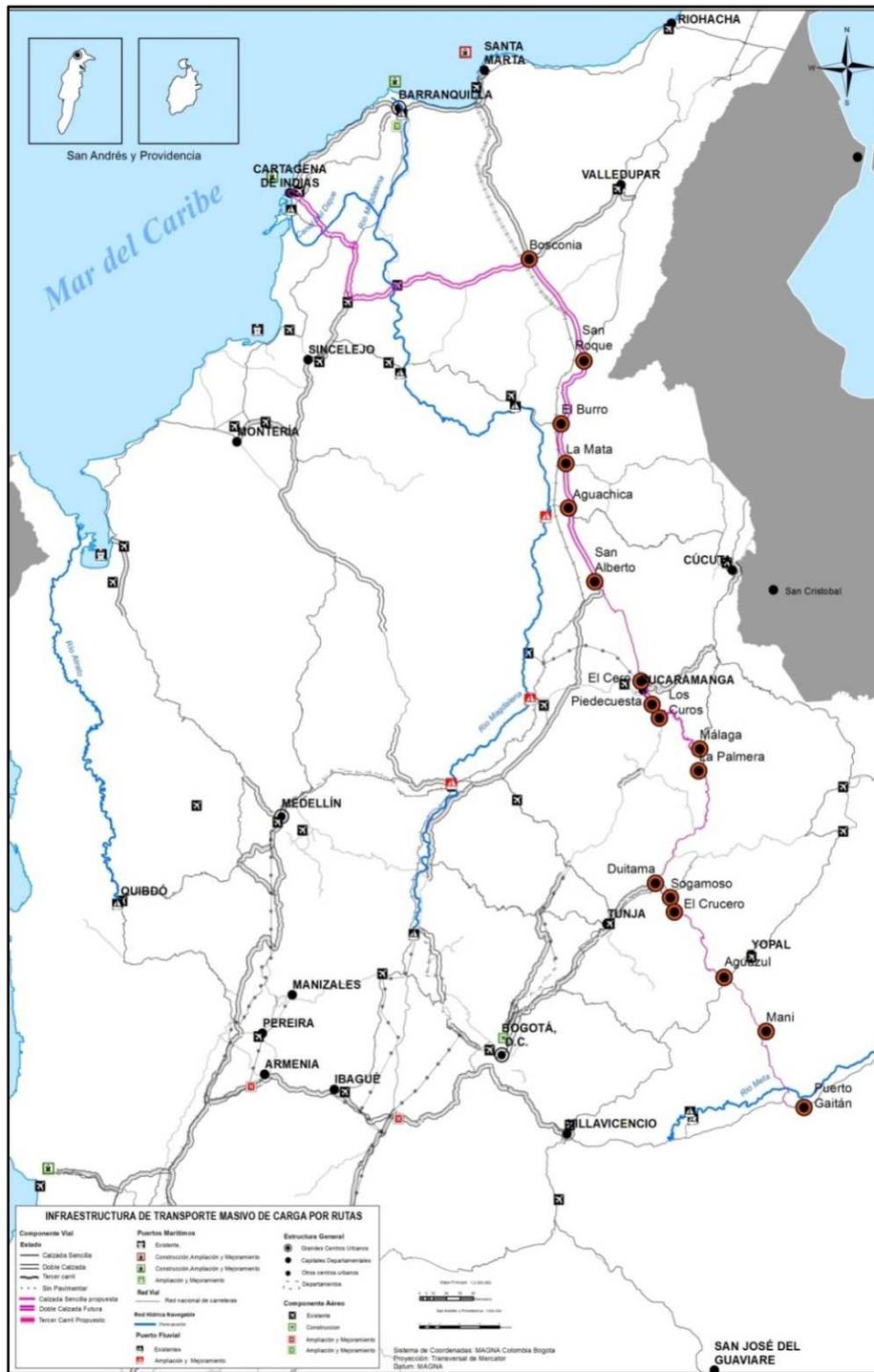
**Figura 11. Modo Carretero Corredor 8:**  
**Puerto Gaitán –Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá - San Gil - San**  
**Alberto – Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 12. Modo Carretero Corredor 9:**  
**Puerto Gaitán – Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá – Bucaramanga –**  
**El Cero - San Alberto - Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia

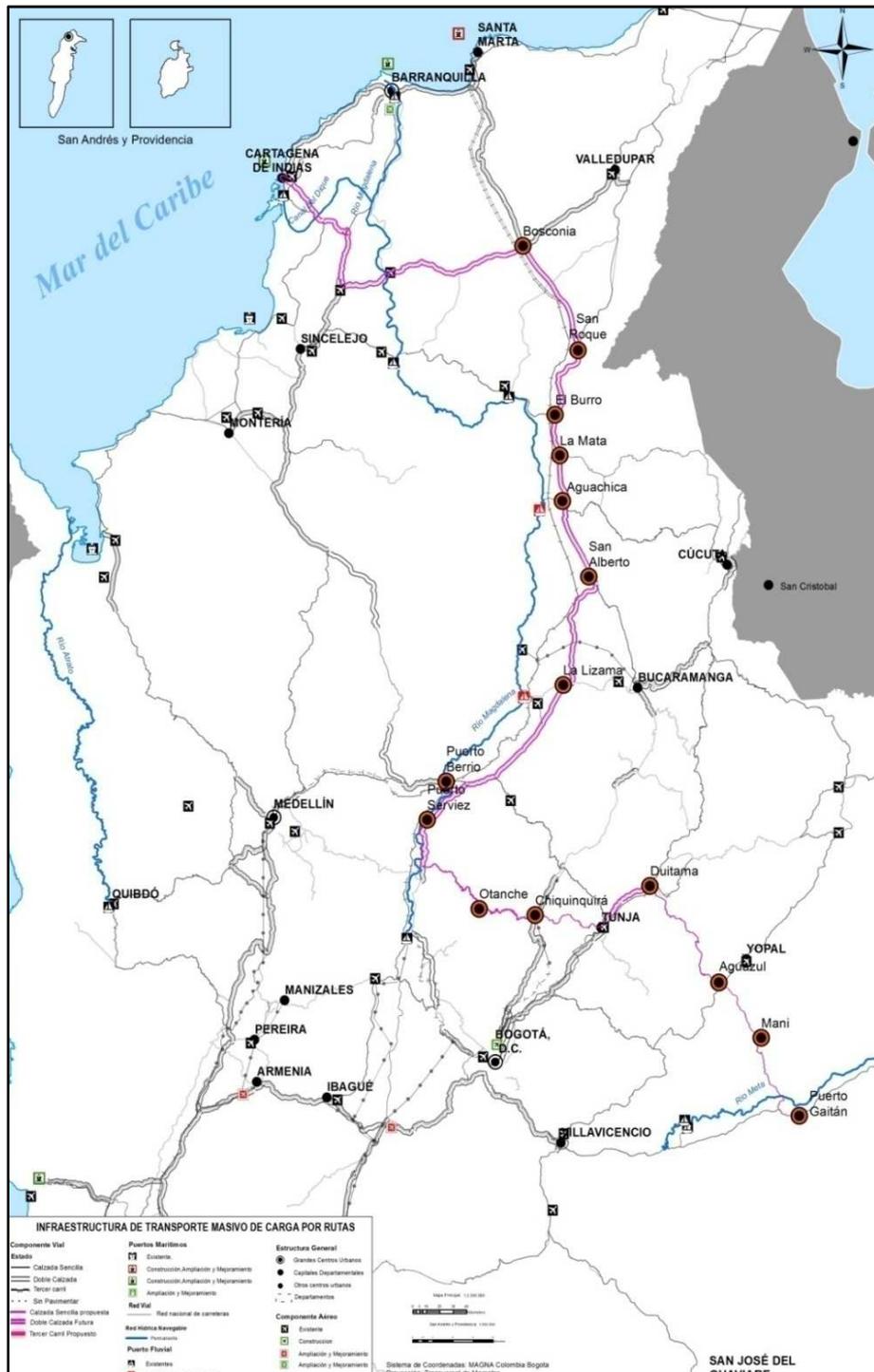


**Figura 13. Modo Carretero Corredor 10:**  
**Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Malaga – Floridablanca - La Fortuna - San**  
**Alberto–Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia

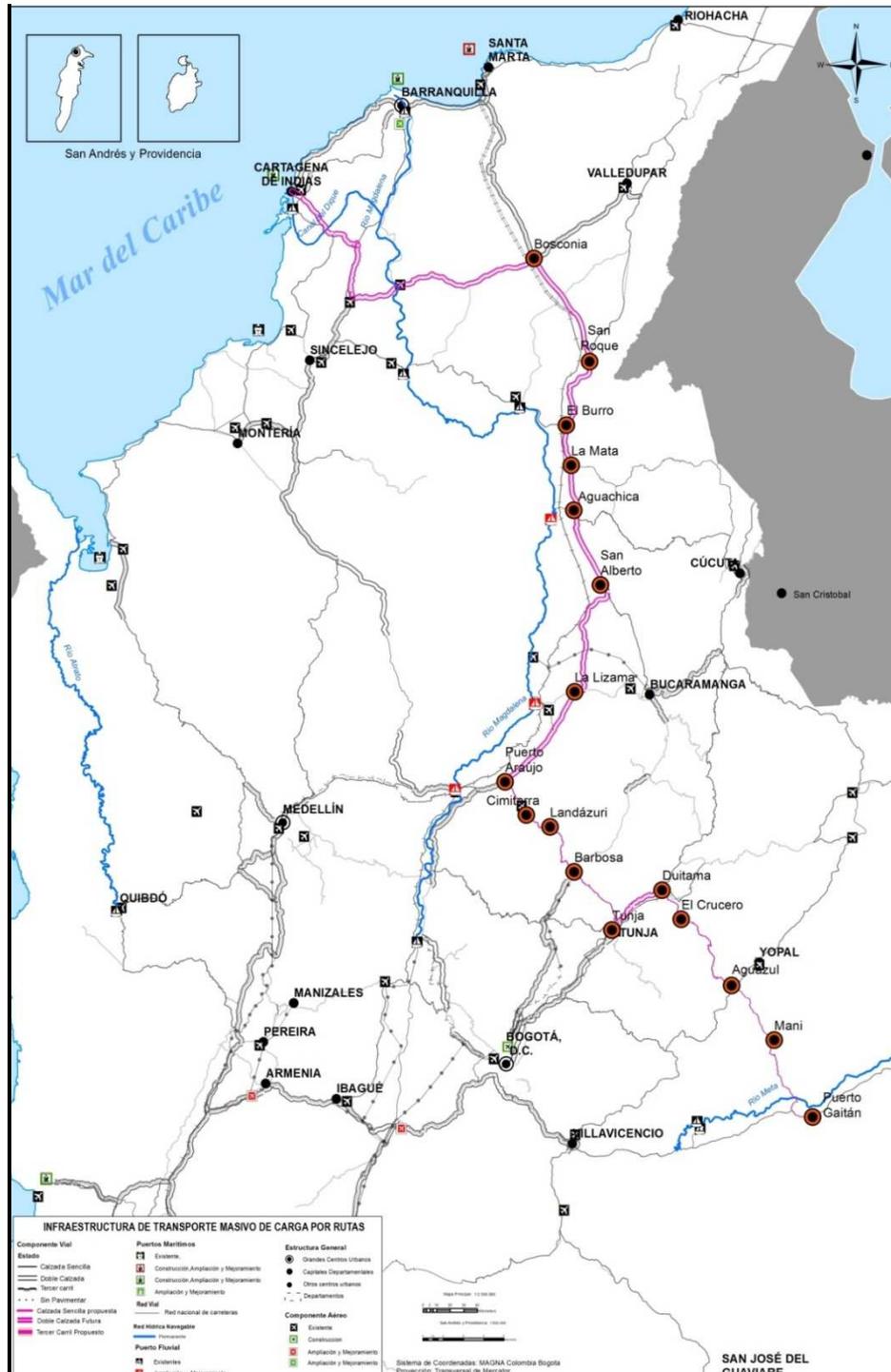


**Figura 14. Modo Carretero Corredor 11:**  
**Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Málaga – Bucaramanga - San Alberto -**  
**Cartagena**

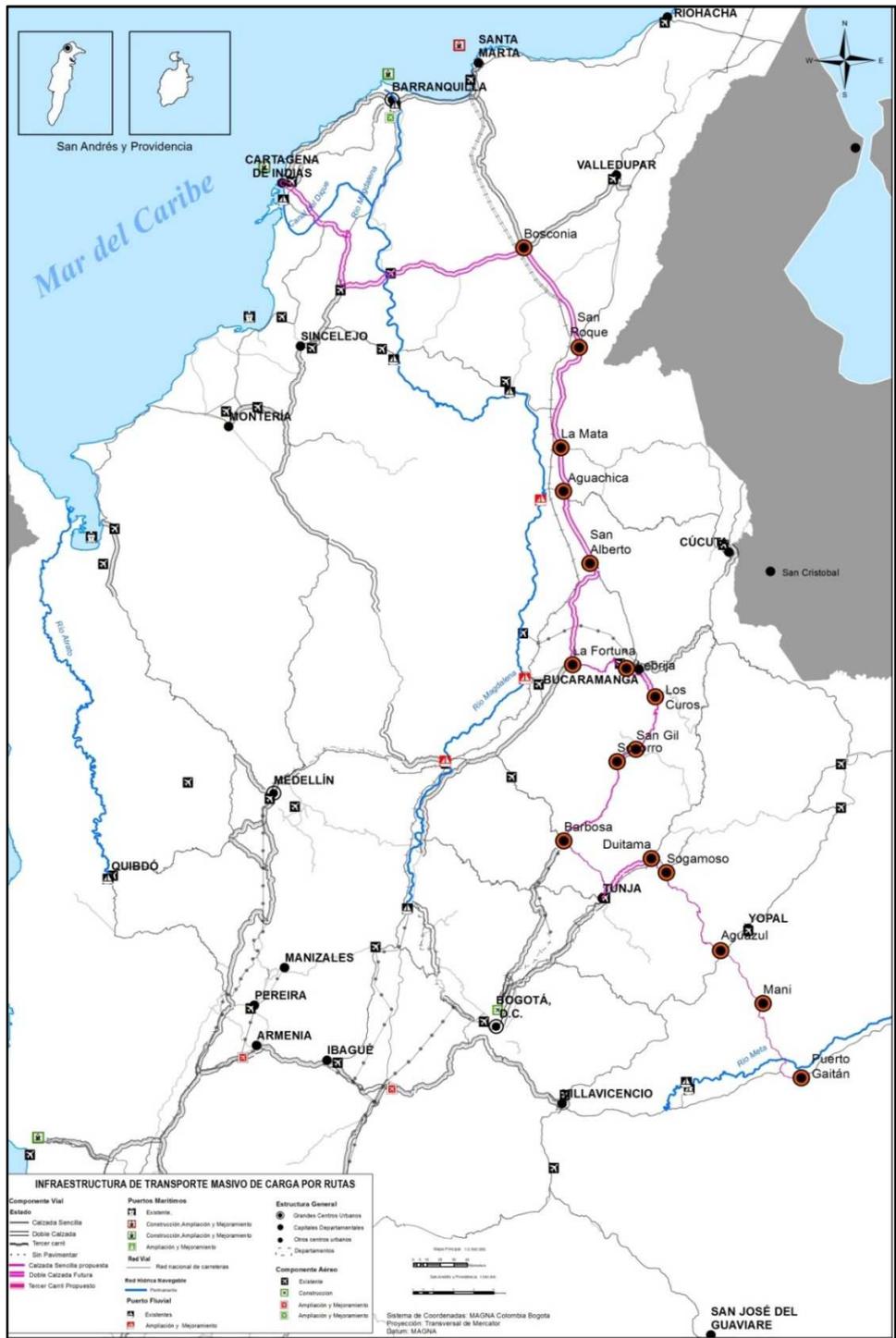
Fuente: Elaboración propia



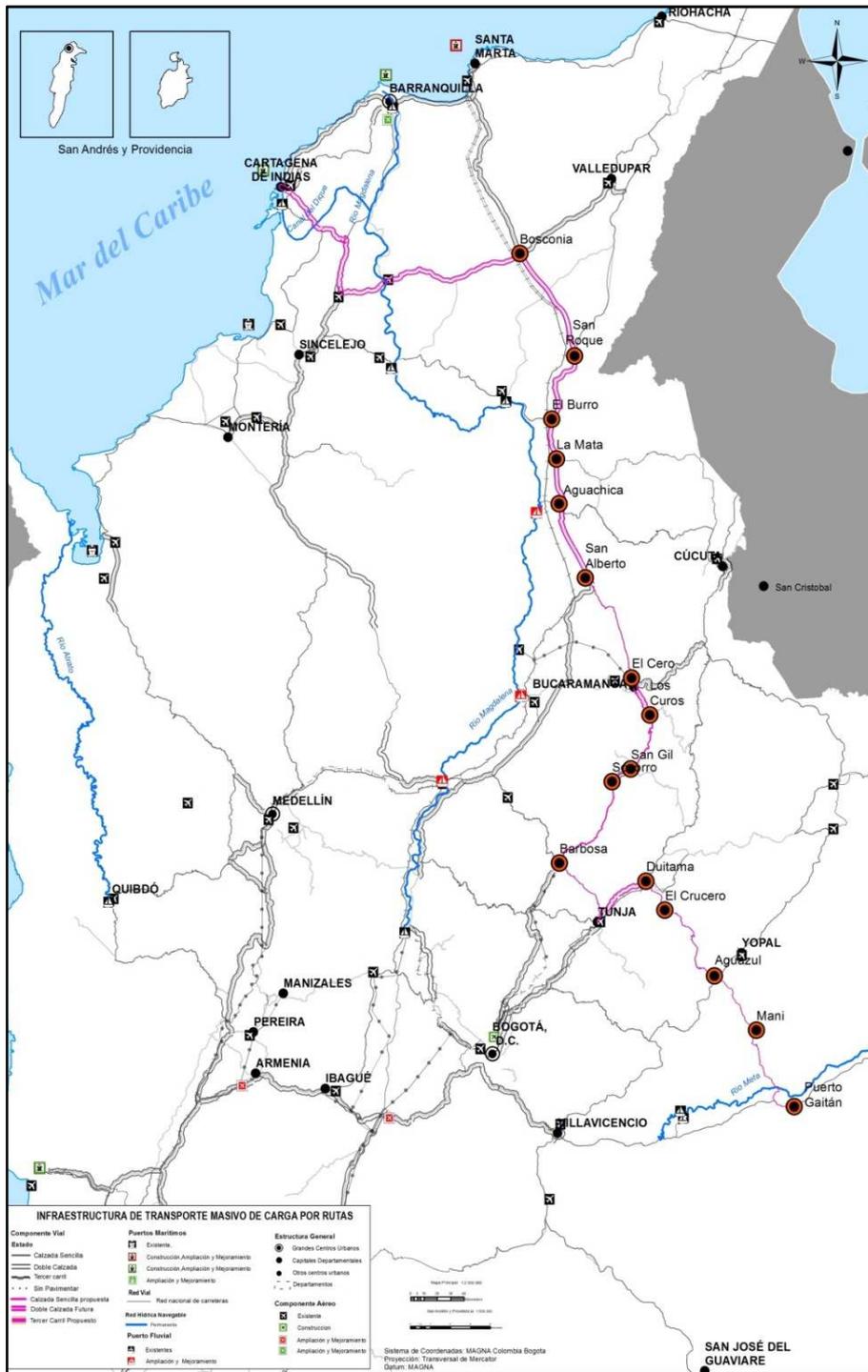
**Figura 15. Modo Carretero Corredor 12:**  
 Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – Chiquinquirá - Pto. Serviez - Puerto Araujo - La Fortuna - Cartagena  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 16. Modo Carretero Corredor 13:**  
**Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – Barbosa - Puerto Araujo - Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 17. Modo Carretero Corredor 14:**  
**Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Duitama – Tunja – Barbosa – Floridablanca -**  
**San Alberto – Aguachica - Cartagena**  
 Fuente: Elaboración propia



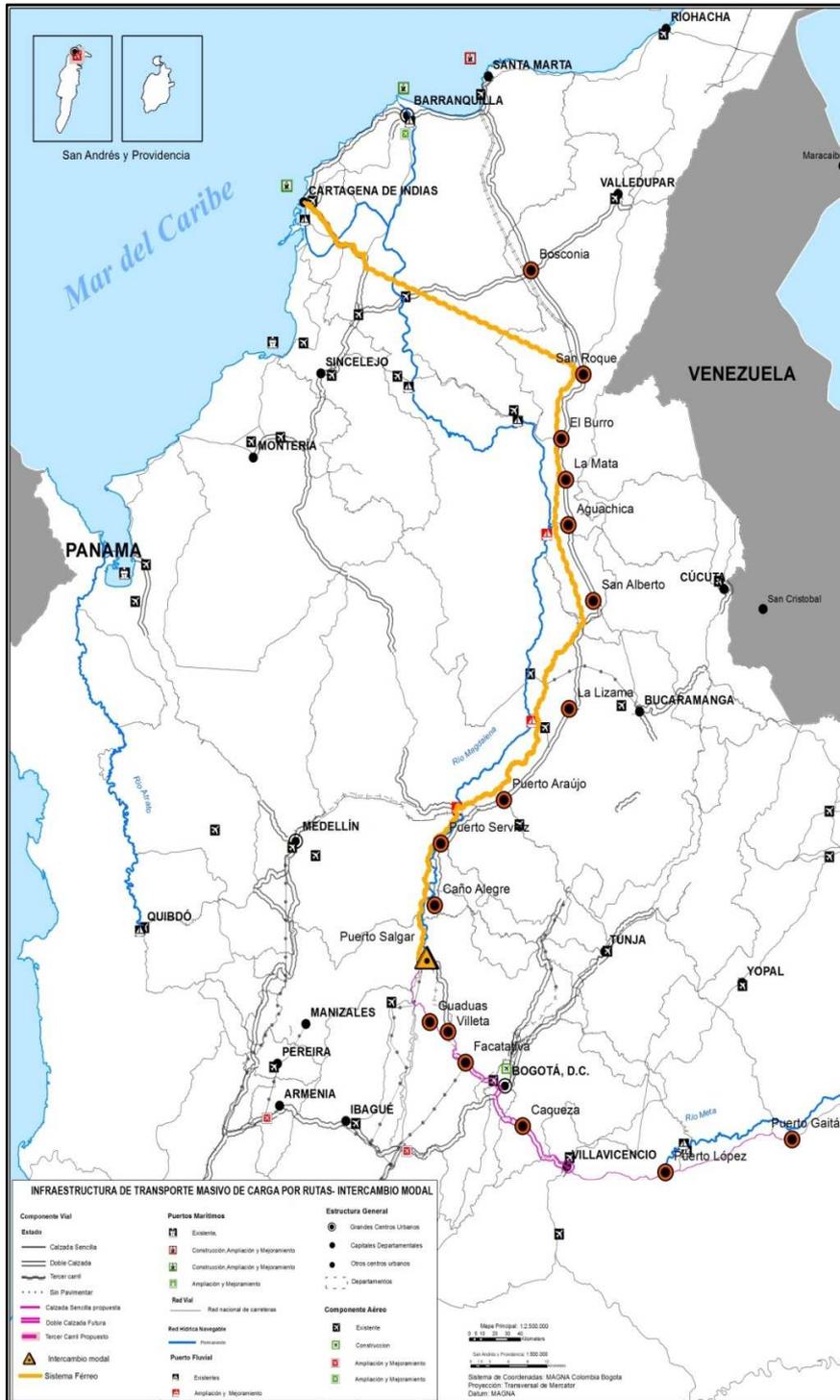
**Figura 18. Modo Carretero Corredor 15:**  
**Puerto Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – Bucaramanga - San Alberto -**  
**Cartagena**

Fuente: Elaboración propia

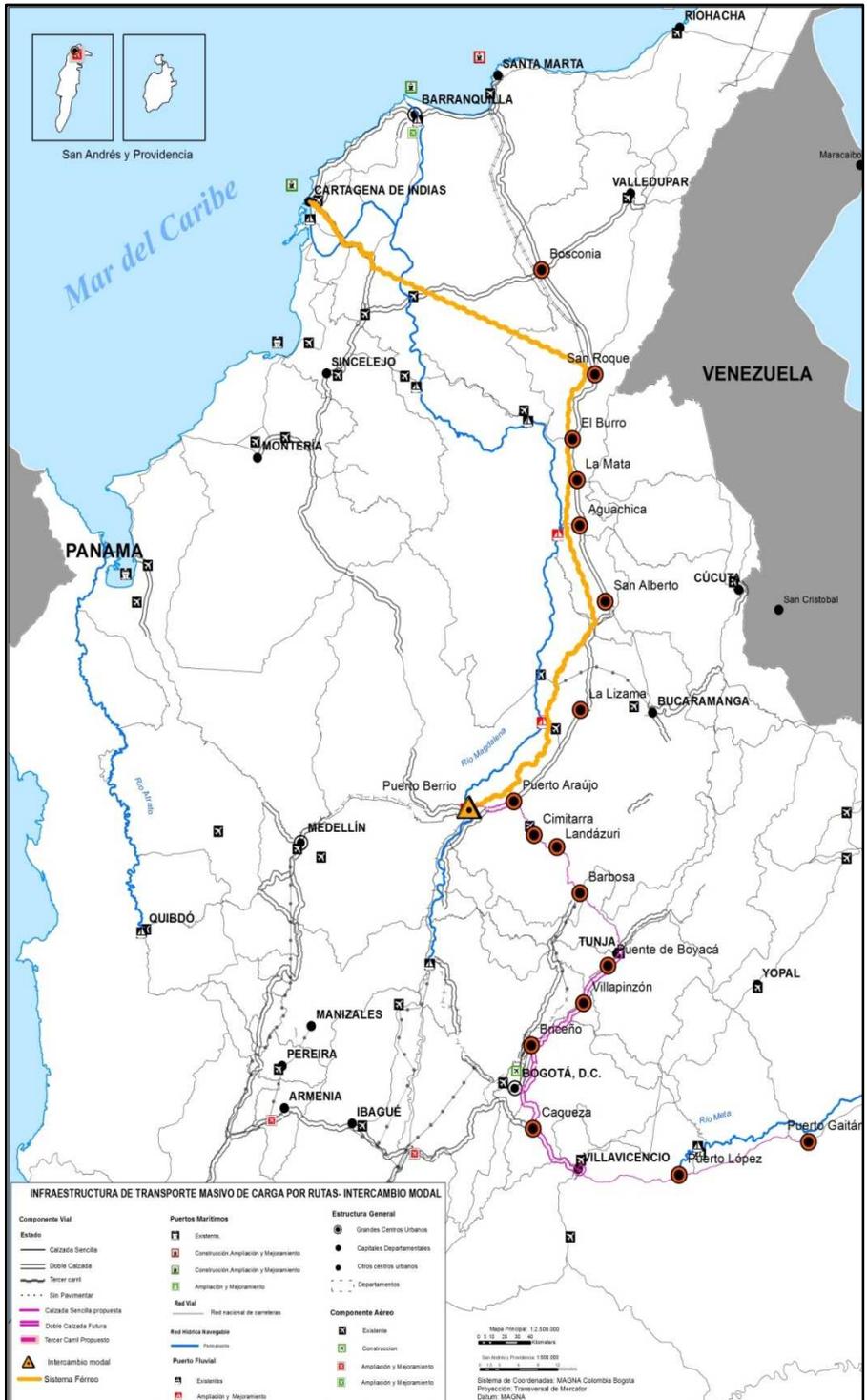
**Tabla 7. Corredores Intermodales (Carretero – Férreo)**

<b>Corredor</b>	<b>Recorrido Modo Carretero 1</b>	<b>Recorrido Modo Férreo</b>	<b>Recorrido Modo Carretero 2</b>
1	Pto. Gaitán - Villavicencio- - Bogotá - Villeta- Puerto Salgar	Puerto salgar-Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
2	Pto. Gaitán -Villaviencio- Briceño- Tunja - Barbosa - Pto. Araujo-Pto.Berrio	Puerto Berrio -Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
3	Pto. Gaitán - Villavicencio-Bogotá	Bogotá -Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
4	Pto Gaitán - Villavicencio - Briceño - Pte Boyacá - Chiquinquirá - Puerto Boyacá	Puerto Boyacá- Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
5	Pto. Gaitán - Villavicencio - Briceño - Ubate - Chiquinquirá - Barbosa- Cimitarra-Puerto Araujo-Puerto Berrio.	Puerto Berrio -Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
6	Pto Gaitán-Villavicencio-Briceño-Ubate-Chiquinquirá-Puerto Boyacá	Puerto Boyacá- Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
7	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Pto. Berrio.	Puerto Berrio -Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
8	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo -La Lizama-la fortuna-san Alberto-Pto. Capulco.	Puerto Capulco - Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
9	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - La Lizama-Barrancabermeja	Barranca -Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
10	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja	Tunja -Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria
11	Pto. Gaitán -Aguazul- Crucero- Duitama-Tunja --Chiquinquirá- Puerto Boyacá	Puerto Boyacá- Puerto seco	Puerto seco –zona portuaria

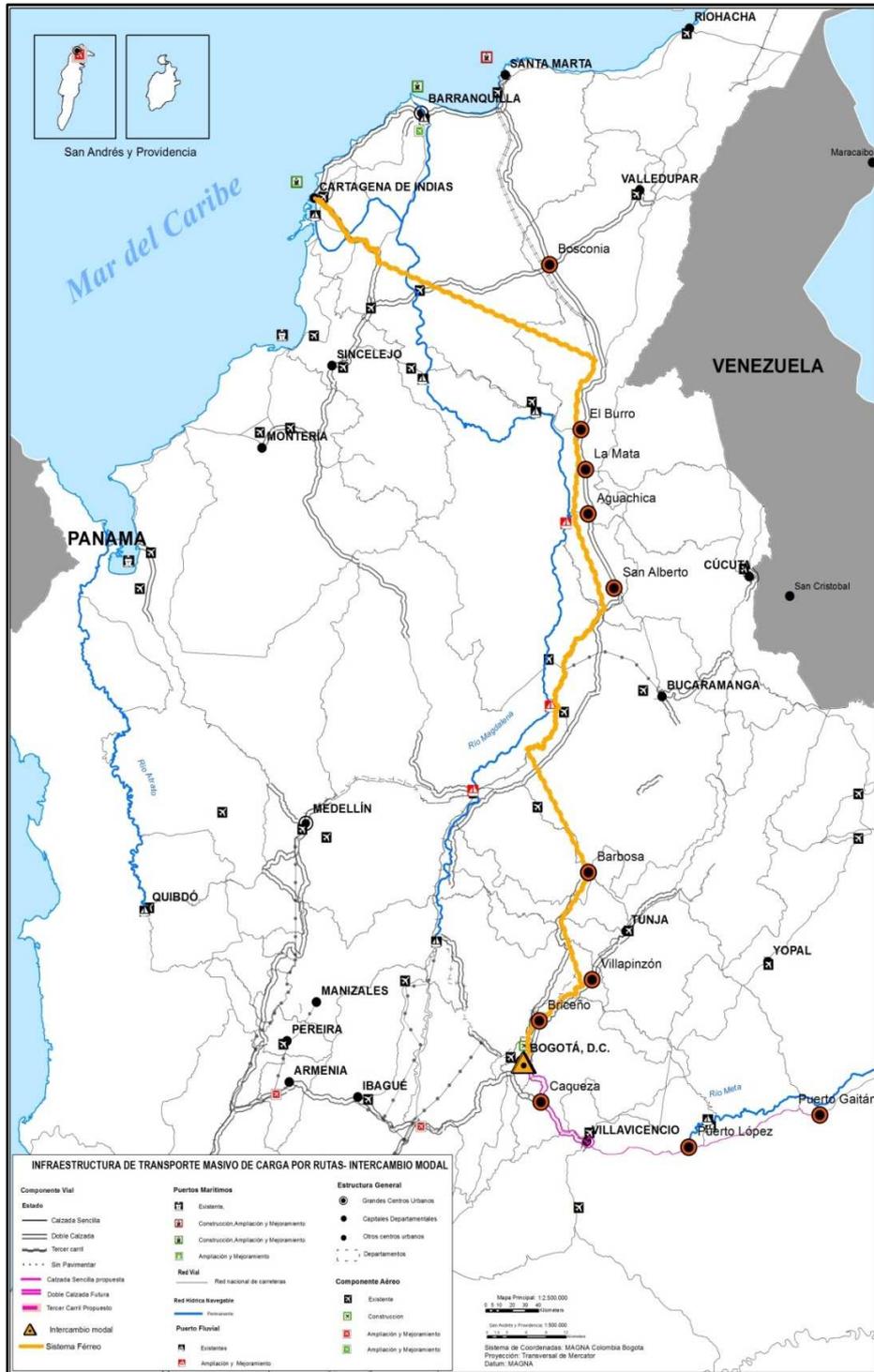
Fuente: Elaboración propia



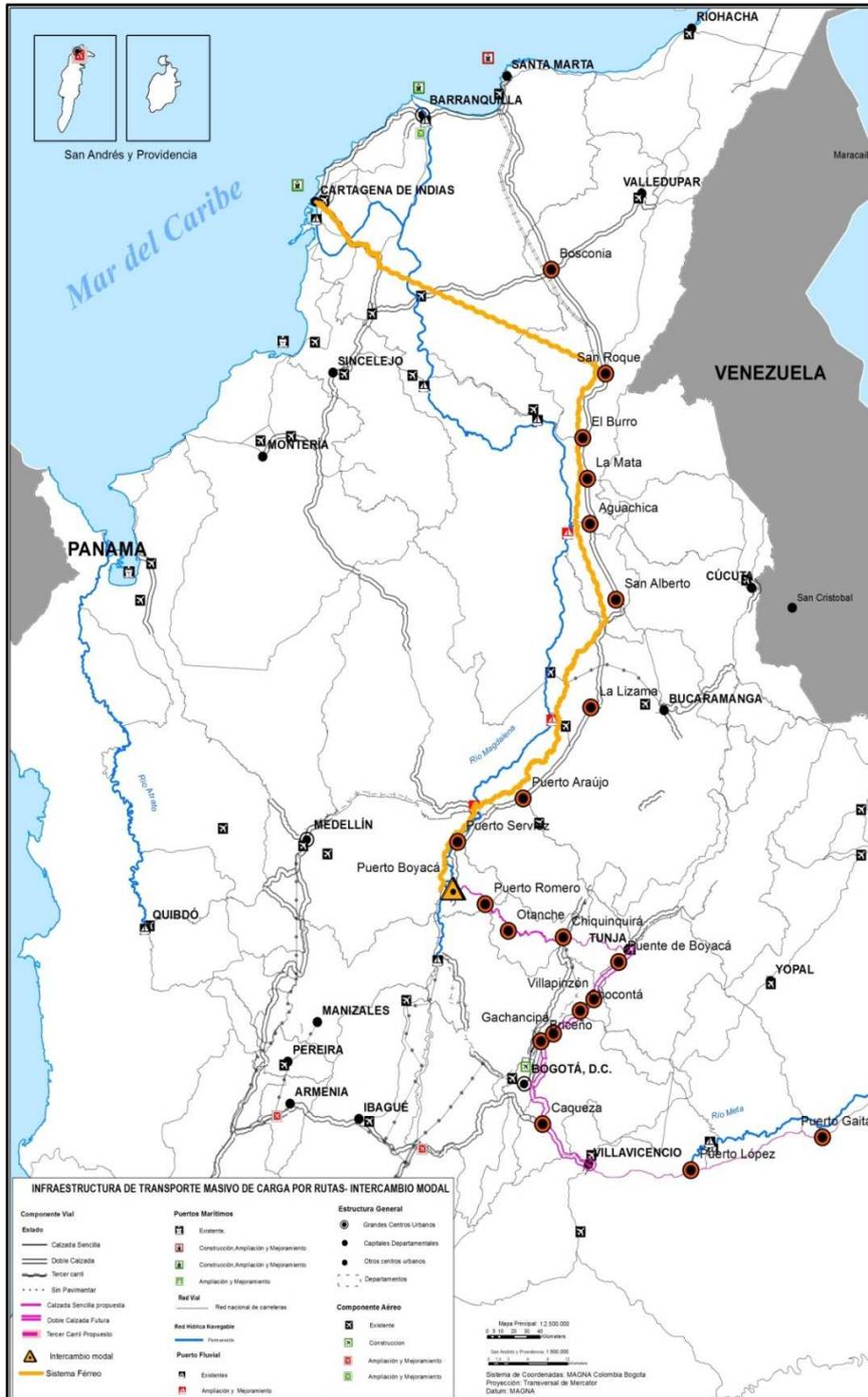
**Figura 19. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 1**  
 Fuente: Elaboración propia



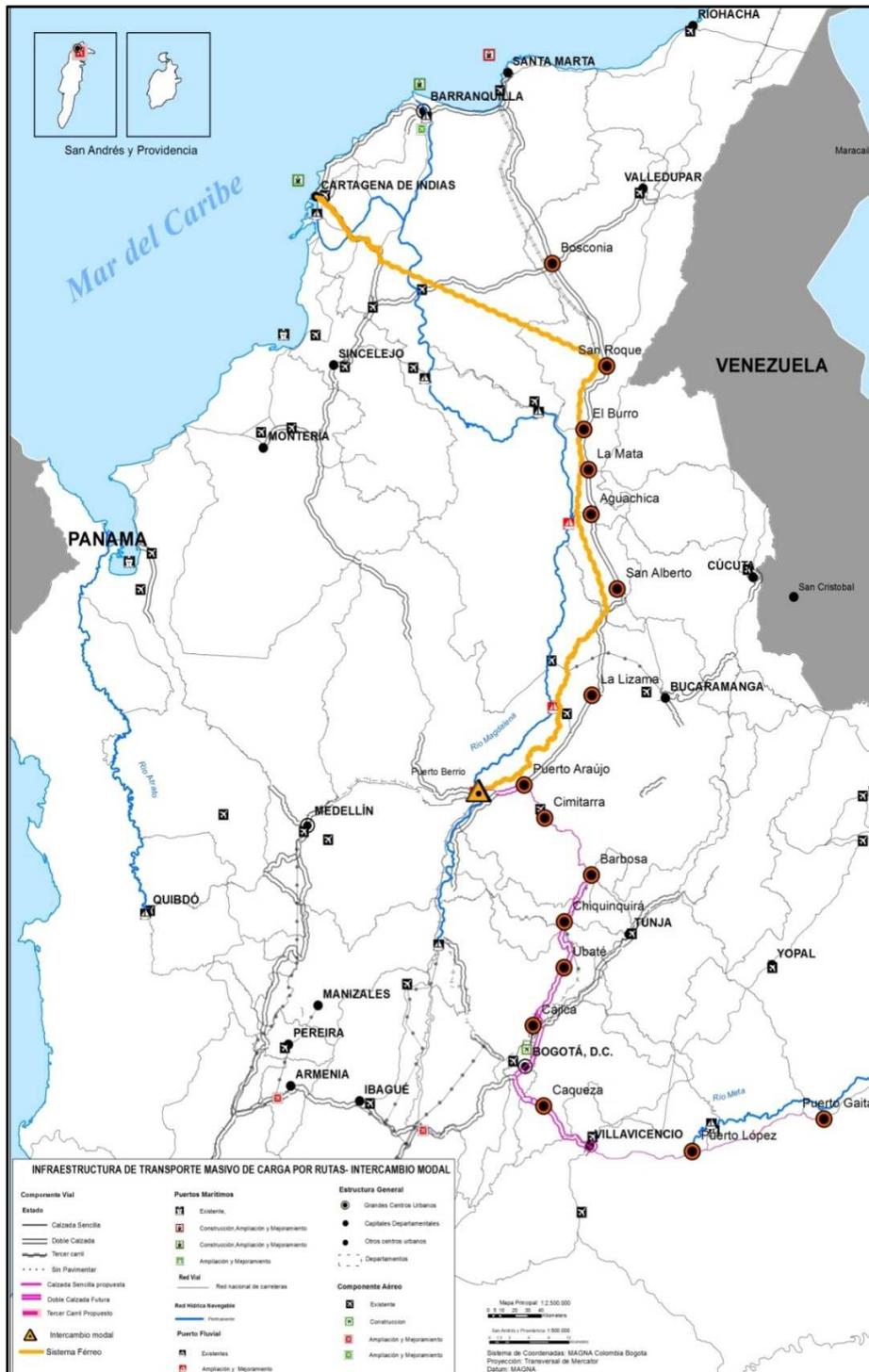
**Figura 20. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 2**  
 Fuente: Elaboración propia



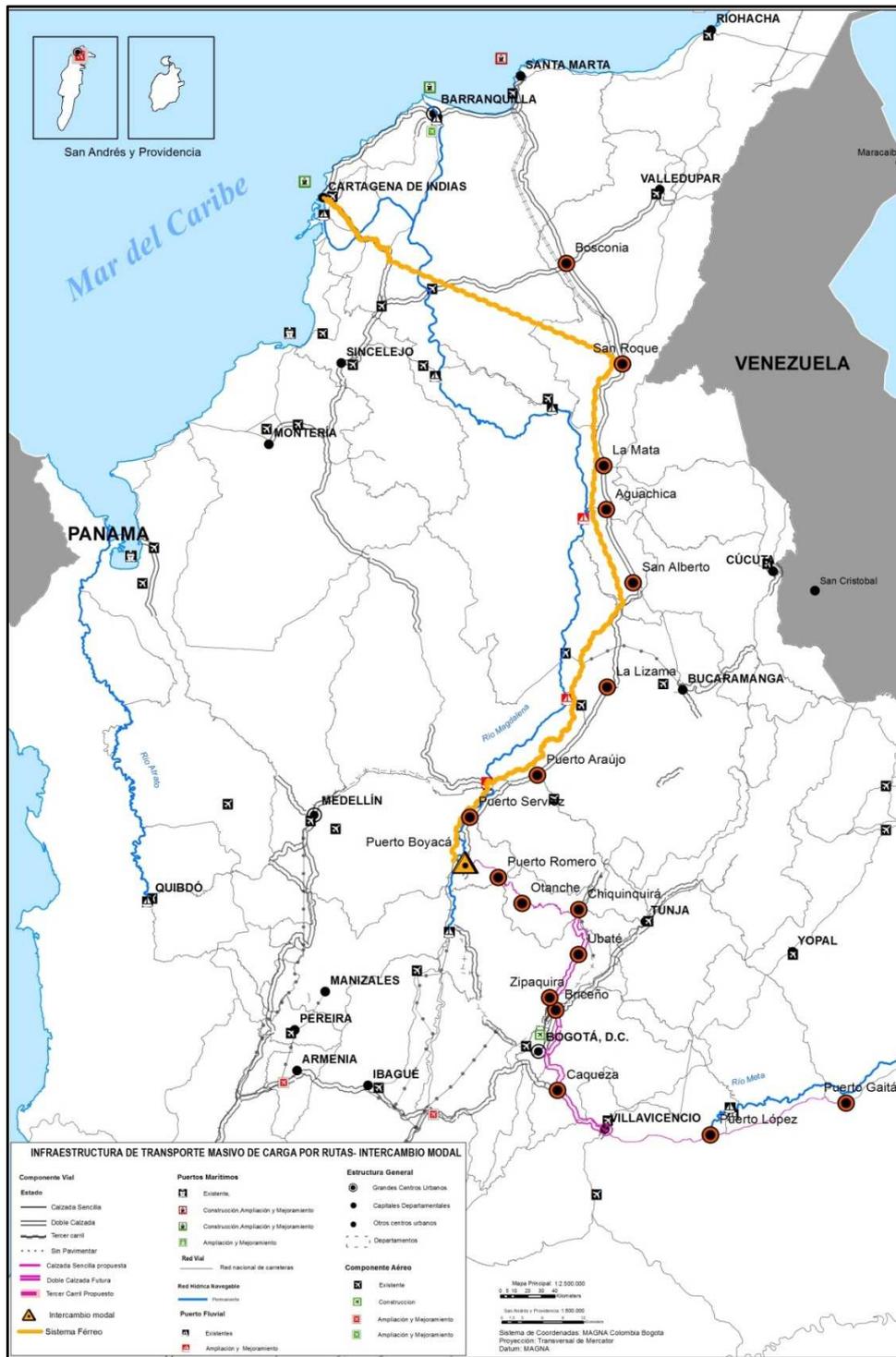
**Figura 21. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 3**  
 Fuente: Elaboración propia



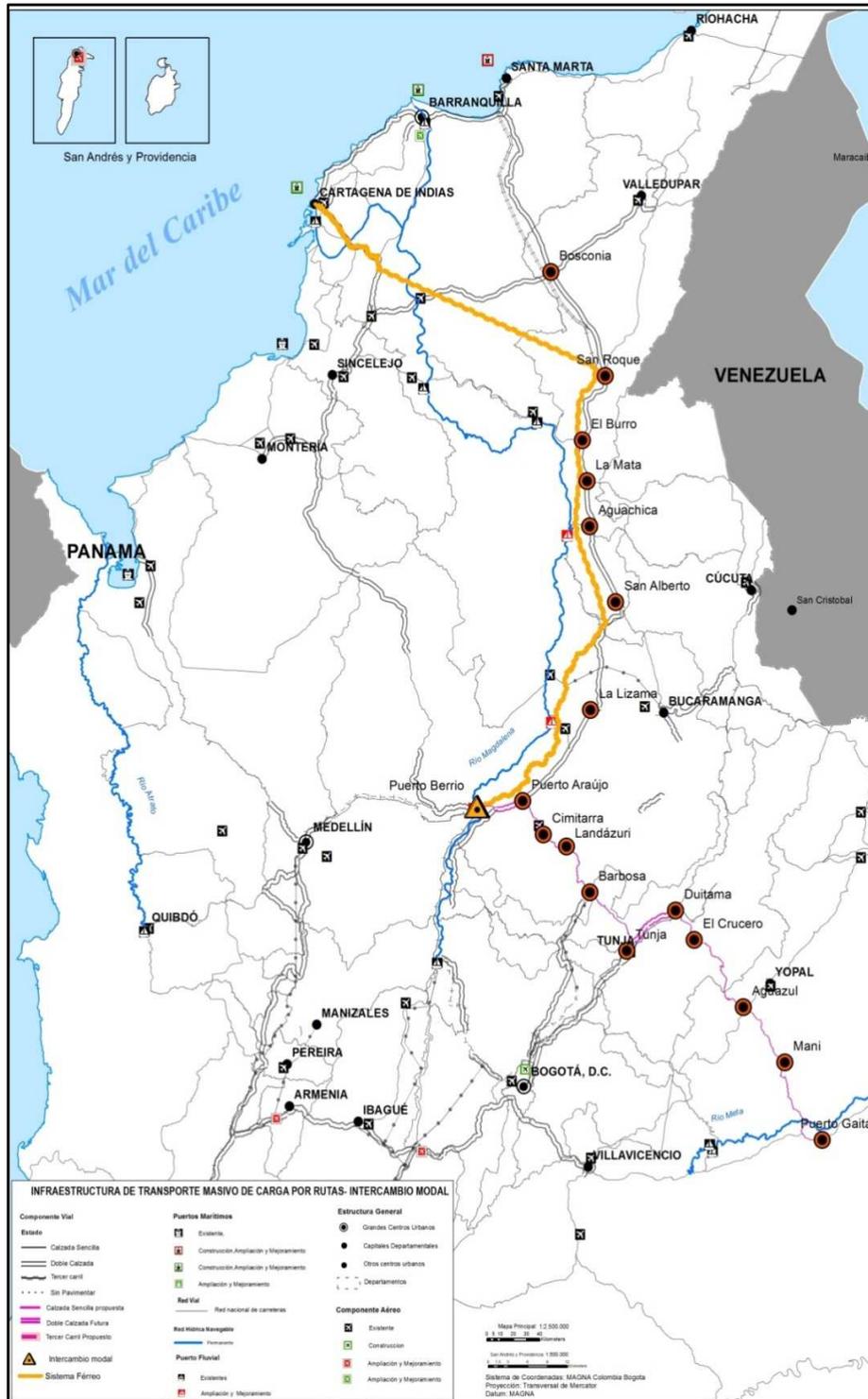
**Figura 22. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 4**  
 Fuente: Elaboración propia



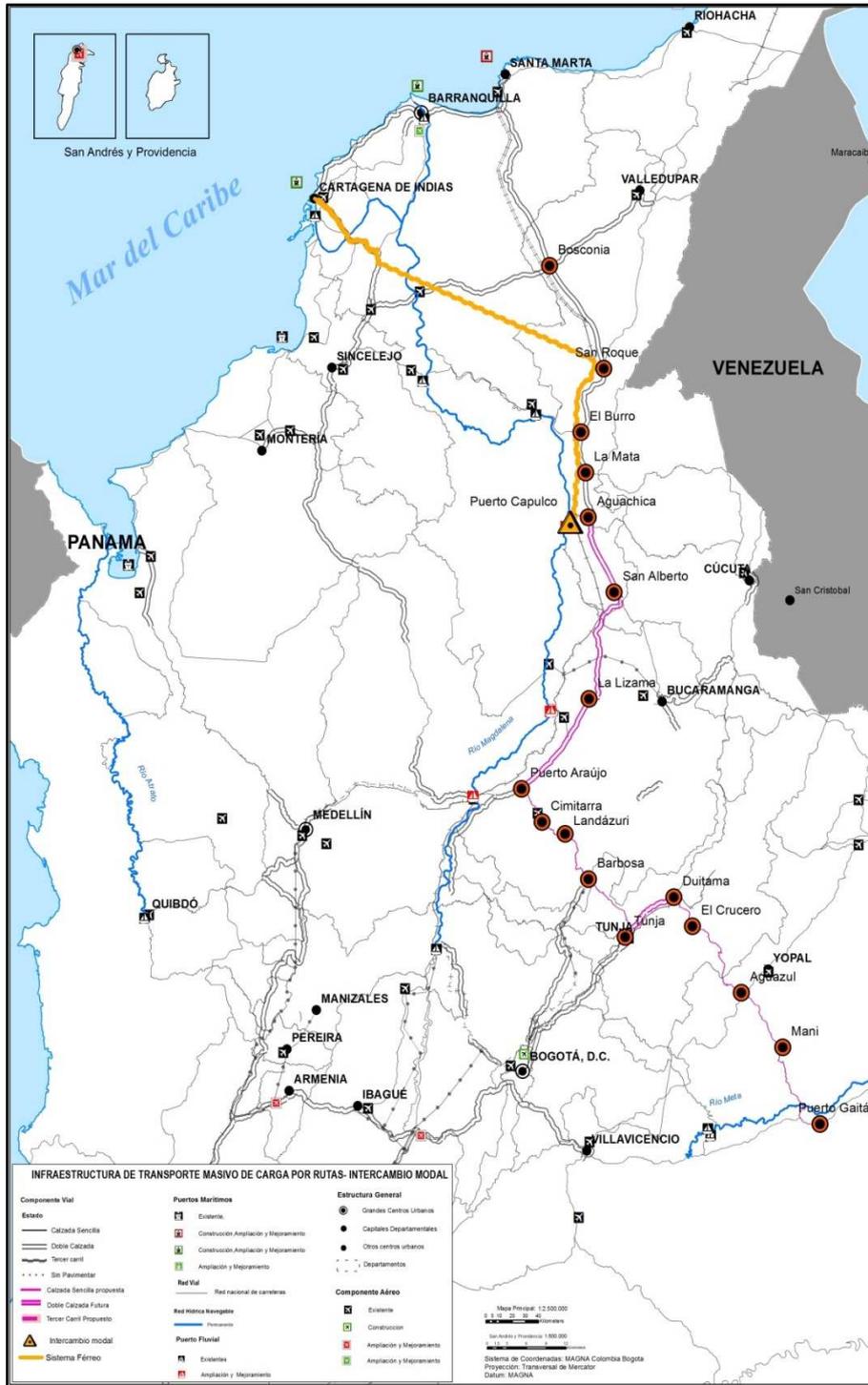
**Figura 23. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 5**  
 Fuente: Elaboración propia



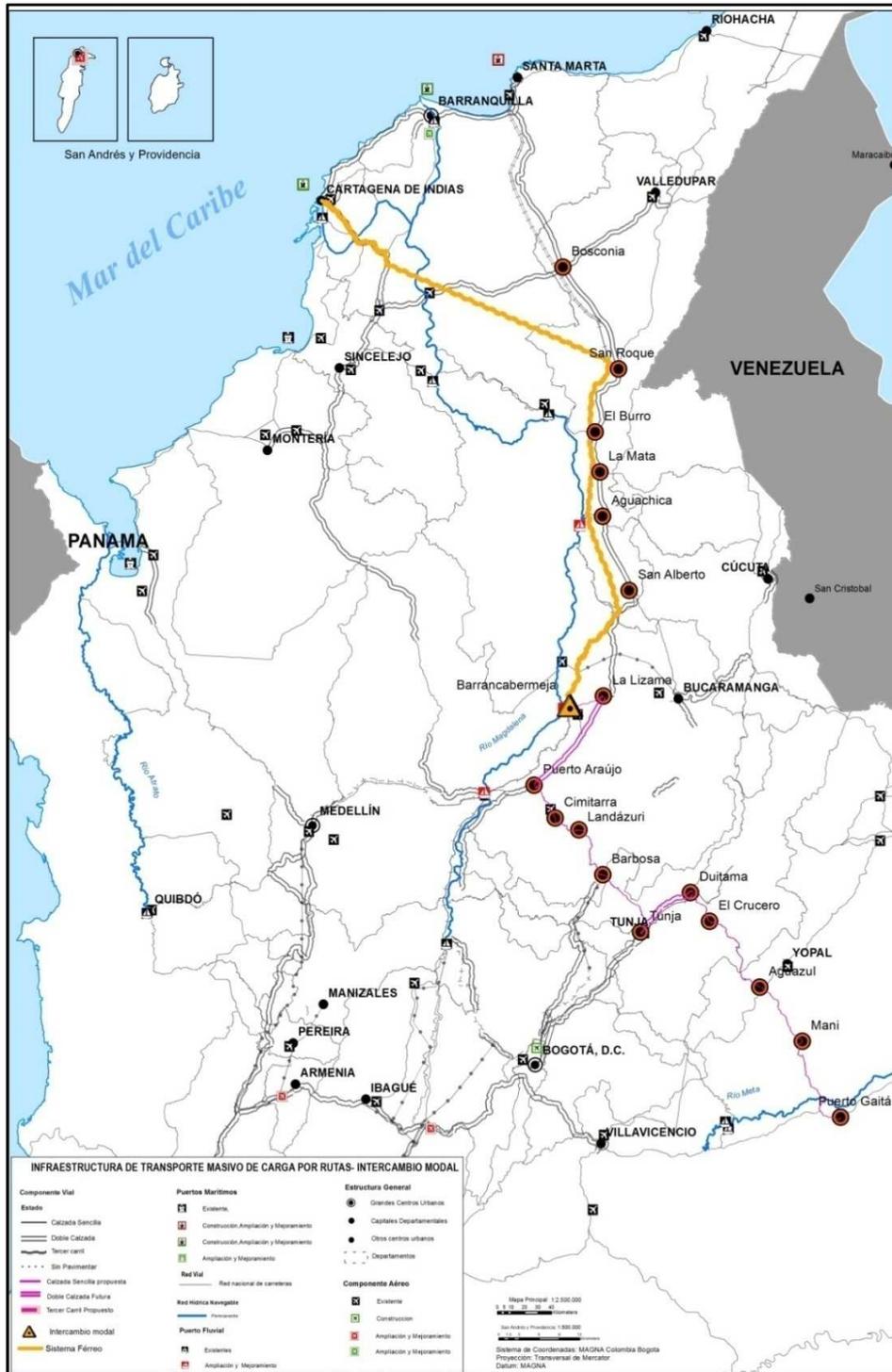
**Figura 24. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 6**  
 Fuente: Elaboración propia



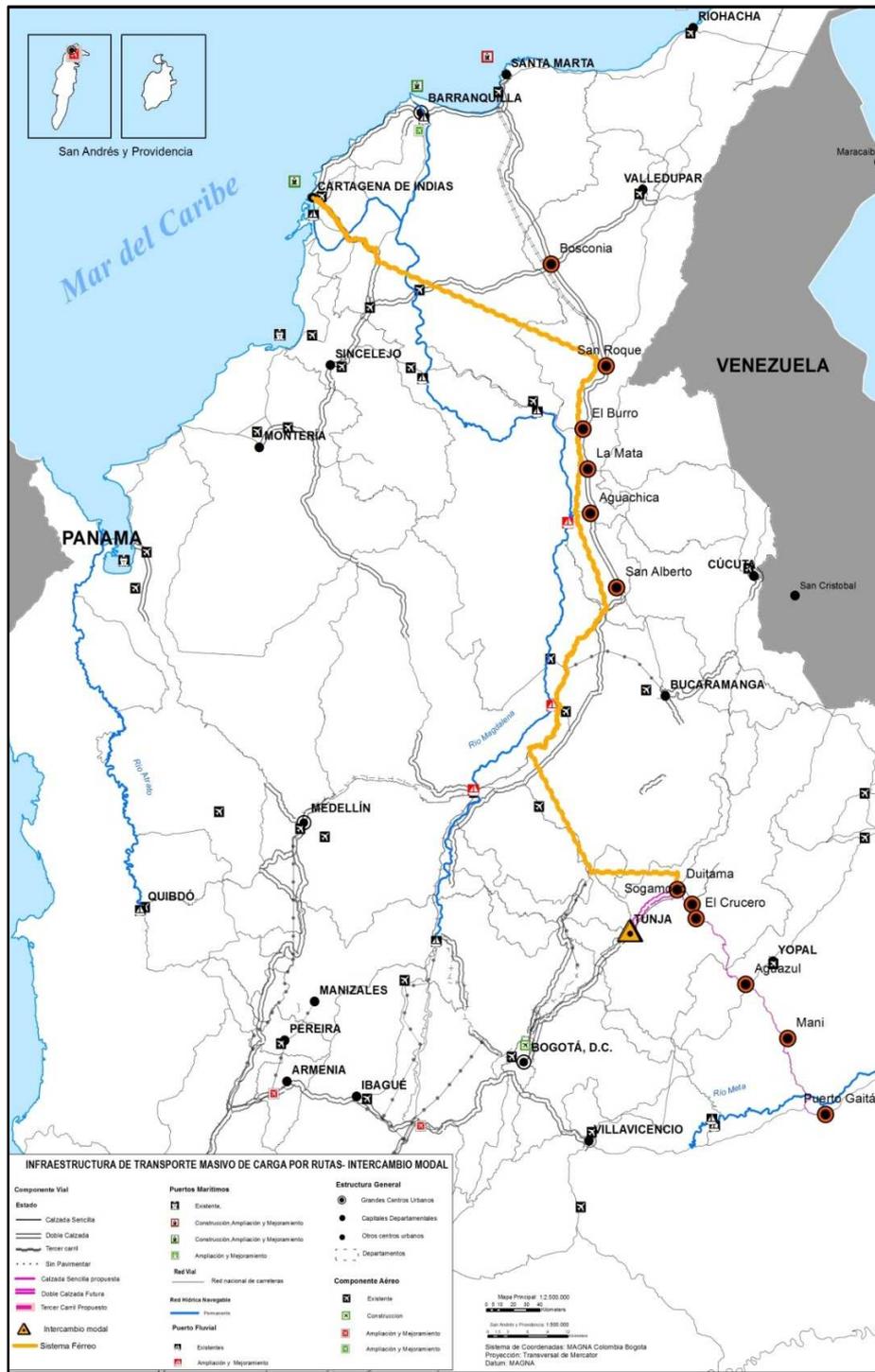
**Figura 25. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 7**  
 Fuente: Elaboración propia



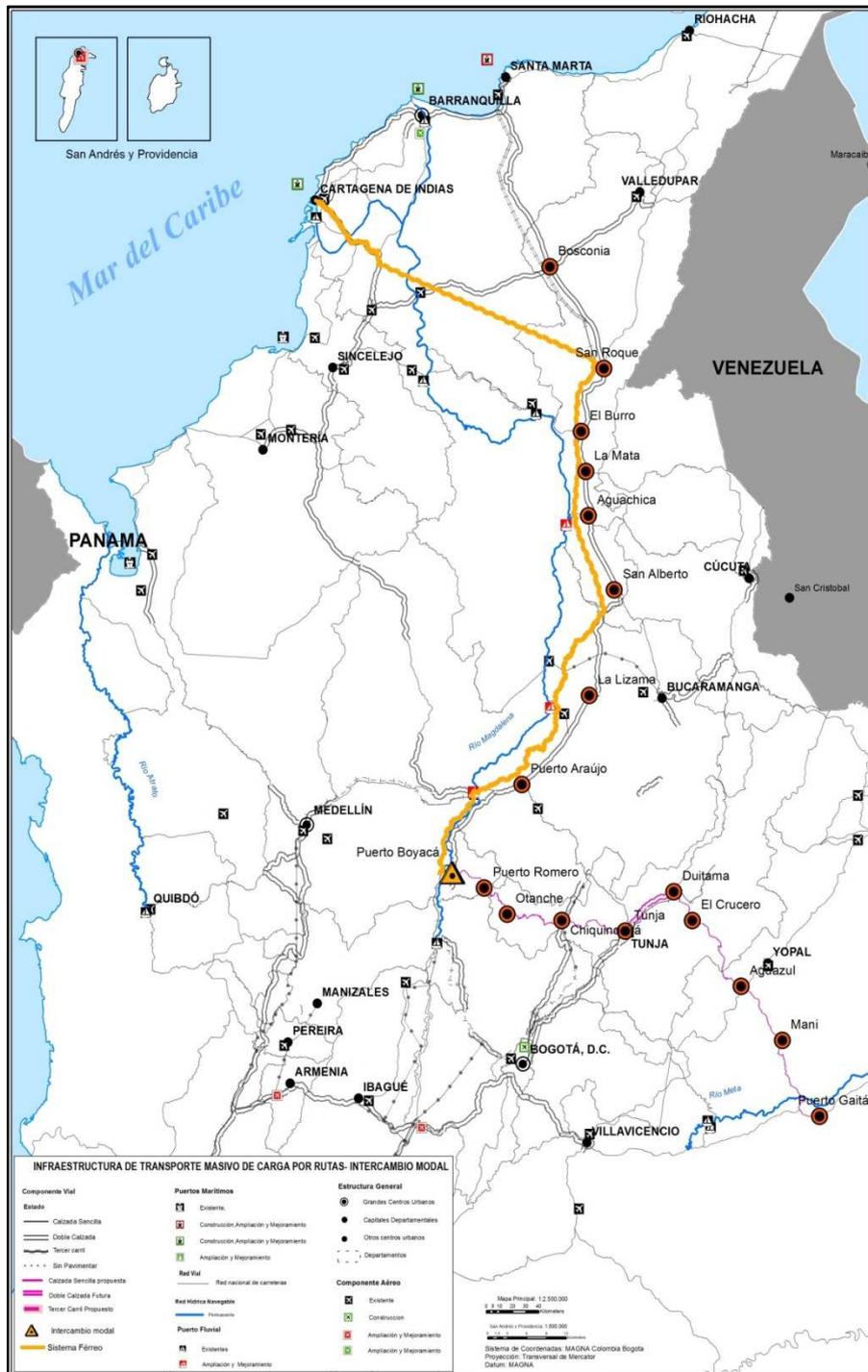
**Figura 26. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 8**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 27. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 9**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 28. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 10**  
 Fuente: Elaboración propia

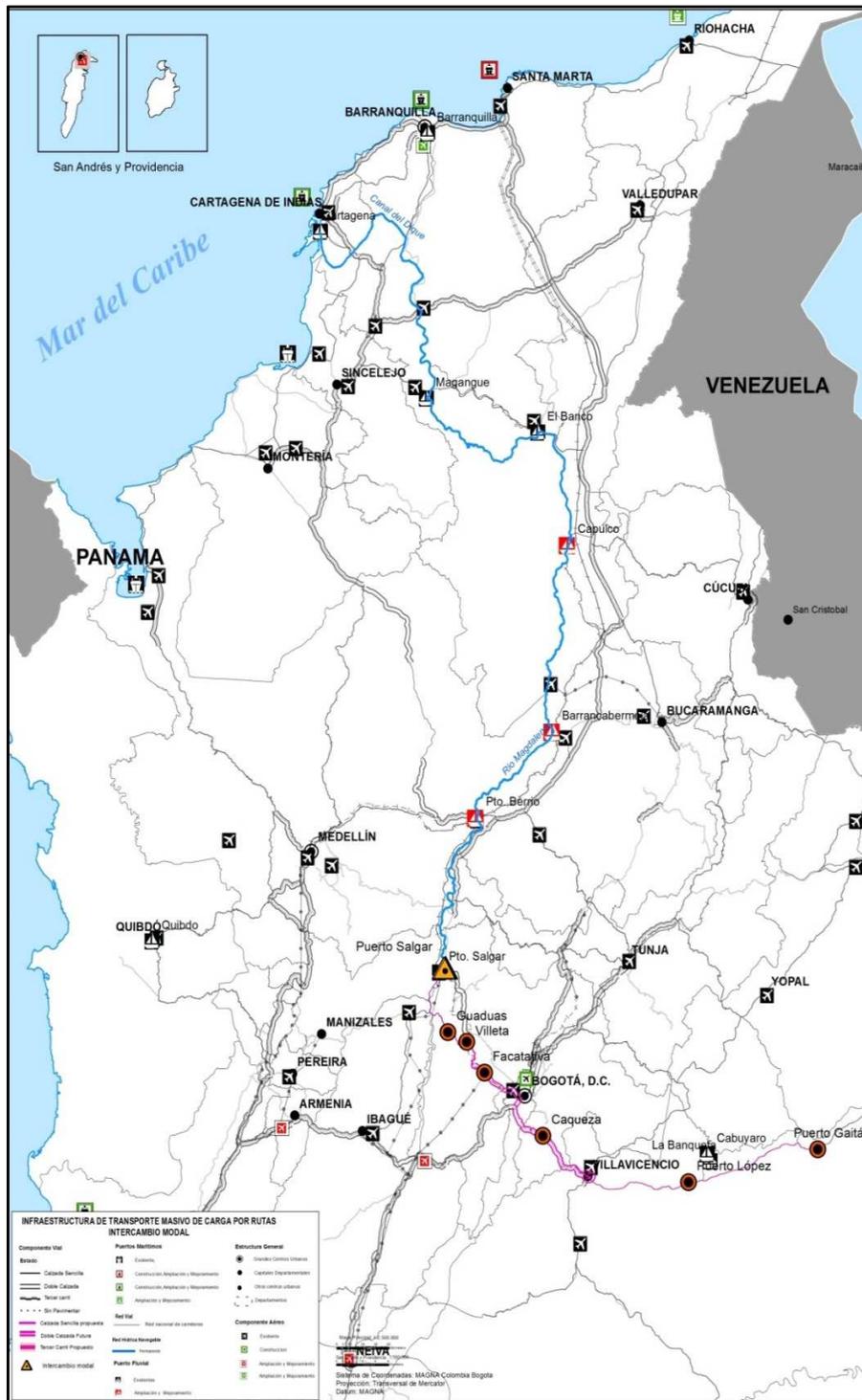


**Figura 29. Intermodalidad Carretero Férreo Corredor 11**  
 Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8. Corredores intermodales Carretero- Fluvial**

<b>Corredor</b>	<b>Recorrido Modo Carretero</b>	<b>Recorrido Modo Fluvial</b>
1	Pto. Gaitán - Villavicencio - Bogotá - Villeta- Puerto Salgar	Puerto Salgar – Puerto Berrio Barrancabermeja – Canal del dique- Cartagena
2	Pto. Gaitán -Villaviencio - Briceño- Tunja - Barbosa - Pto. Araujo-Pto. Berrio	Puerto Berrio -Barrancabermeja- Canal del dique-Cartagena
3	Pto Gaitán-Villavicencio - Briceño - Pte Boyacá- Chiquinquirá-Puerto Boyacá	Puerto Boyacá-Puerto Berrio Barrancabermeja- Canal del dique- Cartagena
4	Pto. Gaitán - Villavicencio - Briceño - Ubate- Chiquinquirá-Barbosa-Cimitarra-Puerto Araujo- Puerto Berrio.	Puerto Berrio -Barrancabermeja- Canal del dique-Cartagena
5	Pto. Gaitán - Villavicencio - Briceño - Ubate- Chiquinquirá - PuetoBoyacá	Puerto Boyacá-Puerto Berrio Barrancabermeja- Canal del dique- Cartagena
6	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Pto. Berrio.	Puerto Berrio -Barrancabermeja- Canal del dique-Cartagena
7	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo -La Lizama-la fortuna-san Alberto-Pto. Capulco.	Pto .Capulco-Canal del dique-Cartagena
8	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - La Lizama- Barrancabermeja	Barranca - Canal del dique-Cartagena
9	Pto. Gaitán-Aguazul- Crucero- Duitama-Tunja -- Chiquinquirá- Puerto Boyacá	Puerto Boyacá-Puerto Berrio Barrancabermeja-Cartagena

Fuente: Elaboración propia

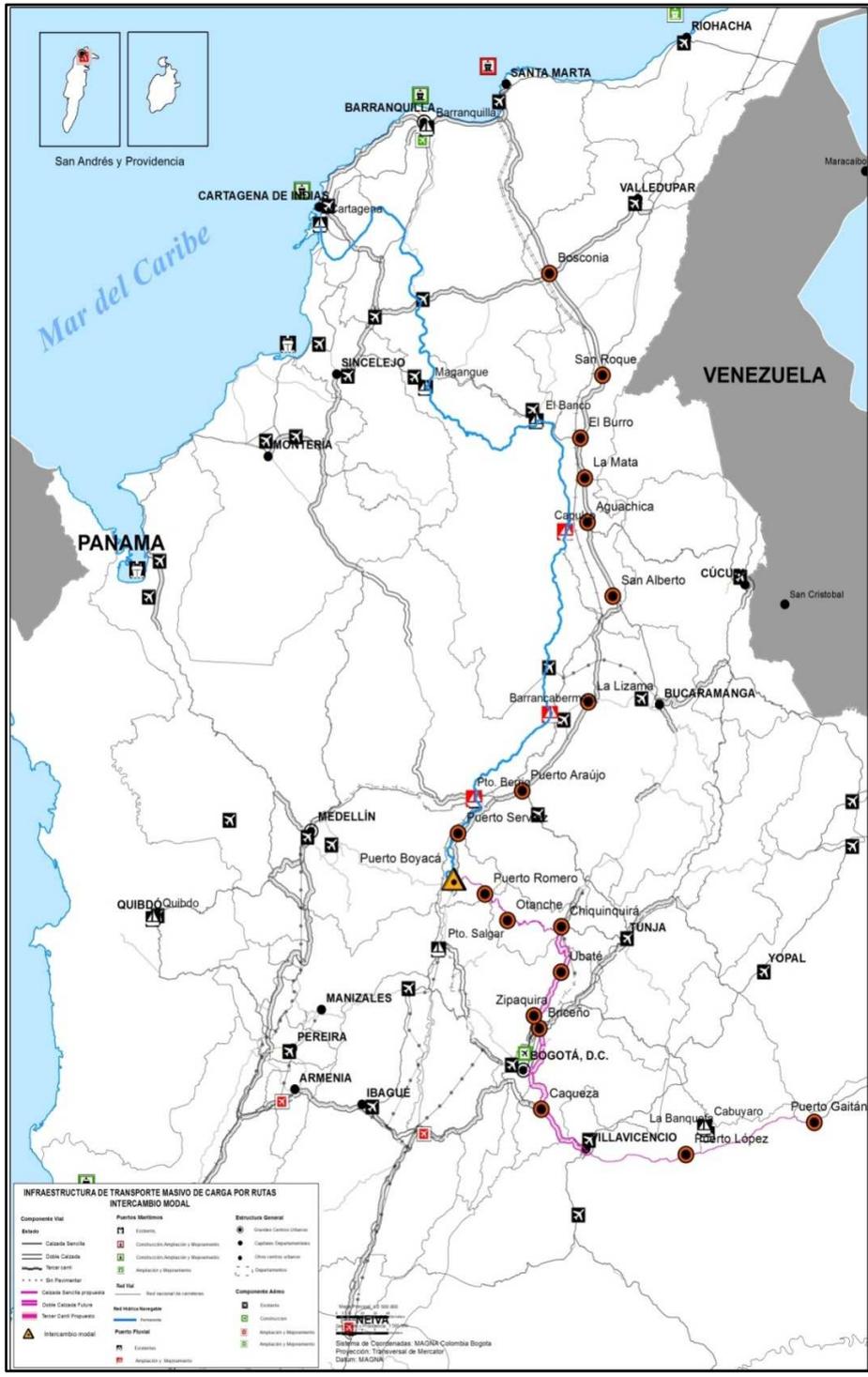


**Figura 30. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 1**  
Fuente: Elaboración propia

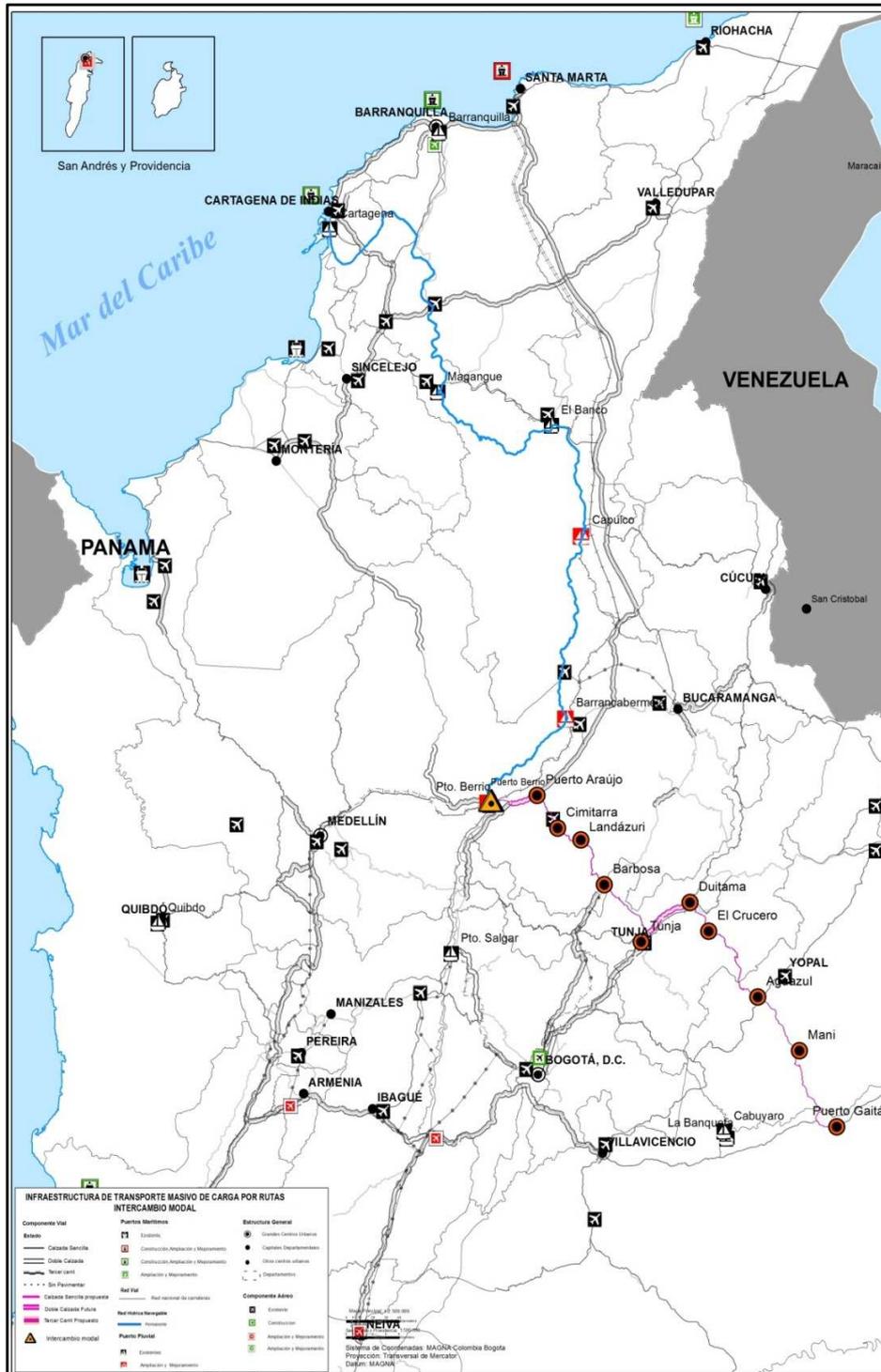




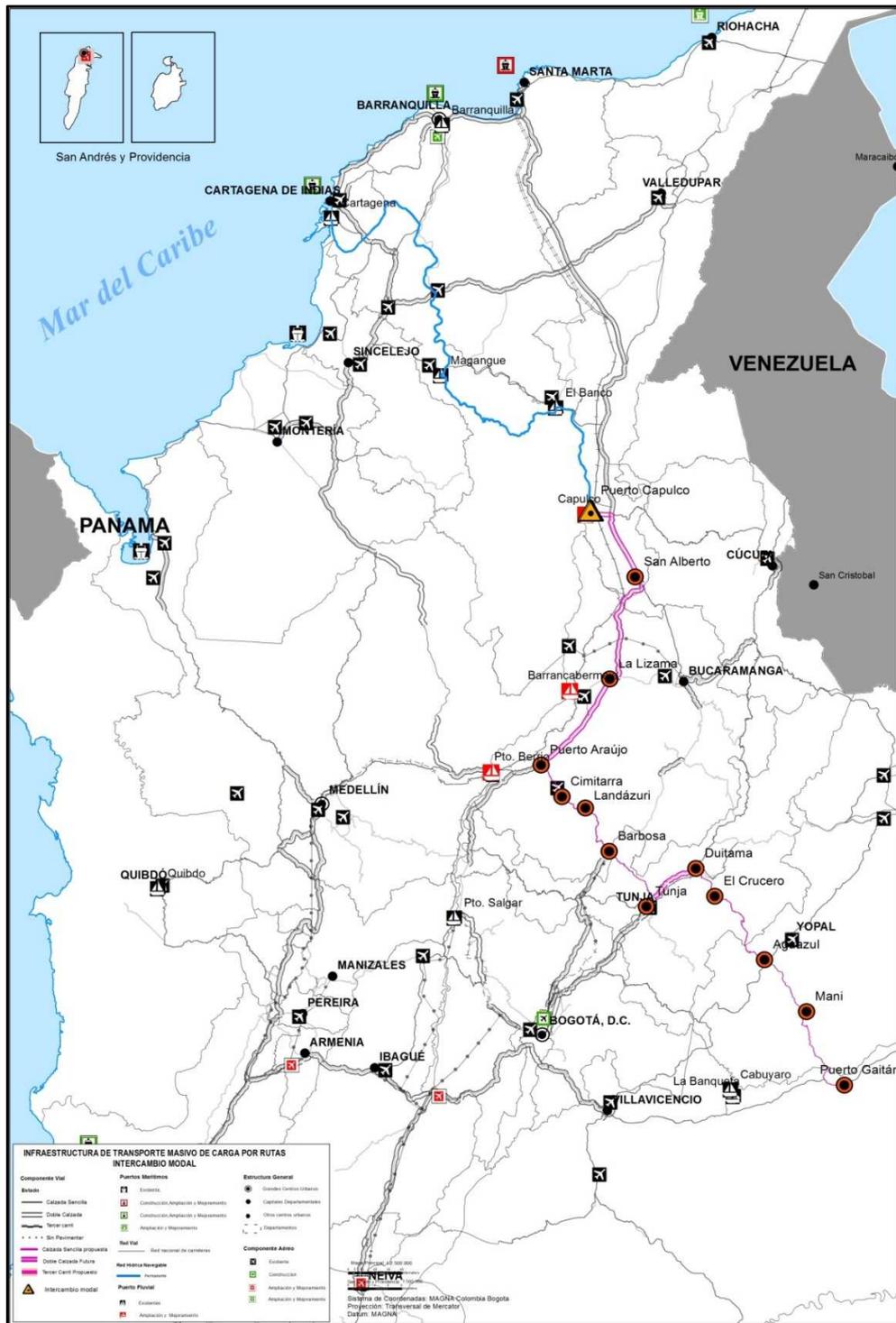




**Figura 34. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 5**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 35. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 6**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 36. Intermodalidad Carretero Fluvial Corredor 7**  
 Fuente: Elaboración propia





### 3.8.1 Costos de transporte para el sistema unimodal (modo carretero)

Para el análisis de costo de los diferentes corredores por modo carretero, se toman como referencia los valores de costo de operación vehicular (VOC) para vehículos pesados (categorías C2, C2-S1, C3-S2,C3-S3) consignados en la cartilla de volúmenes de tráfico del INVIAS del año 2009 y llevados a precios de 2013 mediante el PIB.

Al actualizar los costos de la cartilla del INVIAS al año 2013 se obtuvieron para los camiones C3 y C3-S3 costos superiores a los que manejan los transportadores (según las entrevistas realizadas de costo de viaje).

En este sentido, con el fin de hacer comparable el ejercicio con la situación real, se procedió a utilizar en el modelo de transporte para cada tipo de terreno el valor promedio de costos de operación vehicular obtenido para las cuatro categorías de camiones. Así mismo el modelo de transporte contempla que las vías se encuentran en buen estado.

**Tabla 9. Costo promedio de operación vehicular de un camión (\$/km)  
Año 2013**

Tipo de Terreno	2013
Plano	\$ 3.014
Ondulado	\$ 3.066
Montañoso	\$ 3.373

Fuente: Cálculos propios a partir de información del Instituto Nacional de Vías

El costo/km del viaje, esta función de la capacidad del camión, pero como este costo se promedió, se pueden simular diferentes capacidades, en el presente documento en lo que respecta a corredores o tramos viales carreteros, los costos obtenidos están en función de una capacidad de carga adoptada de 28 ton, por lo cual para poder hallar el costo unitario (\$/Ton/Km), fue necesario dividir los costos totales en función del kilometraje y de la capacidad mencionada.

Luego de determinar el costo del recorrido, se incluyó el costo de los peajes que se encuentra en cada una de las rutas, considerando peajes concesionados y no concesionados tanto en operación como en estructuración o por instalar según la información recopilada. En la siguiente Tabla se muestra, a manera de ejemplo, los resultados de costos en \$/ton/km obtenidos para el corredor 1 del sistema unimodal (modo carretero):

**Tabla 10. Cálculo del costo/ton/km para el corredor 1-Modo Carretero**

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Ruta	Pto. Gaitán - Villavicencio - Bogotá - Puerto Salgar - Puerto Araujo-San Alberto-Cartagena
Longitud (km)	1321
% Terreno plano	89%
% Terreno ondulado	1%
% Terreno montañoso	10%
Costo /km plano	\$ 3.014
Costo /km ondulado	\$ 3.066
Costo /km montañoso	\$ 3.373
Costo total del recorrido/ton	\$166.696
Capacidad ton camión asumida	28 ton ( en la hoja Excel se puede variar)
Peajes	El Yucao-Casetabla- La Libertad-Pipiral-Pte.Quetame-Boquerón-Río Bogotá-Jalisco-Bicentenario-Zambito-Aguas Negras-La Gómez-Morrisón-Pailitas-La Loma-El Difícil-Puente plato-Gambote.
Costo peajes	\$599.600 Camión Categoría VII
Costo/ton/km	\$126

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se muestran los costos de transporte calculados para los 15 corredores identificados por modo carretero:

**Tabla 11. Costo ton/km para corredores de modo carretero**

Corredor	Recorrido Modo Carretero	Longitud km	Costo del recorrido por tonelada (incluye peajes)	Costo \$/Ton/Km
1	Pto. Gaitán - Villavencio - Bogotá - Puerto Salgar - Puerto Araujo-San Alberto-Cartagena	1321	\$ 166.696,34	\$ 126
2	Pto. Gaitán - Cáqueza-Briseño- Tunja - Barbosa - Pto. Araujo -San Alberto- Cartagena	1349	\$ 173.932,47	\$ 129
3	Pto. Gaitán – Villavicencio – Cáqueza – Briceño – Tunja – Barbosa – Floridablanca - San Alberto - Cartagena	1447	\$ 189.367,76	\$ 131
4	Pto. Gaitán – Villavicencio – Briceño – Tunja – Barbosa – Bucaramanga - El Cero – Aguachica–Cartagena	1396	\$ 182.478,85	\$ 131
5	Pto. Gaitán – Villavicencio – El Tablón – Cáqueza – PuenteBoyacá – Tunja – Chiquinquirá - Dos y Medio (Pto. Boyacá) - Puerto Araujo - San Alberto–Cartagena	1527	\$ 194.397,60	\$ 127
6	Pto. Gaitán – Villavicencio – Cáqueza – Briceño – Zipaquirá - Pto.Serviez – PuertoAraujo – SanAlberto–Cartagena	1435	\$ 181.944,59	\$ 127
7	Pto. Gaitán – Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá – Barbosa – PuertoAraujo- -SanAlberto. .Cartagena	1296	\$ 164.458,23	\$ 127
8	Pto. Gaitán – Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá – SanGil – SanAlberto–Cartagena	1394	\$ 169.244,10	\$ 121
9	Pto. Gaitán – Villavicencio – Bogotá – Zipaquirá – Chiquinquirá – Bucaramanga – ElCero – SanAlberto–Cartagena	1343	\$ 175.243,90	\$ 130
10	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Málaga – Floridablanca – LaFortuna – SanAlberto- - Cartagena	1278	\$ 153.649,31	\$ 120
11	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Málaga – Bucaramanga – SanAlberto–Cartagena	1227	\$ 146.760,41	\$ 120
12	Pto.Gaitán - -Aguazul – Sogamoso – Tunja – Chiquinquirá - Pto.Serviez – PuertoAraujo – LaFortuna–Cartagena	1398	\$ 168.574,01	\$ 121
13	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Cartagena	1214	\$ 144.441,48	\$ 119
14	Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Duitama – Tunja – Barbosa – Floridablanca – SanAlberto- -Aguachica–Cartagena	1318	\$ 162.840,25	\$ 124
15	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Bucaramanga - San Alberto - Cartagena o Barranquilla	1267	\$ 153.301,33	\$ 121

Fuente: Elaboración propia



### 3.8.2 Costos de transporte para el Sistema Intermodal (Carretero - Férreo)

Para el análisis de los corredores intermodales carretero - férreo, se utilizaron en los tramos carreteros los costos por Ton/kilometro estimados en la sección anterior, para los costos de transferencia se utilizó un valor de \$8.500 por tonelada, según lo señalado en el documento Conpes 3578 de 2013, Pág. 8 del Departamento Nacional de Planeación.

El costo Ton/Km utilizado para el modo férreo, se obtuvo a partir del análisis de las tarifas aplicadas por los operados de los tramos férreos que operan en Colombia y de los costos previstos en proyecto Tren del Carare (Tabla 12), finalmente se utiliza un costo de \$50 por Ton/Km. No obstante, es importante mencionar que el costo Ton/Km depende de factores a analizar en el CAPEX y OPEX de un proyecto férreo, tales como: construcción, operación, mantenimiento, material rodante, tipo y volúmenes de carga a movilizar, entre otros.

**Tabla 12. Costos ton/km consultados para el modo férreo**

Proyecto	Tipo de Terreno y Trocha	Costo (Ton/Km)
Red Atlántica	Plano y yárdica	\$35,8
Carrejón	Plano y estándar	\$44,1
Previsión Carare 2010 (multimodal)	Ondulado y yárdica	\$48,3
Red Pacífico	Ondulado y yárdica	\$41,5

Fuente: Elaboración propia

La bibliografía consultada recomienda que el sistema de transporte masivo de carga, en este caso el tren, debe llegar directamente al puerto para minimizar los costos de transporte; No obstante, dada la consolidación urbana de Cartagena, en el análisis realizado se contempló la construcción y operación de un puerto seco en el perímetro urbano de Cartagena (aproximadamente 20km del zona urbana) donde se carga o descarga la carga a transportar por ferrocarril, el tramo de conexión con el puerto marítimo y el puerto seco se contempla en modo carretero. Es decir el modelo contempla dos puntos de transferencia a lo largo del recorrido intermodal.

Para obtener el costo ton/km de todo el recorrido se calcularon los costos tanto para tramos viales como para el tramo férreo, incluyendo el costo del tramo del proyecto vial que evite entrar a la zona urbana de Cartagena, así como los respectivos costos de transferencia en los dos puntos de intercambio modal. Posteriormente los diferentes costos se suman y se dividen en la longitud total.

El modelo también permite calcular el costo del recorrido mediante promedio ponderado relacionando las distancias de los tramos respecto a los costos para cada tramo. En la siguiente Tabla se muestra, a manera de ejemplo, los resultados de costos en \$/ton/km obtenidos para el corredor 1 del sistema intermodal carretero - férreo:

**Tabla 13. Cálculo del costo/ton/km para el corredor 1**  
**Sistema Intermodal Carretero-Férreo**

<b>VARIABLE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Tramo carretero 1 (Longitud: 444 Km)	Pto. Gaitán - Villavicencio - Bogotá - Puerto Salgar
Tramo férreo (Longitud: 794 Km)	Puerto salgar- puerto seco
Tramo Carretero 2 (Longitud: 20 Km)	Puerto seco-Cartagena
% Tramo carretero	65%
% Tramo férreo	35%
Cost/ton/km tramo 1 carretero	\$111
Cost/ton/km tramo férreo	\$50
Cost/ton/km tramo 2 carretero	\$108
Costo total del recorrido/ton	\$108.333
Capacidad ton camión asumida	28 ton
Costo/ton/km recorrido intermodal	\$86,12

Fuente:Elaboración propia

En la tabla 11 se muestran los costos de transporte calculados para los 11 corredores identificados para el transporte en sistema intermodal carretero - férreo:

**Tabla 14. Costo/ton/km para los corredores intermodales carretero-férreo.**

Corredor	CARRETERO (1)		FÉRREO		Puntos de Transf.	CARRETERO (2)	Costo/Ton/Km Intermodal
	Recorrido	Long. Km	Recorrido	Long. Km		Costo recorrido por Tn	
1	Pto. Gaitán - Villavicencio-Bogotá - Villeta- Puerto Salgar	444	Puerto Salgar -Puerto Seco	794	2	\$ 2.152,9	\$ 86,12
2	Pto. Gaitán -Villaviencio- Briseño-Tunja - Barbosa - Pto. Araujo- Pto.Berrio	681	Puerto Berrio-Zona Portuaria	681	2	\$ 2.152	\$ 96,39
3	Pto. Gaitán - Villavicencio-Bogotá	282	Bogota -Puerto Seco	940	2	\$ 2.152	\$85,89
4	Pto Gaitán-Villavicencio-Briseño-Pte Boyacá-Chiquinquirá-Puerto Boyacá	709	Puerto Boyacá-Puerto Seco	758	2	\$ 2.152	\$102,06
5	Puerto Gaitan-Villavicencio-Briseño-Ubaté-Chiquinquirá-Barbosa-Cimitarra-Puerto Araujo-Puerto Berrio.	653	Puerto Berrio -Puerto Seco	662	2	\$ 2.152	\$104,59
6	Puerto Gaitán-Villavicencio-Briseño-Ubaté-Chiquinquirá-Puerto Boyacá	617	Puerto Boyacá-Puerto Seco	758	2	\$ 2.152	\$ 101,99
7	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Pto. Berrio.	549	Puerto Berrio -Puerto Seco	662	2	\$ 2.152	\$ 95,50
8	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo -La Lizama-la fortuna-san Alberto-Pto. Capulco.	753,8	Puerto Capulco -Puerto Seco	569	2	\$ 2.152	\$ 102,78
9	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - La Lizama-Barrancabermeja	621	Barranca -puerto seco	661	2	\$ 2.152	\$ 96,21
10	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja	320	Tunja -Puerto Seco	1115	2	\$ 2.152	\$ 77,44
11	C5-C13 Puerto Gaitán-Aguazul-Crucero- Duitama-Tunja --- Chiquinquirá- Puerto Boyacá	616	Puerto Boyacá-Puerto Seco	758	2	\$ 2.152	\$ 93,19

Fuente: Elaboración propia

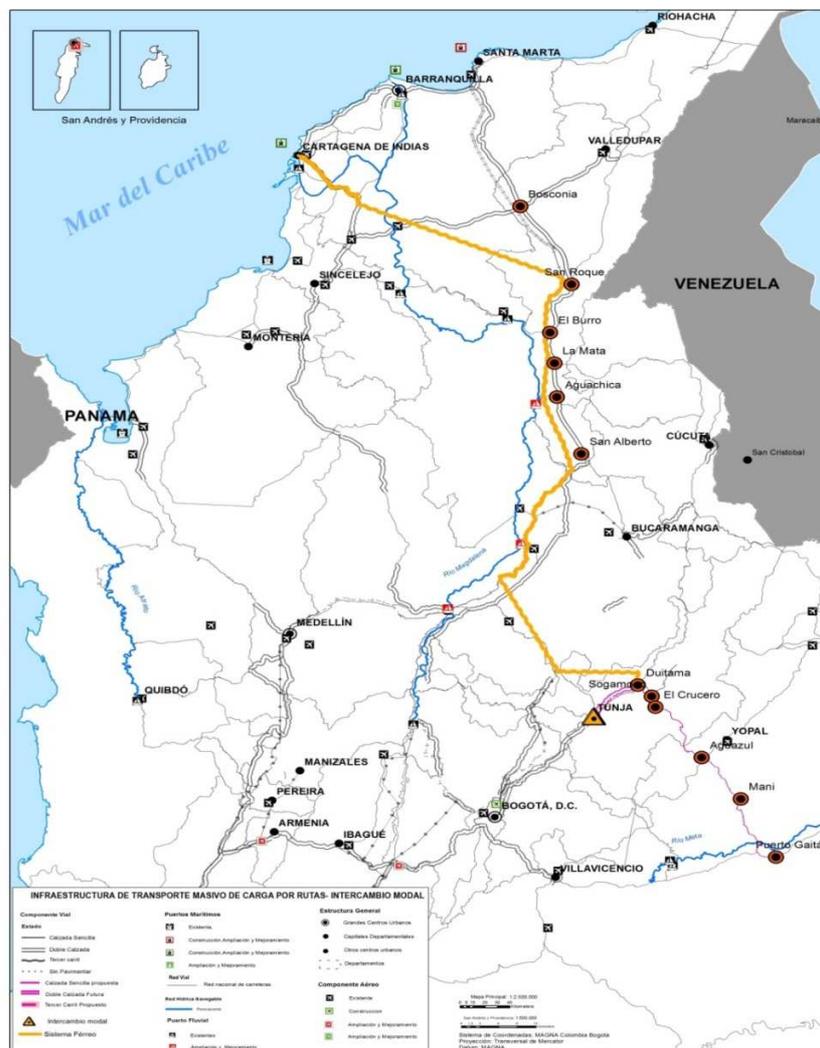
De la anterior tabla, se puede observar que el corredor más económico en el escenario intermodal (carretero – férreo) es el corredor No. 10, con un costo Ton/Km de \$77.44, el cual contempla los siguientes tramos:

Tramo Carretero: Pto. Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja (320 Km)

Punto de Inter cambio Moda: Tunja

Tramo Férreo: Tunja –Puerto Seco en Cartagena (1.115 Km)

Tramo Carretero: Puerto Seco en Cartagena– Zona Portuaria de Cartagena (20 Km)



**Figura 40. Corredor más económico Carretero - Férreo**

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.3 Costos de transporte para el Sistema Intermodal (Carretero - Fluvial)

Para el análisis de corredores con sistema intermodales Carretero-fluvial, se consideran los siguientes aspectos:

- Se analiza nueve (9) posibles corredores de transporte intermodal carretero – férreo.
- Para los tramos carreteros se utilizaron los mismos criterios descritos previamente en el sistema carretero.
- Se utiliza un costo de transferencia de \$17000 por tonelada, según lo señalado en el documento Conpes 3578 de 2013, Pág. 8 del Departamento Nacional de Planeación.
- Solo se considera un punto de transferencia, que corresponde al paso del camión a la barcaza.
- Los costos de transporte fluvial dependen de una serie de variables y circunstancias, tales como las restricciones a la navegación, la logística operativa en los puertos, el tiempo de operación anual de los equipos, el volumen de las cargas regulares y de compensación, entre otras .
- Para el cálculo de costo/ton/km de los corredores intermodal Carretero- fluvial, se requirió calcular dicho costo por tramos, ya que la capacidad del convoy varía en función de las características navegables del río Magdalena; luego de calculada la ruta fluvial por tramos, se requirió hacer un promedio ponderado en función de la distancia multiplicada por dos, dado que los costos suministrados fueron calculados para viaje de ida y regreso, con diferentes escenarios de capacidad.
- El costo/ton/km por modo fluvial, está en función de la capacidad del convoy y de las características de navegabilidad del río Magdalena (Ver Tabla 15).

**Tabla 15. Cálculo de costos por viaje ida y regreso en tramos fluviales.**

Tramo	Distancia Km	Capacidad Convoy Ton	Costo promedio por tonelada en viaje de ida y regreso			
			Con 55% de capacidad utilizada	Con 65% de capacidad utilizada	Con 75% de capacidad utilizada	Con 85% de capacidad utilizada
Puerto Salgar – Puerto Berrío	147	1.200	50.025	17.113	12.407	9.718
Puerto Berrío - Barrancabermeja	101	2.000	16.395	6.148	4.099	3.221
Barrancabermeja - Cartagena	686	6.000	75.212	26.074	25.071	13.789
Capulco – Cartagena	524	7.200	38.983	13.486	9.843	7.762
Puerto Boyacá- Puerto Berrío	85	1.200	50.025	17.113	12.407	9.718

Fuente: Elaboración propia

Básicamente en el análisis de costos de transporte se consideran dos aspectos: a) la operación que incluye costos de capital de los equipos (remolcadores y barcazas), costos de salarios y prestaciones, días de operación anual, repuestos y mantenimiento, seguros, reserva de dique seco, composición de los convoyes, gastos de combustibles y gastos generales y de administración, etc. b) los costos de la ruta que están en función de los diferentes tramos navegables, las horas de navegación, las velocidades de operación de las embarcaciones tanto aguas abajo como remontando, la potencia del equipo remolcador, las cargas regulares operadas (cuando no existe carga de compensación, un solo sentido debe pagar los costos de subida y bajada) y los tiempos muertos originados en circunstancias que se salen del manejo de los armadores.

En la siguiente Tabla se muestra, a manera de ejemplo, los resultados de costos en \$/ton/km obtenidos para el corredor 1 del sistema intermodal carretero - fluvial:

**Tabla 16. Cálculo del costo/ton/km para el corredor 1-Intermodal Carretero-Fluvial**

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Tramo carretero 1 (Longitud: 444 Km)	Pto. Gaitán - Villavicencio - Bogotá -Puerto Salgar
Tramo fluvial 1 (Longitud: 147 Km)	Puerto salgar- puerto Berrio
Tramo fluvial 2 (Longitud 101 Km)	Puerto berrío- Barrancabermeja
Tramo fluvial 3 (Longitud 686 Km)	Barrancabermeja-Cartagena
% Tramo carretero	32%
% Tramo fluvial	68%
Cost/ton/km tramo 1 carretero	\$111,44
Capacidad evaluada	75%
Cost/ton/km tramo Carretero 1	\$42,20
Cost/ton/km tramo Fluvial 2	\$20,29
Cost/ton/km tramo Fluvial 3	\$18,27
Totalponderado Cost/ton/km	\$22,26
Costo transferencia /ton/km	\$18,20
Costo/ton/km recorrido intermodal	\$69,19

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 17 se muestran los costos de transporte calculados para los 9 corredores identificadas para el transporte en sistema intermodal carretero - fluvial:

**Tabla 17. Costo/ton/km para rutas intermodales Carretero- Fluvial**

Ruta	Corredor carretero 1	Long	Corredor fluvial	Long	No. de puntos de transferencia	Costo ton/km intermodal
1	Pto. Gaitán - Villavicencio-Bogotá - Villeta- Puerto Salgar	444	Puerto Salgar – Puerto BerríoBarrancabermeja - Cartagena	934	1	\$ 69,19
2	Pto. Gaitán -Villaviencio- Briseño-Tunja - Barbosa - Pto. Araujo- Pto.Berrio	681	Puerto Berrío -Barrancabermeja- Cartagena	787	1	\$ 91,98
3	Pto. Gaitán-Villavicencio-Briseño-Pte Boyacá-Chiquinquirá-Puerto Boyacá	709	Puerto Boyacá-Puerto Berrío Barrancabermeja-Cartagena	872	1	\$ 92,55
4	Puerto Gaitan-Villavicencio-Briseño-Ubate-Chiquinquirá-Barbosa-Cimitarra-Puerto Araujo- Puerto Berrío.	653	Puerto Berrío -Barrancabermeja- Cartagena	787	1	\$ 92,41
5	Puerto Gaitán-Villavicencio-Briseño-Ubaté-Chiquinquirá- PuertoBoyacá	617	Puerto Boyacá-Puerto Berrío Barrancabermeja-Cartagena	872	1	\$ 90,69
6	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Pto. Berrío.	549	Puerto Berrío -Barrancabermeja- Cartagena	787	1	\$ 81,40
7	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo -La Lizama-la fortuna-san Alberto-Pto. Capulco.	753,8	Puerto Capulco-Cartagena	524	1	\$ 107,05
8	Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - La Lizama-Barrancabermeja	621	Barranca -puerto seco	686	1	\$ 90,27
9	C5-C13 Puerto Gaitán-Aguazul-Crucero- Duitama-Tunja -- Chiquinquirá- Puerto Boyacá	616	Puerto Boyacá-Puerto Berrío Barrancabermeja-Cartagena	872	1	\$ 82,43

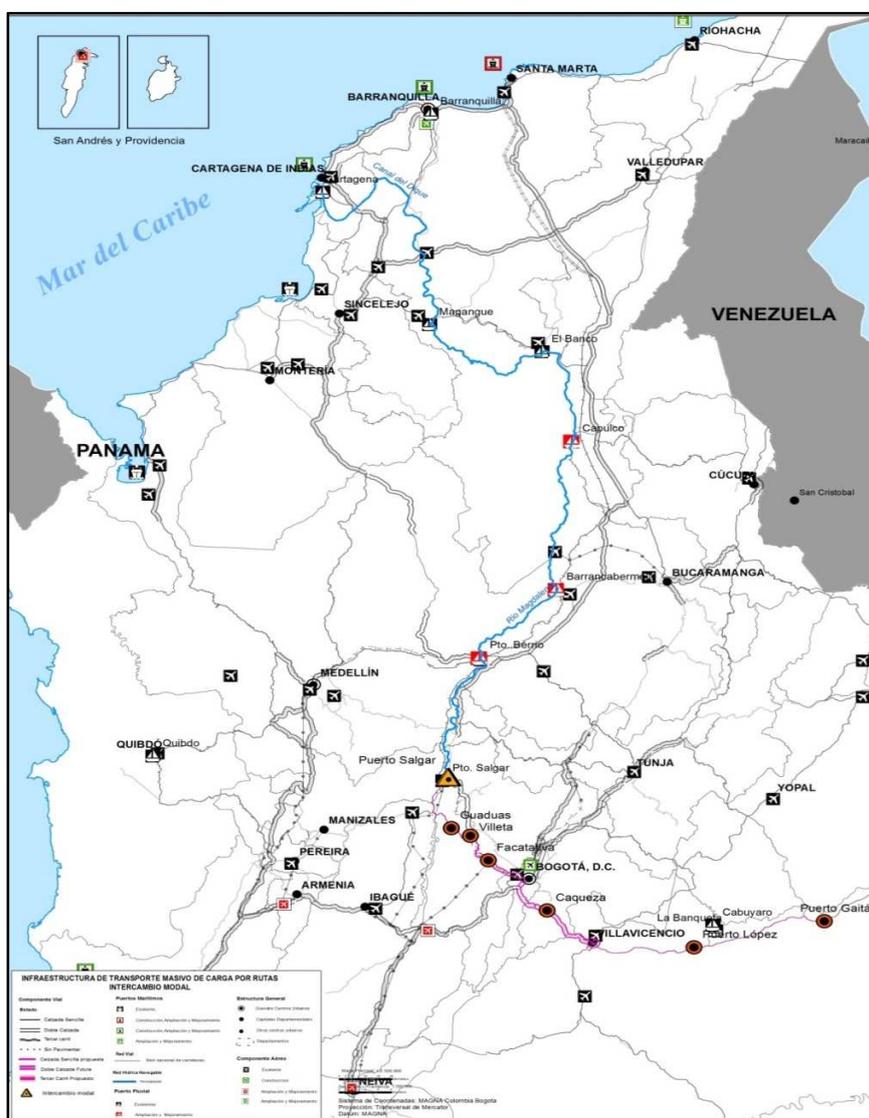
Fuente: Elaboración propia

De la anterior tabla, se puede observar que el corredor más económico en el escenario intermodal (carretero – fluvial) es el corredor No. 1, con un costo Ton/Km de \$69,19., el cual contempla los siguientes tramos:

Tramo Carretero: Pto.Gaitán – Villavicencio- Bogotá – Villeta – Puerto Salgar (444 Km)

Punto de Intercambio Modal: Puerto Salgar

Tramo Fluvial: Puerto Salgar – Zona Portuaria de Cartagena (934 Km)



**Figura 41. Corredor más económico Carretero - Fluvial**

Fuente: Elaboración propia

Obtenidos los costos de transporte para cada uno de los corredores tanto en sistema unimodal como intermodal, se procede a identificar el corredor de menor costo en cada sistema. Ver tabla 18.

**Tabla 18. Corredor de menor costo para escenario**

<b>Modalidad de Transporte</b>	<b>Corredor o ruta de menor costos</b>	<b>Longitud</b>	<b>\$/Ton/Km</b>
Carretero	Corredor 13: Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Cartagena	Long. Carretero: 1214 Km	\$ 119
Intermodal Carretero – Férreo	Corredor 10: Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja	Long. Carretero: 320 Km Long. Férreo: 1115 Km	\$ 77,44
Intermodal Carretero – Fluvial	Corredor 1: Pto. Gaitán - Villavicencio- Bogotá -Villeta- Puerto Salgar	Long Carretero: 444 Km Long. Fluvial: 934 Km	\$ 69,19

Fuente: Elaboración propia

Los resultados nos muestran que el sistema más económico es el sistema de transporte intermodal Carretero – Fluvial, con un punto de intercambio modal en Puerto Salgar.

### **3.9 Evaluación Multicriterio a los corredores con menor costo de transporte**

Identificados y seleccionados los corredores de menor costo de transporte, para el transporte del petróleo entre la región de la Altillanura y la zona portuaria de Cartagena, se procede a realizar una evaluación de los mismos mediante un análisis multicriterio para establecer indicadores de valoración que permita jerarquizarlos y de esta forma identificar el mejor entre ellos.

La propuesta metodológica para la evaluación multicriterio de los corredores identificados y seleccionados, articula el análisis en torno a los siguientes cinco grupos de factores o áreas temáticas:

- i) Valoración del tiempo de viaje por modo;
- ii) Valoración de la confiabilidad;
- iii) Externalidades;
- iv) Valoración costo modal tonelada/km;
- v) Viabilidad ambiental

Cada factor puede obtener una calificación de 1 a 5, en función de en cuanto cada corredor satisface el factor respectivo, siendo 5 el que mejor los satisface y 1 el que menor.

Para la valoración conjunta de los cinco factores en cada corredor, se establece una ponderación porcentual en el que la suma total no debe exceder el 100%, la ponderación determina su peso en la valoración global del corredor modal.

Hay que señalar que la ponderación que se asigna para los distintos factores, así como el valor relativo de cada uno de ellos, busca reflejar las problemáticas o desafíos de los diferentes corredores identificados y seleccionados.

La aplicación de esta metodología permite comparar de forma integral los corredores, calculando en primer lugar un valor numérico para uno de los factores analizados que posteriormente se suman para obtener la clasificación global de cada corredor. Una vez terminado este procedimiento los corredores se ordenan en función a su calificación global lo que permite identificar el corredor a recomendar, siendo aquel que obtiene el mayor puntaje.

A continuación se describen los porcentajes de ponderación y valores relativos de cada uno de los factores considerados en la matriz multicriterio para evaluar cada corredor:

- **Tiempo de Viaje**

Aunque el transporte intermodal ofrece la ventaja de unos costes relativamente bajos en comparación con otros métodos, se encuentra que durante el recorrido la carga deber ser

transferida entre modos de transporte que comparativamente presentan diferentes velocidades de recorrido.

De otra parte, en el transporte intermodal se deben considerar la cantidad de tiempo de espera en los depósitos de un vehículo nuevo para llegar o para que la carga sea descargada.

En este sentido, se definieron unos rangos de valoración del tiempo del viaje estimados en función de la longitud de los tramos modales y la velocidad promedio de acuerdo al modo y la ruta.

#### - **Confiabilidad**

Debido a su dependencia en más de un medio de transporte, el transporte intermodal está sujeto también a reducir la confiabilidad general; a medida que la cadena de diferentes modos crece, la posibilidad de fallas en cualquier enlace en la cadena también aumenta. Esto es particularmente problemático cuando uno de los modos de transporte es ferroviario; los ferrocarriles son más susceptibles a los retardos introducidos por el mal tiempo o fallas del equipo. Por esta razón, así como la preocupación por la velocidad, los transportistas que requieren transporte confiable y de alta velocidad son menos propensos a considerar los sistemas intermodales.

La elección del medio de transporte condicionará los plazos de entrega, los que se deberán compatibilizar con las necesidades del importador, dado que un retardo en la llegada de la mercadería puede menoscabar la imagen de la empresa y, por ende, su confiabilidad. La frecuencia en las entregas y demoras puede agravar o entorpecer los stocks, afectando la competitividad de la empresa, dado que mantenerlos genera costos adicionales.

La elección del itinerario del medio transportador condicionará el número de documentos y formalidades, lo que puede afectar el pago, ya que el retraso en el envío de la mercadería es el punto inicial para el retraso del pago. En consecuencia, la elección del medio transportador genera consecuencias comerciales, técnicas, administrativas y

financieras y se verá influenciada por tres factores clásicos: el costo, la demora Y la inseguridad.

Para la valoración de la confiabilidad se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Manipulación de la carga
- Interferencias en la ruta
- Incidencia del conductor
- Retrasos de itinerario

- **Externalidades**

En la actualidad, el crecimiento de movilidad al que se está asistiendo está asociado al desarrollo, sin embargo, esto no nos debe conducir a un crecimiento proporcional de los índices de contaminación, por lo que es necesario potenciar aquellos modos de transporte de mayor rendimiento energético y de menor índice contaminante.

La integración de los diferentes modos de transporte mediante una buena planificación de la complementariedad de los mismos que nos lleva a mejorar los impactos ambientales, la congestión en la carretera, la seguridad, los costes en la industria haciéndola más competitiva, el empleo y el interés público.

Para el transporte intermodal de mercancías, deben existir líneas troncales ferroviarias que unan los principales centros de actividad y producción de grandes cargas o volúmenes apoyada en una red de carreteras que distribuya, dentro de los mercados locales, las mercancías transportadas. Esta propuesta conlleva descargar la red vial de un gran volumen de tráfico, reduciendo la accidentalidad, mejorando el medio ambiente y aumentando la capacidad de las vías.

Según estudio realizado por el IQ<sup>3</sup>, los principales costes externos en el caso del transporte son:

- Los vinculados a la saturación de las infraestructuras,
- Los accidentes durante el transporte, y
- La contaminación medioambiental.

Los costes externos por medio de transporte pueden cuantificarse en (Ministerio de Fomento España, 2003, pág. 80):

- Transporte por carretera 24 € t · km
- Transporte ferroviario 12 € t · km
- Transporte fluvial 4 € t · km

- **Costo de transporte (\$/Ton/Km)**

Corresponde al costo por kilometro de transportar una tonelada de carga, obtenidos en el capítulo anterior:

**Tabla 19. Costo de Transporte de cada corredor a evaluar**

Modalidad de Transporte	Corredor o ruta de menor costos	Longitud	\$/Ton/Km
Carretero	Corredor 13: Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Cartagena	Long. Carretero: 1214 Km	\$ 119
Intermodal Carretero – Férreo	Corredor 10: Pto. Gaitán - Aguazul - Sogamoso - Tunja	Long. Carretero: 320 Km Long. Férreo: 1115 Km	\$ 77,44
Intermodal Carretero – Fluvial	Corredor 1: Pto. Gaitán - Villavicencio- Bogotá -Villeta- Puerto Salgar	Long Carretero: 444 Km Long. Fluvial: 934 Km	\$ 69,19

Fuente: Elaboración propia

<sup>3</sup>“**IQ: Intermodal Quality**”, proyecto desarrollado en 1997-98 por INRETS Consortium dentro del IV Programa Marco de la UE.

## - Viabilidad Ambiental

Para determinar el corredor más viable desde el punto de vista “ambiental”, se analiza la intensidad o magnitud de los posibles impactos negativos que puede generar la implementación de cada uno de los corredores.

La intensidad o magnitud de los Impactos Negativos puede ser de 4 tipos, comenzando con aquellos que, aun siendo negativos son compatibles con el medio y, en principio no es necesario aplicarles mecanismos de corrección o mecanismos correctores muy poco intensivos; pasando por los impactos moderados, en donde las medidas de corrección son más intensivas; los severos, en donde estas medidas no sólo tienen que ser más intensivas, sino que, incluso, habría de plantearse reducir la dimensión impactante del corredor, o alguno de los modos de transporte del corredor; y, finalmente los impactos críticos, que son aquellos impactos negativos que destruyen factores o procesos ambientales completos, lo que implica la necesidad de diseñar de nuevo el corredor, alguno de los modos del corredor, o algunas de las partes del modo desplegado sobre el territorio, para que la dimensión impactante no alcance proporciones indeseables.

A continuación se explicita con mayor precisión que se entiende por cada uno de los impactos negativos, cuya **magnitud** puede ser de 4 tipos, en función de los cuales habrá, o no, de implementarse mecanismos correctores de potencia variada:

- **Impacto Negativo de efecto ambiental Compatible.** Cuando un recurso natural, socioeconómico, infraestructural y cultural afectado, es capaz de asumir los efectos ocasionados por la alternativa sin que ello suponga una alteración apreciable de sus condiciones iniciales ni de su funcionamiento, no siendo necesario adoptar medidas protectoras, correctoras o compensatorias, o siendo éstas muy simples en su ejecución, de coste económico muy bajo y recuperabilidad inmediata
- **Impacto Negativo de efecto ambiental Moderado.** Cuando la recuperación del funcionamiento y características fundamentales de los recursos afectados requiere la adopción y ejecución de medidas que cumplan alguna de las siguientes condiciones:
  - Simples en su ejecución (quedan excluidas las técnicas complejas)

- Coste económico bajo o medio
  - Existen experiencias que permitan asegurar que la recuperación de las condiciones iniciales tendrán lugar a corto plazo (periodo de tiempo estimado en 3-5 años, en ocasiones algo menos)
- **Impacto Negativo de efecto ambiental Severo.** Cuando la recuperación del funcionamiento y características de los recursos afectados requiere la adopción y ejecución de medidas que cumplan algunas de las siguientes condiciones:
    - Técnicamente complejas
    - Coste económico elevado
    - Existen experiencias que permiten asegurar que la recuperación de las condiciones iniciales tendrá lugar a largo plazo (estimado como un periodo superior a los 5 años); con bastante probabilidad no existen experiencias que permitan asegurar que la recuperación de las condiciones iniciales tendrá lugar en un plazo inferior
- **Impacto Negativo de efecto ambiental Crítico.** Cuando no es posible la recuperación del funcionamiento y características fundamentales del factor o proceso ambiental afectado, ni siquiera con la adopción y ejecución de medidas protectoras, correctoras y compensatorias intensivas. El impacto crítico implica la completa destrucción del factor o proceso ambiental o, al menos, las partes estratégicas que permiten su funcionamiento o su alteración significativa, sin que pueda revertirse la actuación. La única solución es eliminar la propuesta y formular una nueva que evite el efecto crítico.

En la Tabla 20 se muestran los rangos y calificación asignados a cada uno de los factores contempladas en el presente análisis multicriterio:

**Tabla 20. Rangos y Calificación**

Factor	Descripción	RANGOS Y CALIFICACIÓN				
		1	2	3	4	5
Tiempo de Viaje	Horas de tiempo del viaje estimados en función de la longitud de los tramos modales y la velocidad promedio de acuerdo al modo y la ruta	≥90	70-<90	50-<70	30-<50	10-<30
Confiabilidad	Para la valoración de esta variable, se tuvieron en cuenta aspectos como: manipulación de la carga, interferencias en la ruta, incidencia del conductor, retrasos en itinerario por inconvenientes en el sistema de transporte	Nada confiable	Poco Confiable	Confiabilidad media	Confiable	Muy Confiable
Externalidades	Costos externos por modo de transporte	≥80	60-<80	40-<60	20-<40	0-<20
Costos de Transporte (\$/Tn/Km)	Corresponde al costo por kilometro de transportar una tonelada de carga	≥125	100-<125	75-<100	50-<75	25-<50
Viabilidad Ambiental	Valora los impactos negativos en el entorno de las infraestructuras	Ninguno	Compatible	Moderado	Severo	Crítico

*Fuente: Elaboración propia*

- **Resultados de la Evaluación Multicriterio de corredores de menor costo**

A continuación se presentan los resultados del análisis multicriterio. Inicialmente se muestran para cada corredor el valor y la calificación obtenida por cada uno de los factores según los criterios previamente definidos.

**Tabla 21. Resultados del Análisis Multicriterio. Valor de cada factor**

<b>Factor</b>	<b>Modo Carretero</b>	<b>Sistema Carretero - Férreo</b>	<b>Sistema Carretero - Fluvial</b>
Tiempo de Viaje	30 Horas	30 Horas	73 Horas
Confiabilidad	Confiable	Confiabilidad Media	Poco Confiable
Externalidades	74,73	54,02	36,92
Costos de Transporte (\$/Tn/Km)	120,58	77,44	69,19
Viabilidad Ambiental	Moderado	Moderado	Severo

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 22. Resultados del Análisis Multicriterio. Calificación de cada factor**

<b>Factor</b>	<b>Modo Carretero</b>	<b>Sistema Carretero - Férreo</b>	<b>Sistema Carretero - Fluvial</b>
Tiempo de Viaje	4	4	2
Confiabilidad	4	3	2
Externalidades	2	3	4
Costos de Transporte (\$/Tn/Km)	2	3	4
Viabilidad Ambiental	3	3	2

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de analizar la consistencia en los resultados a obtener respecto a la puntuación de cada corredor, se realizan diferentes iteraciones variando el valor de ponderación de cada uno de los factores. En este caso específico se realizaron 20 iteraciones, cuyos resultados se presentan a continuación (Tabla 23):

Tabla 23. Resultados Matriz Multicriterio – Iteración 1

Iteración No.	Ponderación	Factor	Modo		
			Carretero	Carretero-férreo	Carretero-fluvial
1	20%	Tiempo de viaje	0,8	0,8	0,4
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	20%	costos de externalidades	0,4	0,6	0,8
	20%	costo/ton/km	0,4	0,6	0,8
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,00</b>	<b>3,20</b>	<b>2,80</b>
2	15%	Tiempo de viaje	0,6	0,6	0,3
	25%	confiabilidad	1	0,75	0,5
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	35%	costo/ton/km	0,7	1,05	1,4
	15%	Viabilidad Ambiental	0,45	0,45	0,3
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,95</b>	<b>3,15</b>	<b>2,90</b>
3	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	25%	confiabilidad	1	0,75	0,5
	15%	costos de externalidades	0,3	0,45	0,6
	25%	costo/ton/km	0,5	0,75	1
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,95</b>	<b>3,10</b>	<b>2,80</b>
4	20%	Tiempo de viaje	0,8	0,8	0,4
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	30%	costo/ton/km	0,6	0,9	1,2
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,00</b>	<b>3,20</b>	<b>2,80</b>
5	15%	Tiempo de viaje	0,6	0,6	0,3
	30%	confiabilidad	1,2	0,9	0,6
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	10%	costo/ton/km	0,2	0,3	0,4
	35%	Viabilidad Ambiental	1,05	1,05	0,7
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,25</b>	<b>3,15</b>	<b>2,40</b>
6	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	10%	confiabilidad	0,4	0,3	0,2
	15%	costos de externalidades	0,3	0,45	0,6
	45%	costo/ton/km	0,9	1,35	1,8
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,60</b>	<b>3,10</b>	<b>3,20</b>

Iteración No.	Ponderación	Factor	Modo		
			Carretero	Carretero-férreo	Carretero-fluvial
7	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	10%	confiabilidad	0,4	0,3	0,2
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	45%	costo/ton/km	0,9	1,35	1,8
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,65</b>	<b>3,10</b>	<b>3,10</b>
8	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	35%	costo/ton/km	0,7	1,05	1,4
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,85</b>	<b>3,10</b>	<b>2,90</b>
9	5%	Tiempo de viaje	0,2	0,2	0,1
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	5%	costos de externalidades	0,1	0,15	0,2
	50%	costo/ton/km	1	1,5	2
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,70</b>	<b>3,05</b>	<b>3,10</b>
10	20%	Tiempo de viaje	0,8	0,8	0,4
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	5%	costos de externalidades	0,1	0,15	0,2
	35%	costo/ton/km	0,7	1,05	1,4
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,00</b>	<b>3,20</b>	<b>2,80</b>
11	15%	Tiempo de viaje	0,6	0,6	0,3
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	20%	costo/ton/km	0,4	0,6	0,8
	35%	Viabilidad Ambiental	1,05	1,05	0,7
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,05</b>	<b>3,15</b>	<b>2,60</b>
12	30%	Tiempo de viaje	1,2	1,2	0,6
	15%	confiabilidad	0,6	0,45	0,3
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	25%	costo/ton/km	0,5	0,75	1
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,10</b>	<b>3,30</b>	<b>2,70</b>

Iteración No.	Ponderación	Factor	Modo		
			Carretero	Carretero-férreo	Carretero-fluvial
13	20%	Tiempo de viaje	0,8	0,8	0,4
	20%	confiabilidad	0,8	0,6	0,4
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	25%	costo/ton/km	0,5	0,75	1
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,05</b>	<b>3,20</b>	<b>2,70</b>
14	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	10%	confiabilidad	0,4	0,3	0,2
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	50%	costo/ton/km	1	1,5	2
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,60</b>	<b>3,10</b>	<b>3,20</b>
15	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	25%	confiabilidad	1	0,75	0,5
	5%	costos de externalidades	0,1	0,15	0,2
	35%	costo/ton/km	0,7	1,05	1,4
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,95</b>	<b>3,10</b>	<b>2,80</b>
16	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	25%	confiabilidad	1	0,75	0,5
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	30%	costo/ton/km	0,6	0,9	1,2
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,95</b>	<b>3,10</b>	<b>2,80</b>
17	20%	Tiempo de viaje	0,8	0,8	0,4
	30%	confiabilidad	1,2	0,9	0,6
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	15%	costo/ton/km	0,3	0,45	0,6
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,25</b>	<b>3,20</b>	<b>2,50</b>
18	20%	Tiempo de viaje	0,8	0,8	0,4
	25%	confiabilidad	1	0,75	0,5
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	20%	costo/ton/km	0,4	0,6	0,8
	25%	Viabilidad Ambiental	0,75	0,75	0,5
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>3,15</b>	<b>3,20</b>	<b>2,60</b>

Iteración No.	Ponderación	Factor	Modo		
			Carretero	Carretero-férreo	Carretero-fluvial
19	10%	Tiempo de viaje	0,4	0,4	0,2
	10%	confiabilidad	0,4	0,3	0,2
	20%	costos de externalidades	0,4	0,6	0,8
	40%	costo/ton/km	0,8	1,2	1,6
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,60</b>	<b>3,10</b>	<b>3,20</b>
20	15%	Tiempo de viaje	0,6	0,6	0,3
	15%	confiabilidad	0,6	0,45	0,3
	10%	costos de externalidades	0,2	0,3	0,4
	40%	costo/ton/km	0,8	1,2	1,6
	20%	Viabilidad Ambiental	0,6	0,6	0,4
	<b>100%</b>	<b>Total de ponderación</b>	<b>2,80</b>	<b>3,15</b>	<b>3,00</b>

Fuente: Elaboración propia

De las 20 iteraciones realizadas, variando el valor de ponderación de los diferentes factores se obtiene como resultado que: trece veces (13) veces el sistema intermodal carretero – férreo obtiene la mayor calificación, cuatro (4) veces el sistema carretero – fluvial obtiene la mayor calificación, dos (2) veces el sistema carretero obtiene la mayor calificación y una (1) vez el sistema carretero – férreo y carretero fluvial obtienen la misma calificación superando al modo carretero.

**Tabla 24. Sistema de Transporte con mayor calificación**

Alternativa	Número de veces con mayor calificación
Carretero	2
Carretero – Férreo	13
Carretero – Fluvial	4
Empate	1

Fuente: Elaboración propia

La ocasión en la cual el modo carretero obtiene la mayor calificación, ocurre cuando al factor de costo/ton/Km se le asigna un ponderación menor del 15%.

## Capítulo 4

### Conclusiones

- Según el modelo de costos de transporte, el costo Tn/Km de transporte de petróleo de la Altillanura a Cartagena por modo carretero está entre \$131 y \$119. Siendo el más económico el corredor 13 “Pto.Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja – - Tunja - Barbosa - Pto. Araujo - Cartagena”, con un costo Ton/Km de \$119
- Así mismo, según el modelo de costos de transporte, el costo Tn/Km de transporte de petróleo de la Altillanura a Cartagena en sistema intermodal Carretero – Férreo está entre \$104,59 y \$77,44. Siendo el corredor más económico el corredor No. 10, con un costo Ton/Km de \$77.44, el cual contempla los siguientes tramos:

Tramo Carretero: Pto.Gaitán – Aguazul – Sogamoso – Tunja (320 Km)

Punto de Inter cambio Moda: Tunja

Tramo Férreo: Tunja –Puerto Seco en Cartagena (1.115 Km)

Tramo Carretero: Puerto Seco en Cartagena– Zona Portuaria de Cartagena (20 Km)

- De otra parte, según el modelo de costos de transporte, el costo Tn/Km de transporte de petróleo de la Altillanura a Cartagena en sistema intermodal Carretero – Fluvial está entre \$107,05 y \$66,19. Siendo el corredor más económico el corredor No. 1, con un costo Ton/Km de \$66,19, el cual contempla los siguientes tramos:

Tramo Carretero: Pto.Gaitán – Villavicencio- Bogotá – Villeta – Puerto Salgar (444 Km)

Punto de Intercambio Modal: Puerto Salgar

Tramo Fluvial: Puerto Salgar – Zona Portuaria de Cartagena (934 Km)

- Con los sistemas de transporte intermodal férreo y fluvial se obtienen ahorros en los costos de transporte del 35% y del 42% respectivamente

- Los resultados del modelo, permiten identificar que el mayor o menor costo \$/Tn/kM en sistema intermodal están en función de la longitud recorrida en modo fluvial o férreo, ya que a mayor distancia recorrida en estos modos, el costo baja, y a mayor distancia recorrida en modo carretero los costos se incrementan.
- Bajo los considerandos del presente trabajo, se obtiene que el sistema de transporte intermodal carretero - férreo es competitivo para distancias superiores a los 320 Km.
- Como resultado de los análisis multicriterio, el sistema intermodal carretero-férreo es el sistema de transporte a recomendar para el transporte del petróleo de la Altillanura a Cartagena.
- El transporte fluvial y el férreo son sistemas de transporte masivo de cargas que propician su utilización, aprovechando sus ventajas de menores costos unitarios y mayor capacidad de transporte.
- Las ventajas de los sistemas masivos de transporte de carga deben estar complementadas con niveles de servicio que ofrezcan regularidad, confiabilidad y continuidad, de los cuales en la actualidad adolecen el modo férreo y fluvial de Colombia.
- Colombia requiere desarrollar e implementar sistemas de transporte intermodal que incluya modos de transportes como el ferroviario y el fluvial, acompañados de una adecuada infraestructura vial y del desarrollo de puntos de intercambio modal.
- En este contexto, sólo una intervención decidida de los diferentes actores puede orientar la dinámica del sector transportes hacia modelos intermodales de mayor eficiencia y sostenibilidad a medio y largo plazo.

## Bibliografía

- Agencia Nacional de Infraestructura ANH. (2009). *Colombia: Petróleo y Futuro*. Bogota, Colombia: ANH.
- Ballou, R. (2004). *Business Logistics/Supply Chain Management*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Bergqvist, R., & Behrends, S. (2011). Assessing the effects of longer vehicles: The case of pre-and post-haulage in intermodal transport chains. (Routledge, Ed.) *Transport Reviews* , 31 (5), 591-602.
- Bergqvist, R., Falkemark, G., & Woxenius, J. (2010). Establishing intermodal terminals. (I. Publishers, Ed.) *World Review of Intermodal Transportation Research* , 3 (3), 285-302.
- Castro Gonzáles, M., & Macías Colmenares, A. (2004). CASTRO, G. M.; MACÍAS, C. A. *Estudio del comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y reológicas de mezclas de crudo y su relación con la compatibilidad*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Chiriboga Pinos, J. (2007). *Propuesta de Explotación y manejo de crudos pesados, Petroproducción - Campo Oglan*. Quito: Instituto de Altos Estudios Nacionales.
- Ecopetrol. (s.f). Recuperado el 16 de Octubre de 2014, de <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/sumundo2.htm>
- EPYPSA; Ministerio de Fomento España. (2008). *Metodología para la evaluación previa de actuaciones en el sistema de transportes*.
- Escudero, A., Delgado, M., Muñozuri, J., & Onieva, L. (2007). Modelo de ayuda a la decisión en transporte intermodal. *International Conference on Industrial Engineering & Industrial Management*, (págs. 1859-1868). Madrid.
- Feo-Valero, M., Garcia Menendez, L., & Saez Carramolino, L. (2010). The Importance of de inland leg of containerised maritime shipments: An analysis of modal choice determinants in Spain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* , 47 (4), 446-460.
- Feria Rios, R. (2010). *Estudio de las alternativas de intercambio modal de mercancías y su posible implantación en el entorno de Barcelona*. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Flodén , J. (2007). *Modelling Intermodal Freight Transport: The Potential of Combined Transport in Sweden*. Göteborg : BAS Publishing.
- Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: , 12 (1)*, 33-44.
- Konings, R. (2009). *Intermodal Barge Transport: Network Design, Nodes and Competitiveness*. The Netherlands.
- Kreutzberger, E., Macharis, C., & Woxenius, J. (2006). Intermodal versus unimodal road freight transport : a review of comparisons of the external costs. *Towards better performing transport networks , 17-42*.
- Limbourg, S., & Jourquin, B. (2009). Optimal rail-road container terminal locations on the European network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review , 45 (4)*, 551-563.
- Lowe, D. (2005). *Intermodal Freight Transport*. Burlington: Elsevier.
- Macharis, C., & Bontekoning, Y. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of operational research , 153 (2)*, 400-416.
- Ministerio de Fomento España. (2003). El lenguaje del transporte intermodal. *Estudio de Análisis, información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la intermodalidad , 1-44*.
- Ministerio de Fomento España. (2003). El transporte por carretera y la intermodalidad. *Estudio de Análisis, información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la intermodalidad .*
- Naciones Unidas. (1981). Convenio sobre el Transporte Multimodal Internacional de Mercancías. *Conferencia de Naciones Unidas (págs. 5-15)*. New York: Naciones Unidas.
- Pels, E., & Piet, R. (2008). Cost functions in transport. En K. Button, & D. Hensher, *Handbook of Transport Modelling (págs. 381-394)*. Amsterdam: Pergamon.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2009). *The geography of transport systems*. London: Routledge.
- Sandberg Hanssen, T.-E., & Mathisen, T. A. (2011). Factors facilitating intermodal transport of perishable goods - transport purchasers viewpoint. *European Transport , 49*, 75-89.
- Sandberg Hanssen, T.-E., Mathisen, T. A., & Jørgensen, F. (2012). Generalized transport costs in intermodal freight transport. *Social and Behavioral Sciences 54 , 189-200*.

- Stokland , Ø., Sund, A. B., & Netland, T. H. (2010). Challenges in Intermodal Logistics networks and Terminals - A Norwegian viewpoint. *WCTR*, (págs. 1-20). Lisboa.
- Tsamboulas, D. (2008). Development strategies for intermodal transport in Europe. En *The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design an Policy* (pág. 31).
- United Nations; Economic Comission for Europe. (2000). *Terminology on combined Transport*.
- Van Klink, H., & Van Den Berg, G. (1998). Gateways and intermodalism. *Journal of Transport Geography* , 6 (1), 1-9.
- Woxenius, J., & Bärthel, F. (2004). Developing intermodal transport for small flows over short distances. *Transportation planning and technology* , 27 (5), 403-424.
- Woxenius, J., & Bärthel, F. (2008). Intermodal road–rail transport in the European Union. *The Future of Intermodal Freight Transport, Concepts, Design and Implementation* , 13-33.