

MODELACIÓN DE CORREDORES DE TRANSPORTE SINCROMODAL. CASO
VALLE DEL RÍO MAGDALENA

CARLOS MARIO CAMACHO SARMIENTO

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS: INGENIERÍA DE TRANSPORTE



UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
DICIEMBRE DE 2020

MODELACIÓN DE CORREDORES DE TRANSPORTE SINCROMODAL. CASO
VALLE DEL RÍO MAGDALENA

CARLOS MARIO CAMACHO SARMIENTO

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS: INGENIERÍA DE TRANSPORTE

DIRECTOR: Ph. D. VÍCTOR CANTILLO MAZA
CODIRECTOR: Ph. D. JULIÁN ARELLANA OCHOA
CODIRECTOR: Ph. D. CESAR HENAO BOTERO



UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
DICIEMBRE DE 2020

Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS	3
1.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3.	ESTRUCTURA	5
2.	REVISIÓN DE LA LITERATURA	6
2.1.	TRANSPORTE SINCROMODAL	13
2.2.	NIVELES DE PLANIFICACIÓN EN EL TRANSPORTE INTERMODAL.....	17
2.2.1.	Planificación estratégica.....	17
2.2.2.	Planificación táctica/operacional	18
2.3.	DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE DE CARGA	19
2.4.	DISEÑO DE REDES DE SERVICIOS.....	22
2.4.1.	Representación red espacio - tiempo.	25
2.4.2.	Representación del tiempo	26
2.5.	CONTRIBUCIÓN DE ESTA INVESTIGACIÓN	26
3.	MODELOS DE PROGRAMACIÓN DE SERVICIOS MULTIPRODUCTO PARA TRANSPORTE SINCROMODAL.....	28
3.1.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	28
3.1.1.	Supuestos del modelo	30
3.1.2.	Representación de la demanda.....	31
3.2.	MODELO MATEMÁTICO PARA LA PROGRAMACIÓN DE SERVICIOS EN EL TRANSPORTE SINCROMODAL.....	32
3.2.1.	Notación	33
3.2.2.	Configuración de la red	37
3.2.3.	Representación espacio-tiempo: enfoque tiempo discreto- continuo	39
3.2.4.	Función objetivo y restricciones.....	40
4.	CASO DE ESTUDIO: CORREDOR DE CARGA VALLE DEL RIO MAGDALENA.....	49
4.1.	Transporte multimodal en Colombia	49
4.2.	Red de transporte: Valle del río Magdalena	50
4.3.	Parámetros de entrada	52
4.3.1.	Demanda	53
4.3.2.	Capacidad de los modos disponibles	54

4.3.3.	Distancias y tiempos de viaje	54
4.3.4.	Costos fijos y variables	55
4.3.5.	Costos de transbordo	55
4.3.6.	Costos externalidades	55
4.4.	Horizonte de planificación	56
5.	RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS Y EXPERIMENTOS.....	57
5.1.	Análisis preliminar y método de solución	57
5.2.	Escenarios y experimentos.....	57
5.2.1.	Definición de los escenarios.....	58
5.2.2.	Definición de los experimentos.....	58
5.3.	Resultados	59
5.3.1.	Evaluación del impacto de las externalidades.	62
5.3.2.	Evaluación del cambio modal y asignación de la carga.....	63
6.	CONCLUSIONES	67
7.	ANEXOS	73
7.1.	ANEXO A: PARÁMETROS DE ENTRADA	73
7.2.	ANEXO B: MODELO AMPL	76
7.3.	ANEXO C: RESULTADOS NEOS SERVER.....	77

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de mercancías es una actividad esencial para la subsistencia de un mundo altamente conectado y globalizado; haciendo posible el desarrollo de actividades económicas y socioculturales. Sin embargo, la demanda de los consumidores finales se encuentra separada geográficamente de los productores de la carga. En consecuencia, el transporte de carga representa una parte significativa de los costos de los productos, así como los gastos nacionales en logística para cualquier país (Crainic, 2000).

En el transporte de carga internacional, los grandes puertos marítimos típicamente actúan como puertas para las cargas de exportación e importación de las diferentes zonas de producción o consumo. En Colombia, y particularmente en la región Caribe, se encuentran los puertos públicos de Cartagena, Barranquilla y Santa Marta. En el país, las distintas zonas geográficas son atendidas por terminales terrestres que pueden utilizar uno o más modos de transporte; a su vez, tales terminales están conectadas con las terminales marítimas funcionando como nodos de origen y destino de carga. Un transporte de carga más eficiente y sustentable beneficiará a todos los participantes de la cadena de transporte. Es decir, las terminales marítimas tendrán mayor competitividad, los transportadores reducirán sus costos, los productores tendrán menores costos y mayores niveles de servicio, y la sociedad en general contará con un sistema de transporte más sostenible (Li et al., 2015).

Durante las últimas décadas se ha evidenciado un aumento del comercio internacional y la demanda de carga, teniendo en cuenta que para 1990 un contenedor era cargado y descargado aproximadamente 14 veces, mientras en 2010 se realizaba cada 19 veces (Naciones Unidas, 2011). Sin embargo, la capacidad de la infraestructura actual es limitada, por lo que la presión se ha dirigido a reducir los costos de operación, niveles de contaminación y mejorar los niveles de servicios. Como solución los productores, transportadores y operadores logísticos han encontrado en el transporte intermodal una alternativa que les permite minimizar estos impactos.

El transporte intermodal sostiene la promesa de superar el transporte de carga a través de camiones en las terminales de contenedores terrestres en aspectos de eficiencia, sostenibilidad, confiabilidad entre las incertidumbres de planeación (Macharis & Bontekoning, 2004; SteadieSeifi et al., 2014). En consecuencia, se ha registrado un crecimiento del volumen de carga movilizado desde un sistema unimodal de transporte (e.g. camiones) a varios modos de transportes (e.g. transporte intermodal) (Crainic, 2007). Lo anterior, ha conllevado a grandes modificaciones en las terminales marítimas, así como el desarrollo de mejoras de la infraestructura de los diferentes modos de transporte.

A pesar de estos esfuerzos, el cambio desde el modo carretero ha sido limitado, principalmente porque el transporte intermodal es menos ágil y flexible en reaccionar a las dinámicas del sistema transporte de carga (Zhang & Pel, 2016). Asimismo, los avances a nivel operacional y los desarrollos conjuntos de la infraestructura no han sido los esperados, por lo que el funcionamiento de la cadena de transporte no ha sido la mejor. Por lo tanto, esto ha llevado a que los puertos sean menos competitivos para los transportadores de la carga (Behdani et al., 2016). Por otro lado, los productores prefieren el transporte carretero convencional debido a gran medida a la mala

concepción de un impacto por los bajos niveles de servicio del transporte intermodal. (Woodburn, 2007).

Una de las nuevas soluciones planteadas es encontrar un transporte más cooperativo e integrado para así realizar una utilización más eficiente de los recursos (SteadieSeifi et al., 2014). Con el propósito de cumplir estos objetivos, el transporte sincromodal se presenta como una alternativa para alcanzar un sistema de transporte más flexible y eficiente. Este concepto es la más reciente etapa de evolución del transporte multimodal (Ambra et al., 2018) y ha sido objeto de intereses de los investigadores con el objetivo de afianzar y materializar esta nueva metodología.

El transporte sincromodal de carga avanza un paso hacia adelante con respecto al transporte de carga intermodal adoptando un concepto de libertad modal y permitiendo la programación de transbordos entre los modos disponibles de acuerdo a la información en tiempo real durante el proceso de transporte de carga (van Reissen et al., 2015a, van Reissen et al., 2015b). La idea principal en el transporte sincromodal es la minimización de los costos, tiempos e impactos medioambientales integrando la capacidad de los vehículos, modos de transporte y la demanda (Resat & Turkay, 2019). El concepto de tiempo real tiene la capacidad de manejar los cambios ocasionados por sucesos inesperados, como las eventualidades o nuevos requerimientos (Bock, 2010).

Un sistema de transporte más robusto introduciendo la flexibilidad operacional implica una red en capacidad de afrontar eventualidades o interrupciones que puedan comprometer la operación del sistema (i.e. congestión, desastres naturales, accidentes sobre la infraestructura). Si la red que se diseña es lo suficientemente robusta puede absorber esas eventualidades a través de un intercambio modal o aumento de los servicios. Pero si no es lo suficientemente flexible se puede comprometer la operación de la red y disminuir los niveles de servicios. Estas interrupciones en la red usualmente buscan soluciones de último momento que son generalmente costosas, por lo que la aplicación de medidas preventivas o un sistema colaborativo e integrado en el diseño de la red puede reflejar resiliencia y confiabilidad en la red por lo que aumenta la competitividad del sistema (SteadieSeifi et al., 2014).

Una de las oportunidades que presenta el transporte sincromodal es la realización de una integración en múltiples niveles de planificación, suministrando sistemas de transporte más sustentables, confiables y flexibles, por lo que se generan soluciones más eficientes para los operadores y transportadores. La colaboración mejora la confiabilidad del sistema con una disminución en los tiempos de entrega, además reduce el comportamiento independiente de los actores que conlleva a una asimetría de la información, incurriendo en un bajo rendimiento en la cadena de transporte. Consecuentemente, la ventaja de utilizar varios modos permite explotar una integración óptima del transporte carretero, fluvial y férreo. Desde este punto de vista, el beneficio de un óptimo cambio modal se puede alcanzar con una adecuada sincronización e integración de la red (Marquez & Cantillo, 2013). En el contexto colombiano, la sincromodalidad es una alternativa a la gran dependencia que tiene el país del transporte carretero y disminuir los costos logísticos.

1.1. OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

El objetivo de esta investigación es indagar en los posibles beneficios que tendría un sistema de transporte sincromodal en contraste a un transporte tradicional como lo son el transporte intermodal o transporte unimodal. En nuestro planteamiento, modelamos los costos sociales (incluyendo costos privados logísticos y externalidades) en una red de transporte sincromodal y determinamos las implicaciones en introducir los elementos de esta nueva metodología en economías en desarrollo tomando como ejemplo el contexto colombiano.

Con el propósito de alcanzar esta finalidad, proponemos una formulación para el diseño de programación de redes de servicios en un sistema de transporte sincromodal incluyendo los siguientes aspectos: en primer lugar, un enfoque multiproducto con diferentes requerimientos para las ordenes de carga (i.e. origen-destino y rango de entrega), permitiendo la aglomeración y distribución de la carga. Además, abarcamos dos tipos de penalidades: en terminales ocasionadas por la llegada de los vehículos fuera de operación de la terminal y por incumplimiento en la entrega pactada para las ordenes de carga.

El modelo propuesto involucra restricciones de capacidad tanto en los vehículos y terminales que permite optimizar la utilización de los modos y simule la operación de las terminales de transbordo respectivamente. Por último, agregamos la sincronización en el intercambio con los diferentes modos dependiendo de los requerimientos de la demanda y los recursos disponibles.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Cada vez más la preocupación por la disminución de los niveles de servicio, pérdida de confiabilidad y aumentos en los impactos medioambientales ha incentivado una gran cantidad de inversión en recursos para mitigar estas problemáticas. El aumento del transporte de carga por camiones tiene un impacto medioambiental significativo, no solo en términos de congestión sino también en emisiones por tipología de vehículos, si se estima que un contenedor produce 5.6 g CO₂/ton/km para embarcaciones pequeñas mientras para camiones produce 155 g CO₂/ton/km (Liao et al., 2009). Teniendo en cuenta que estos efectos causados por las externalidades (e.g. emisiones, congestión) no son directamente pagados por el transporte carretero, ocasionan que otros modos de transporte más amigables medioambientalmente terminen siendo menos competitivos. Esto ha conllevado a que muchos gobiernos, como es el caso de países en Europa, le impongan más impuestos a este tipo de modo, encareciendo aún más la operación del transporte de carga (European Comission, 1996). Nuevas políticas e impuestos hacia las compañías transportadoras se han proporcionado para obtener soluciones de transporte más sustentable (SteadieSeifi et al., 2014).

El total de emisiones de CO₂ en el sector de transporte alcanza alrededor del 28% de las emisiones en la Unión Europea. Por lo que una reducción significativa en el sector transporte implicaría una reducción igual de impactante en las emisiones totales. Las principales externalidades que influyen en el transporte de carga son las emisiones de CO₂ y otros gases, ruidos, impacto urbanístico y accidentalidad. Para los tres principales modos de transporte, las externalidades (sin incluir la

congestión) están estimadas en 19€ por 1.000 ton-km para férreo, 17€ por 1.000 ton-km para fluvial y 88€ por 1.000 ton-km para carretero (European Commission, 2011). Un cambio modal del transporte carretero en favor a otros modos más amigables medioambientalmente puede generar entonces una disminución de las externalidades. Este cambio también permitiría una reducción de la congestión de las carreteras en el sistema de transporte, teniendo en cuenta que la congestión no solo afecta la tranquilidad de las personas, sino que además representa una disminución de la productividad de una economía. Esta motivación es particularmente relevante en Colombia, donde los costos logísticos son muy superiores a los de países con economías similares (World Economic Forum, 2019).

Durante varias décadas, diferentes terminologías para el intercambio modal desde el transporte de carga por camiones han circulado en la literatura y en la industria: multimodalidad, intermodalidad, co-modalidad, y más recientemente sincromodalidad (StadieSeifi et al., 2014). El concepto de sincromodalidad ha ido ganando relevancia en términos de mitigar los impactos medioambientales y mejorar la utilización de los recursos sin sacrificar niveles de servicio. Esta metodología avanza en términos de economías de escalas alcanzando menores costos logísticos y emisiones atmosféricas con respecto al transporte intermodal (Zhang & Pel, 2016). Durante esta investigación, abordaremos un enfoque matemático aplicado a un corredor de carga sincromodal, teniendo en cuenta la demanda, recursos disponibles, restricciones de operación y penalidades. Este nuevo enfoque puede proporcionar un mayor nivel de cooperación y coordinación entre los diferentes actores en la cadena de transporte para economías en desarrollo tomando como contexto el caso de Colombia.

Debido a las condiciones geográficas, geomorfológicas (i.e. ríos, relieve) y potencial del suelo, Colombia presenta oportunidades para incrementar su competitividad utilizando diferentes modos de transporte más eficientes y amigables que permitan optimizar sus redes y sistemas de transporte de carga que actualmente se encuentran monopolizados y subutilizados con pocas posibilidades de intercambio modal. En general, se tiene el supuesto que para el transporte intermodal sea aplicable se necesitan distancias mayores de 300 km (European Commission, 2011). Mientras, para distancias menores de 300 km deja de ser competitivo con el transporte unimodal (e.g. camiones) por los altos costos y tiempos de transbordo. Esto se explica principalmente porque el uso de las redes ferroviarias y los canales navegables no pueden compensar el transbordo tanto en costos como en tiempo (Zhang & Pel, 2016).

En este contexto, la presente investigación utilizará como corredor multimodal del valle del río Magdalena (centro-norte del país) que tiene como canal navegable una longitud aproximada de 650 km, la red férrea del Atlántico y las concesiones viales denominadas “Ruta del Sol”, permitiendo condiciones favorables para el intercambio modal. Este corredor conecta las principales zonas de producción en el centro de Colombia con los puertos marítimos del Caribe Colombiano ubicados en las ciudades: Cartagena, Santa Marta y Barranquilla.

En nuestra investigación, con el propósito de realizar una formulación que incluya diferentes aspectos del transporte sincromodal, se incluyeron diferentes supuestos que se exponen a continuación. Primero, el modelo supone un algo grado de cooperación y colaboración, por lo que la toma de decisiones dentro de la formulación es realizada por un solo agente que tiene simetría

en la información de manera real y actualizada sobre la red, y está en la capacidad de organizar los diferentes actores en la cadena de transporte, tales como, operadores de transporte para los diferentes modos, operadores de las terminales y administradores de la infraestructura. Segundo, se conoce *a priori* los requerimientos de las ordenes de carga y los tiempos de viajes de los vehículos, según la dinámica entre cada una de las zonas del caso de estudio, por lo que se presenta un enfoque determinístico. Tercero, para el medio carretero, se incluye un único servicio que representa en cada unidad un vehículo tipo camión, por lo que para los modos de transporte considerados hay un número reducido de servicio dentro de la red. Por último, no se incluyen la cogestión en los arcos, por lo que las externalidades asociadas al transporte de carga son las referentes a las emisiones atmosféricas según la tipología de los modos de transporte.

Por último, se aclara que el alcance en esta investigación solo se limita a formular el transporte tipo *long haul* (i.e transporte entre terminales), excluyendo el *pre-end haul* o *drayage* (i.e. alimentación de las terminales y entrega final), por lo que se enfoca en el transporte de carga entre las terminales terrestres y las terminales marítimas. Para más información, En Pérez Riviera & Mes (2019) los autores indagan sobre la integración del transporte entre terminales y la etapa de alimentación y distribución en el transporte sincromodal. Por último, se agrega que condiciones como la integración del transporte público en los diferentes modos, también están fuera del alcance de esta investigación, y se proponen como futuros temas para integrar en el transporte sincromodal.

1.3. ESTRUCTURA

La estructura de esta investigación sigue un enfoque clásico. Primero, una introducción del problema general y las necesidades de un transporte sincromodal en el contexto actual del comercio internacional. Luego, una revisión del estado de la literatura en los diferentes niveles de planificación, con una presentación del marco metodológico. Posteriormente, se enfoca en la formulación del modelo matemático, con una descripción de la red de servicios dependiente de tiempo y los parámetros de la demanda. Más adelante, desarrolla la descripción del caso de estudio con los diferentes escenarios propuestos. Luego, se presentan los resultados para cada uno de los escenarios y comparación entre estos mismos. Por último, resume las principales conclusiones y directrices para las próximas investigaciones.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El transporte intermodal ha llamado la atención de muchos investigadores durante las últimas décadas, por lo que se han realizado diferentes revisiones del estado de arte a lo largo de los años. Para los años 2000 al 2010, en primer lugar, Macharis & Bontekoning (2004) realizaron una extensa revisión de la literatura del transporte intermodal para los diferentes operadores incluyendo los tres niveles de planificación, así como los métodos de solución para cada uno hasta el año 2004. Luego, Bektas & Crainic (2007) describen el desarrollo y evolución del transporte intermodal desde una perspectiva de los transportadores y productores de la carga también incluyendo los tres niveles de planificación. Igualmente, Christiansen et al. (2007) hacen una descripción detallada de las características, formulaciones y desafíos del transporte intermodal marítimo. Siguiendo esta línea, Crainic & Kim (2007) se enfocan en una revisión de la literatura del diseño de las redes de servicio en el transporte intermodal.

Más recientemente para el año el 2010 hasta el 2019, SteadieSeifi et al. (2014) realizan una investigación de la literatura del transporte intermodal desde el 2005 hasta el 2013 abordando diferentes conceptos como intermodal, multimodal, co-modalidad hasta sincromodalidad para los diferentes niveles de planificación. Entretanto, Ambra et al. (2019) realizan una comparación de las investigaciones y potenciales aplicaciones de las nuevas metodologías para el transporte de carga como lo son el transporte sincromodal y el internet físico cubriendo el periodo del tiempo hasta el 2018. A su vez, Pfoser et al. (2016) y Giusti et al. (2019) realizan una investigación de factores críticos de éxitos (CSF) para garantizar la efectiva implementación de la sincromodalidad, determinando los principales actores, factores, metodologías y tecnologías, así como casos de aplicación para el transporte sincromodal.

Las diferentes investigaciones que muestran la evolución de la intermodalidad hacia sincromodalidad están resumidos en la Tabla 1. Cada artículo está descrito en 12 columnas que representa las siguientes características:

1. *Tipo de decisión*. Indica cual es el resultado final de cada investigación, PRM: Problema de rutas mínimas; DRS: Diseño de redes de servicio; AF: Asignación de Flujos; BF: Balance de flota; DF: Diseño de la flota; PLC: Problema de localización de contenedores; PRV: Problema de ruteo de vehículos.
2. *Función objetivo*. Indica cuales son las variables más importantes consideradas dentro de cada formulación: CO: Costos operacionales; GN: Ganancia Monetaria; CV: Capacidad del vehículo; TV: tiempo de viajes; TR: Transbordo; PN: Penalidades por entrega; IN: Inventario; CO2: emisiones atmosféricas; DM: Movimiento *drayage*; CG: Congestión.
3. *Método*. Indica cual es el tipo de enfoque de solución: PLEM: Programación lineal entera mixta; PNLEM: Programación No lineal entera mixta; PS: Programación Estocástica; PDM: Proceso de decisión markoviano; PDA: Programación dinámica aproximada; PC: Programación cuadrática; MH: Metaheurística; SM: Simulación.
4. *Flujo*. Indica la configuración de la topología dentro de la red, si es trata de Arc: Arcos, Path: recorridos o *cycle*: ciclos.

5. *Tiempo*. Indica el enfoque del tiempo dentro de la red espacio-tiempo, si es discreto, continuo o discreto-continuo
6. *Modos*. Indica la tipología de vehículos utilizados en la formulación, C: camiones; T: tren; B: barcas; H: Homogéneo.
7. *Aglomeración de carga*. Indica si el modelo considera consolidación o repartición de las ordenes de carga.
8. *Transbordo*. Indica si la formulación considera transbordo entre los diferentes modos de transporte.
9. *Sincronización entre servicios*. Indica si dentro programación de servicios se tiene en cuenta la secuencia temporal entre los diferentes despachos para las distintas ordenes de carga.
10. *Planificación*. Indica el nivel de planificación planteado dentro del alcance de la formulación del problema. táctico, operacional o Táctico/operacional.
11. *Aplicación*. Indica el tipo de red utilizada para la formulación de la investigación. RI: Redes intermodales; RIR: Redes interregionales; RT: Redes transporte. Además, especifica el tipo de enfoque de aplicación. CE: Caso de Estudio; NE: Experimento numérico.
12. *Referencia*. Indica la cita de cada investigación.

Tabla 1 Revisión de los artículos sobre Intermodalidad y Sincromodalidad

Tipos de Decisión	Función Objetivo	Método	Flujo	Tiempo	Modos	Aglomeración carga	Transbordo	Sincronización entre servicios	Planificación	Aplicación	Referencia
PRM	Min (TV+TR)	PLEM	Path	Discreto	H	No	No	No	Táctico	RI+NE	(Ziliaskopoulos & Wardell, 2000)
DRS	Min(CO)	PL	Path	Discreto	C,T	No	No	No	Táctico	RI+NE	(Crainic, 2007)
DRS+DM	Min (CO+TR)	PLEM	Arc	Discreto	C,T	Si	Si	Si	Táctico	RI+NE	(Perdersen & Crainic, 2007)
DRS+MP+BF	Min(CO)	BT	Arc, Cycle	Discreto	H	Si	No	No	Táctico	RT +NE	(Perdersen et al., 2009)
DRS	Min(CO)	PS	Path	Discreto	H	Si	No	No	Táctico	RT+NE	(Lium et al., 2009)
PRV	Min(CO+TR+PN)	SM	Path	Continuo	H	Si	Si	No	Operacional	RT+NE	(Bock, 2010)
DRS+BF	Min(CO)	PLEM	Arc, Path y Cycle	Discreto	H	Si	No	No	Táctico	RT+NE	(Andersen et al., 2009a)
DRS+MP+BF	Min (CO+TR)	PLEM	Arc	Discreto	H	Si	Si	No	Táctico	RIR+CE	(Andersen et al., 2009b)
DRS+DF	Max(GN+CV)	PNLEM	Path	Continuo	T	Si	No	Si	Táctico	RIR+CE	(Andersen & Christiansen, 2009)
DRS+MP+BF	Min(CO+TR+BF)	PLEM	Arc	Continuo	B	Si	Si	Si	Táctico	RT+NE	(Sharypova et al., 2012)
PLC	Min(CO+TR+PN)	PL	Path	Discreto	C,T,B	Si	Si	No	Táctico	RIR+CE	(van Reissen et al., 2015a)
DRS	Min(CO+TR+PN)	PLEM	Path	Discreto	C,T,B	Si	Si	No	Táctico	RIR+CE	(van Reissen et al., 2015b)
PLC	Min(CO+TR+PN)	PLEM+SM	Arc	Discreto	C,T,B	Si	Si	No	Táctico	RIR+CE	(Li et al., 2015)
PLC	Max(GN)	PS+MH	Arc	Estático	C,T,B	Si	No	No	Táctico/Operacional	RIR+CE	(Xu et al., 2015)
PRM	Min(CO+PN+CO ₂)	SM	Path	Continuo	T,B	Si	Si	Si	Operacional	RI+CE	(Mes & Iacob, 2016)
DRS+MP	Min(CO+PN)	PLEM	Arc	Discreto/Continuo	C,T,B	Si	No	No	Táctico/operacional	RI+CE	(Behdani et al., 2016)
DRS+MP	Min(CO+PN)	PLEM	Arc	Discreto/Continuo	C,T,B	Si	No	No	Táctico/operacional	RI+CE	(Agbo & Zhang, 2017)

Tipos de Decisión	Función Objetivo	Método	Flujo	Tiempo	Modos	Aglomeración carga	Transbordo	Sincronización entre servicios	Planificación	Aplicación	Referencia
PRM+AF	Min(CO+TR+CO ₂)	SM	Path	Continuo	C,T,B	Si	Si	Si	Operacional	RI+CE	(Zhang & Pel, 2016)
AF	Min(CO)	PDM+PDA	Arc	Discreto	C,T,B	Si	No	No	Táctico/operacional	RI+NE	(Perez Riviera & Mes, 2017)
PLC	Min(CO,PN)	PC+SM	Arc	Discreto	C,T,B	Si	No	No	Táctico	RIR+CE	(Li et al., 2017)
PLC	Max(GN,CV)	PDM	Arc	Discreto	C,T,B	Si	No	No	Operacional	RIR+CE	(van Riessen, et al., 2017)
AF	Min(CO+CO ₂)	SM	Arc	Continuo	C,T	Si	No	No	Operacional	RI+NE	(Farahani et al., 2018)
AF	Min(CO+TR)	SM	-	Discreto	C,T,B	Si	Si	Si	Operacional	TI+NE	(Lemos Nabais et al., 2018)
AF	Min(CO+IN+CO ₂)	SM	-	Discreto	C,T	Si	No	No	Operacional	TI++CE	(Dong et al., 2018)
AF	Min(CO+TV+CO ₂)	SM	Arc	Continuo	C,T,B	Si	Si	Si	Operacional	RIR +CE	(Ambra et al., 2019)
DRS	MIN(CO+TR)	PLEM+MH + PDM+PDA	Arc	Discreto	C,T,B	Si	Si	Si	Táctico/Operacional	Ri+NE	(Perez Riviera & Mes, 2019)
DRS+IN	Min(CO+TV+CO ₂)	PNLEM	Arc	Discreto	C,T,B	Si	Si	Si	Táctico/Operacional	RI+CE	(Resat & Turkay, 2019)
AF+IN	Min(CO+TR)	SM	Path	Discreto	C,T,B	Si	Si	No	Operacional	RI+NE	(Lemmens et al., 2019)
DRS	Min(CO+TR+PN)	PLEM	Arc	Continuo	C,T,B	Si	Si	Si	Operacional	RIR+CE	(Qu et al., 2019)
DRS	Min(CO+TR+PN+CO₂)	PLEM	Arc/path	Discreto/Continuo	C,T,B	Si	Si	Si	Táctico/Operacional	RI+CE	Nuestro modelo

Fuente: Elaboración propia

En la *Tabla 1* se evidencia un gran flujo de investigaciones con el propósito de mejorar o adaptar las aplicaciones del transporte sincromodal a los diferentes contextos de operación en el transporte de carga. Sin embargo, se identificaron diferentes vacíos que pueden ser producto de nuevas investigaciones para integrar el transporte sincromodal en el comercio internacional.

Primero, muchos enfoques se han realizado para resolver problemas de diseños de redes de servicio para grandes corredores de transporte de carga. Los modelos dependientes del tiempo han ganado especial relevancia gracias a su capacidad de modelar casos cotidianos en el transporte de carga. La concepción del tiempo se puede manejar de tres formas. En primer lugar, se emplean modelos con una discretización del tiempo en intervalos (Ziliaskopoulos & Wardell, 2000; Andersen et al., 2009b, 2009a; Crainic, 2007; Li et al., 2015; Lium et al., 2009; Perderson et al., 2009; Perderson & Crainic, 2007; Perez Riviera & Mes, 2017, 2019; Resat & Turkay, 2019; van Reissen et al., 2015a, 2015b), mientras otra perspectiva utiliza un marco continuo de tiempo durante el horizonte de planificación (Ambra et al., 2019; Andersen & Christiansen, 2009; Bock, 2010; Farahani et al., 2018; Mes & Iacob, 2016; Qu et al., 2019; Sharypova et al., 2012; Zhang & Pel, 2016). Entre estos dos enfoques, una discretización del tiempo es preferida en las investigaciones debido al gasto computacional que presenta manejar un enfoque continuo en horizonte planificación extensos. Debido a lo anterior Behdani et al. (2016) utilizan una tercera aproximación que consiste en un enfoque combinado limitando el marco del tiempo continuo en intervalos haciendo más manejable el horizonte de planificación. Sin embargo, en su investigación, se limitan a incluir solo los costos privados sin la inclusión de transbordos, sincronización de servicios e impactos medioambientales.

Segundo, la integración de los eventos a tiempo real es un aspecto fundamental para aumentar la resiliencia del sistema de transporte. Con este propósito, Bock (2010) presenta un enfoque de control en tiempo real teniendo en cuenta una consolidación eficiente y transbordos, permitiendo integrar las interrupciones en sistema de transporte (e.g. problemas en la flota y accidentes). Mientras, van Riessen, et al. (2015a) desarrollan un análisis para determinar el impacto y la distorsión en los sistemas de transporte por los incumplimientos durante la operación en la localización de contendedores en el transporte intermodal, pero con servicios preestablecidos (i.e. frecuencia). Por su parte, Li, et al. (2017) se enfocan en la planificación de cooperación en el transporte de carga sincromodal adoptando un modelo control preventivo (MPC) entre múltiples operadores de transporte intermodal. Entretanto, Ambra, et al. (2019) introducen un modelo computacional en cual integra los movimientos de los diferentes agentes capturando procesos estocásticos para cada modo y una entrega descentralizada, presentando una solución sincromodal flexible en una red afectada por una disrupción con una disminución en los costos e impactos medioambientales. Los autores comprueban que las soluciones dinámicas en el transporte sincromodal generan un sistema más robusto al manejar al eventualidades o interrupciones mejor que las redes estáticas. Sin embargo, estos modelos no tienen en cuenta las algunas de las penalidades que se pueden incurrir en la programación de servicios, ya sean por la entrega de los productos o por operación en las terminales.

Tercero, la estocasticidad de la demanda en la literatura reciente ha sido poco abordada debido a la complejidad en integrarla en grandes redes de transporte con múltiples actores. Lium, et al.

(2009), fueron de los primeros en introducir la estocasticidad de la demanda en los modelos de redes de servicios, proponiendo una programación estocástica para resolver el problema. Mientras, Xu, et al. (2015) investigan el problema de localización de los contenedores para el transporte de carga sincromodal desde una perspectiva de los transportadores e incluyendo la aleatoriedad de la demanda. Li, et al. (2015) realizan un enfoque del horizonte en retroceso (RHC) para la planificación del transporte intermodal de carga de las terminales marítimas con las terminales de transbordo, abordando el comportamiento dinámico de la demanda y los niveles de congestión. Pérez y Mes (2017) proponen un método planeación hacia adelante utilizando programación dinámica aproximada para la planificación de los viajes de ida y vuelta en el transporte intermodal, de acuerdo al conocimiento probabilístico de la demanda para los operadores de los servicios logísticos. A pesar de estas formulaciones, estos modelos no incluyen una sincronización entre diferentes modos de transportes reduciendo la flexibilidad y adaptabilidad de la red de transporte.

Cuarto, desde que se ha aumentado el interés en los beneficios sobre la sincromodalidad varias investigaciones han estado encaminadas en proponer un marco de formulación que permita integrar esta nueva metodología con las redes de transporte actuales. Un aspecto importante es la distribución de las ganancias en el transporte sincromodal, ya que un contexto colaborativo los usuarios necesitan una tarifa definida y a partir de la organización de la cadena se hace necesario establecer cómo será la distribución entre los diferentes participantes. van Riessen, et al. (2017), introducen el problema de clases de tarifas de carga combinadas demostrando que colocando una diferenciación de las tarifas de la carga en la programación de los servicios produce un aumento de las ganancias en una planificación táctica. Un enfoque de tarificación con transbordos y sincronización de servicios es un tema de investigación que poca atención se le ha prestado en la literatura.

Quinto, la sincronización de los diferentes actores genera un entorno más colaborativo e integrado que permite disminuir los costos de sistema, para lograr esto se pueden incluir los manejos de los recursos (e.g. vehículos) en los transbordos. Específicamente en diferentes investigaciones se ha incluido la sincronización entre diferentes modos en el transporte intermodal (Andersen & Christiansen, 2009; Perderson & Crainic, 2007; Sharypova et al., 2012) y sincromodal (Ambra et al., 2019; Mes & Iacob, 2016; Perez Riviera & Mes, 2019; Qu et al., 2019; Resat & Turkay, 2019; Zhang & Pel, 2016). Estas investigaciones presentan un diseño de una red con programación de servicios para transporte intermodal o sincromodal con transbordos, sin embargo, excluyen las penalidades de tiempo por operación dentro de la red de transporte.

Sexto, se han adelantado muchas investigaciones para la operación de las terminales de transbordo en el transporte sincromodal. Mes y Iacob (2016) introducen una definición teórica mucho más amplia sobre sincromodalidad y posibles beneficios del transporte sincromodal, en su estudio proponen un algoritmo multiobjetivo de rutas mínimas para la planificación sincromodal para los operadores de logística de la torre de control, como resultado encontraron una reducción de los costos de transporte y emisiones de CO₂, básicamente por el cambio modal de carretero a férreo en el sur de Europa. Lemos Nabais, et al. (2018) proponen una formulación para la coordinación a tiempo real entre las terminales y los proveedores de transporte para la asignación de carga

utilizando una red de transporte sincromodal. Dong, et al. (2018) presentan una optimización paralela entre el transporte y el inventario, enfocándose en la importancia de considerar las operaciones de sincronización en diferentes niveles y aspectos de la cadena de logística. A pesar de estas investigaciones, en la literatura poco se ha abordado la integración de la operación de las terminales intermodales dentro de una red de transporte sincromodal.

Séptimo, poco se ha estudiado en la integración de alimentación de las terminales (drayage) con los recorridos de largas distancias (long-haul) en el transporte sincromodal. Pedersen y Crainic (2007) fueron de los primeros en agregar movimientos de drayage, costos de transbordo e inventario en un contexto de transporte intermodal. De igual forma, Pérez y Mes (2019) fueron los primeros en introducir esta formulación para el transporte sincromodal. Los autores integran la programación de las operaciones de drayage con los recorridos entre terminales en el transporte sincromodal a través de un proceso simultáneo con programación lineal entera y proceso de decisión Markoviano respectivamente. Estas investigaciones excluyen la integración del efecto de las externalidades dentro de sus formulaciones, que es uno de los mayores beneficios del transporte sincromodal.

Por último, en mayor medida los sistemas buscan integrar nuevas variables y perspectivas con el fin de alcanzar cada vez más sistemas de transporte de carga sostenibles: Los enfoques que plantean la inclusión de las externalidades se concentran en la reducción de dióxido de carbono (CO₂) como dominante y el más grande efecto sobre el medio ambiente, incluyéndolo desde un punto de vista del impacto de la congestión en el sistema o el efecto ocasionado directamente por la tipología de vehículos. Pero en la literatura no ha habido mayor profundización en otras externalidades como accidentalidades o ruidos. Resat y Turkay (2019) utilizando datos de tráfico, flotas y demanda histórico en Turquía, proponen una planeación del transporte sincromodal a través de un problema de optimización multiobjetivo no lineal para examinar los costos, tiempos en el sistema y emisiones de CO₂, incluyendo condiciones de operabilidad a través de niveles de congestión de acuerdo a las velocidades y tiempo de duración en el sistema. La investigación realizada por Farahani, et al. (2018) estudia los impactos en la reducción en el consumo de energía y costos en el diseño y operación en las cadenas de transporte sincromodal. Zhang y Pel, (2016) desarrollaron un análisis comparativo entre el transporte de carga intermodal y sincromodal teniendo en cuenta aspectos económicos, sociales y medioambientales en el Puerto de Róterdam. Como resultado no se encontró una disminución significativa a los costos de transporte asociado a un incremento en los costos de transbordo, pero si arrojó una disminución importante en las emisiones de CO₂.

En esta investigación intentamos abordar algunos de los vacíos que se encuentran actualmente en la literatura con respecto al transporte sincromodal. En nuestro modelo proponemos una formulación dual basada en arco para la asignación de la carga y en ruta para la asignación del transbordo, con el propósito de plantear una planificación táctica/operacional del transporte sincromodal que permite integrar los costos privados (e.g. transporte, transbordo y penalidades) con los costos sociales asociados a las externalidades (e.g. emisiones CO₂). Desarrollando una sincronización de la programación de los servicios para varios modos de transporte en una red dependiente del tiempo utilizando un enfoque discreto-continuo, incluyendo costos y tiempos de transbordo entre modos, penalidades por entrega tanto por fuera de operación y fuera del tiempo

límite. Esta formulación será utilizada en un contexto de una red de intermodal tomando como caso de estudio el corredor de carga sobre el valle del Río Magdalena en Colombia, que presenta múltiples oportunidades para el desarrollo de un transporte sincromodal de carga.

2.1. TRANSPORTE SINCROMODAL

El problema general del transporte de carga está caracterizado por la asimetría de los requerimientos de los productores de la carga que deben tener en cuenta durante la planificación del sistema de transporte. Es decir, aunque estén conectados por un mismo origen – destino presentan diferentes tiempos de entrega, tipos de productos (e.g. graneles, contenedores, carga peligrosa), modos disponibles y marcos legales que deben ser considerados por los operadores y transportadores al momento de determinar la programación del transporte de la carga.

Durante el desarrollo del transporte de carga se ha evolucionado sobre diferentes metodologías con el objetivo de adaptarse a una demanda altamente volátil y requerimientos logísticos y ambientales cada vez más exigentes. Los diferentes tipos de sistemas de transporte de carga (Figura 1) varían de uno otro en diferentes aspectos. Variando desde el nivel de complejidad, estructura organizacional y marcos legales existentes entre cada sistema de transporte (Agbo et al., 2017).

Dentro de las nuevas metodologías sea abierto camino el transporte sincromodal, la cual ha presentado diferentes interpretaciones, al igual que similitudes que otras metodologías. A continuación, hacemos una breve descripción de las principales metodologías.

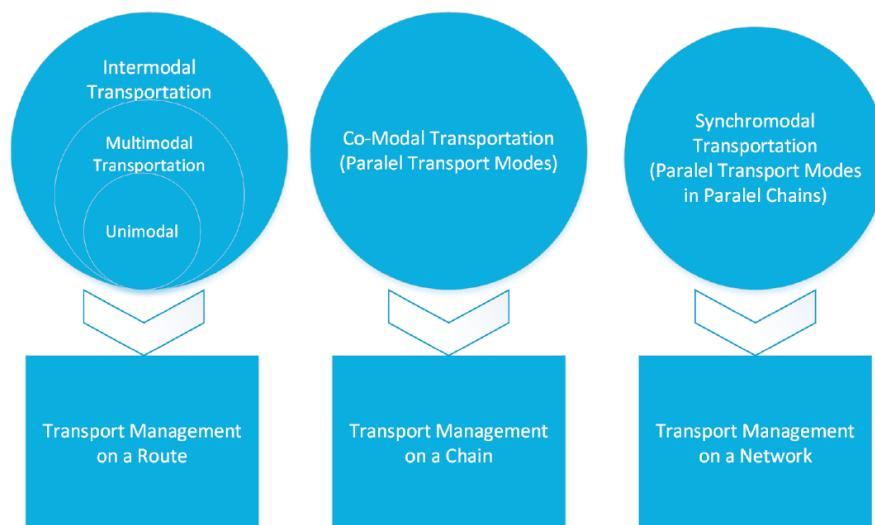


Figura 1 Clasificación de los diferentes tipos de transporte

Fuente: (Resat & Turkey, 2019)

El transporte multimodal se puede definir como el transporte de una persona o carga desde un origen a un destino utilizando secuencialmente por lo menos dos modos de transporte, sin manipulación de la carga durante el transbordo y logísticamente ligado bajo la autoridad de un único contrato que ampara todo el envío. Las unidades de carga pueden ser una caja, contenedor, carga a granel, carros de trenes o tráileres de camiones (SteadieSeifi et al., 2014). Los sistemas de

transporte son multimodales cuando su infraestructura tiene la capacidad de operar y ofrecer servicios para varios modos de transporte (e.g. carretero, férreo o fluvial).

Transporte intermodal es un caso específico del transporte multimodal donde el transporte se realiza a través de una misma unidad de carga sin el manejo o modificación de la misma durante los transbordos, no necesariamente bajo la autoridad de un único documento de carga. El transbordo debe ser realizado en una terminal de transbordo (Crainic & Kim, 2007). Es decir, el transporte de carga intermodal es un término usado para describir el movimiento de mercancía de una unidad o vehículos sucesivamente en varios modos de transporte sin modificar la carga entre los modos de transporte (ECMT, 1993). La secuencia de estos movimientos entre modos y terminales se considera una cadena de transporte intermodal (Crainic, 2007).

Transporte co-modal se centra en la utilización eficiente e inteligente de uno o múltiples modos de transporte o combinación de los mismos, reflejando la necesidad de optimizar el uso de los modos de transporte alcanzando un sistema de transporte más eficiente y sencillo reemplazando el concepto de competitividad por el de complementariedad. Este enfoque es económicamente atractivo en términos flexibilidad, accesibilidad, confiabilidad, aumento en las ganancias, reducción de costos e información a tiempo real (Pleszko, 2012). Diferencias con el transporte intermodal i) presenta una agrupación de transportadores de diferentes modos, ii) manejo eficiente de los recursos (StadieSeifi et al., 2014).

Transporte sincromodal es la más reciente metodología y representa un sistema más robusto que el transporte intermodal o co-modal. Específicamente se refiere a un manejo eficiente y sincronización de los modos de transporte utilizando información a tiempo a real permitiendo adaptar la red o el sistema a los requerimientos de la demanda con los recursos disponibles. En el transporte sincromodal los productores acuerdan con los operadores de logística la entrega de los productos en términos de costos, tiempo y sostenibilidad, pero hay libertad en la escogencia del modo de transporte por lo que operador puede determinar dependiendo las condiciones actuales y futuras (i.e. información a tiempo real) cual es la mejor opción en cuanto a qué modo utilizar.

Como se presentó anteriormente, todas las metodologías presentan variaciones o perspectivas del transporte multimodal. Las diferencias se centran en que a la medida que se va evolucionando los requerimientos del transporte de carga, aumenta el nivel de integración o colaboración en cada uno de los sistemas entre los múltiples integrantes y tomadores de decisión.

A diferencia del transporte intermodal donde la carga es movida a una dirección definida, el transporte sincromodal considera que en cualquier momento se puede escoger cualquiera de las múltiples conexiones de transporte disponibles. Esto implica que la información a tiempo real determina la mejor opción de transporte disponible. Características como coordinación y el intercambio de datos son considerados factores cruciales para mejorar la eficiencia llevando la logística a un mayor nivel, ayudando a llevar la sincromodalidad en una precondición esencial para un sustentable y optimo transporte en el futuro (Pleszko, 2012).

Los sistemas de transporte sincromodal ofrecen más ventajas en sostenibilidad en las principales dimensiones del transporte como económico, social y medioambiental (Agbo et al., 2017). En lo

económico, la sincromodalidad disminuye el impacto entre los costos totales de transporte, el tiempo dentro del sistema y aumenta la capacidad de los servicios por modo. Mientras, en lo social optimiza los flujos y sus concentraciones dentro de la red con una reducción reflejada congestión en el transporte carretero, disminuyendo los envíos directos y los movimientos de alimentación (*drayage*). Por último, en lo medioambiental, la sincromodalidad reduce en general las emisiones generadoras de efecto invernadero (Zhang & Pel, 2016).

El transporte sincromodal cambia también el enfoque convencional de colaboración vertical y horizontal en la planificación del transporte de carga y plantea una perspectiva dual mucho más amplia al integrar no solo a operadores de logística, transportadores y productores en una sola cadena de transporte, sino que agrupa a varios modalidades asociando diferentes cadenas de transporte en un solo sistema de transporte (Figura 2 y Figura 3), mejorando el rendimiento y aumentando la utilización de todos los modos de transporte, generando un transporte de carga más robusto (Behdani et al., 2016).

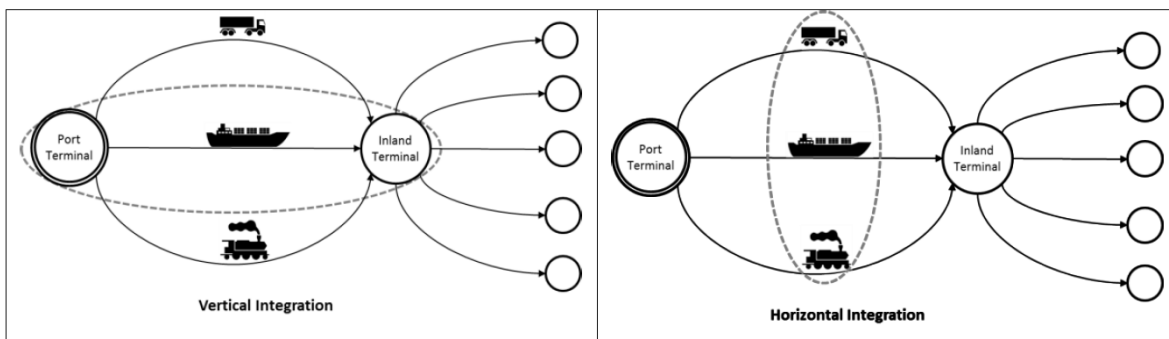


Figura 2 Vistas integradas del transporte de carga
Fuente: (Behdani et al., 2016).

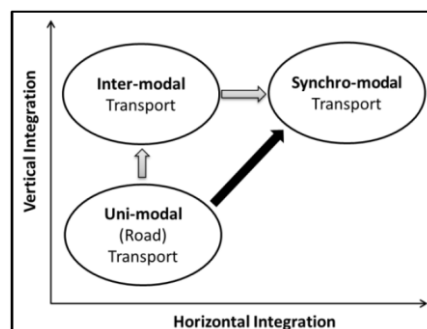


Figura 3 Integración dual en sistemas de transporte de carga sincromodales
Fuente: (Behdani et al., 2016)

La sincromodalidad utiliza una red integrada de varios modos disponibles en paralelo para proveer una solución de transporte más flexible con un aumento de la eficiencia (Behdani et al., 2016). Debido a esto, otro componente fundamental es que las redes de infraestructura de los múltiples modos (e.g. autopistas, canales navegables, líneas férreas) estén disponibles cuando se necesiten transferir de un modo a otro. En el transporte sincromodal es necesario que se encuentre una conexión de alta capacidad (i.e. líneas férreas, canales navegables) entre las terminales portuarias

y las terminales de consolidación o transbordo, de manera que, con el incremento de la cooperación e integración, el sistema se encuentre en capacidad de alcanzar mayores económicas a escalas con un aumento en la utilización de la capacidad de los vehículos. En definitiva, la sincromodalidad busca conseguir un conjunto de servicio integrado siempre buscando la complementariedad natural de los diferentes modos disponibles (Behdani et al., 2016).

Un proceso fundamental del transporte sincromodal es la necesidad de cambiar la forma de pensamiento del transporte de carga, específicamente pasar del modelo convencional de *push to pull*. Teniendo en cuenta que para ser más eficiente es determinante el factor tiempo, se necesita cambiar a una posición más proactiva como *pull to push*. Un ejemplo claro sería el posicionamiento de la carga, los contenedores no deberían estar a la espera en las terminales marítimas, en anticipación a las directrices de transporte (*pull*), pero en cambio pueden moverse a las terminales de transbordo terrestres a la espera de dichas directrices (*push*) (Pleszko, 2012). Para este propósito, es necesario un sistema de consolidación que permita un flujo constante de carga y así permitir una mayor frecuencia entre las conexiones de los diferentes modos de transporte (e.g. férreo, fluvial y carretero), teniendo la capacidad de agregar y estandarizar la carga y así alcanzar mayores economías de escalas.

Otro aspecto importante en los sistemas de transporte sincromodales es la libre asignación modal, específicamente hacia los operadores de logística. Un cambio de cultura desde la práctica convención de asignación modal predeterminada a un enfoque de asignación modal libre es un requerimiento para la implementación del transporte sincromodal. Los productores deben acordar en el transporte de carga con los operadores de logísticas en términos de precios y requerimientos de entrega (i.e. tiempo en terminales de destino), pero el operador tiene la libertad de determinar cuál es el modo más conveniente dependiendo de los requerimientos de los productores y la disponibilidad de los modos en el sistema de transporte (Behdani et al., 2016). Este concepto al permitir que la toma de decisión modal sea más flexible requiere a la vez de una solución más compleja por el aumento de los requerimientos y actores que participan en la toma de decisión de la asignación modal.

El procesamiento de la información a tiempo real es esencial para una sincronización óptima del sistema de transporte, la integración de los diferentes actores y la oportuna utilización de los recursos son prerrequisitos para la flexibilidad de la libre asignación modal para afrontar los cambios dinámicos de los modos en las redes de transporte. Una decisión óptima depende de un reconocimiento detallado de las preferencias de los clientes (e.g. productores), un análisis de las combinaciones de los servicios con una estimación de los posibles resultados. Estos procedimientos requieren que todos los participantes presenten un intercambio de información confiable a tiempo real (Pleszko, 2012). Además, aumentar el nivel de colaboración y cooperación es otro aspecto para poder tener éxito en la sincromodalidad.

Por otro lado, el diseño de una estructura de precios y establecer los criterios de las entregas es otro aspecto importante en el transporte sincromodal. La sincromodalidad pretende superar las limitaciones del transporte de carga con una nueva estructura más flexible basados en la diferenciación de precios y tiempos de espera (van Reissen et al., 2017).

Para compañías más pequeñas que manejan vehículos de menor capacidad con volumen de carga más bajos y mayores requerimientos de los productores, una planificación a nivel estratégico no es económicamente viable. Pero este mercado puede integrarse a la red asignando una participación en los múltiples modos para transportarse en la cadena de transporte.

Una nueva metodología siempre presenta desafíos y obstáculos para alcanzar su máxima capacidad, y la sincromodalidad no es la excepción a esta problemática. Dentro de los retos y obstáculos del transporte sincromodal se encuentran: organización de la red y centro de operaciones, coordinación en los transbordos, infraestructuras ineficientes, deficiencias en la estandarización de la información, inequidad en la participación de los participantes y la variedad de los vehículos. Estos requerimientos han sido estudiados durante de los últimos años, con el propósito de aumentar la aplicabilidad de esta nueva metodología de transporte.

El transporte sincromodal es un concepto que tuvo sus primeros pasos en los Países Bajos. En esta región se realizó una prueba piloto por la terminal de contenedores europea (ECT), a través del servicio de puerto europeo (EGS) en el puerto de Rotterdam en el corredor de carga Rotterdam-Moerdijk-Tilburg en el 2011, con resultados muy positivos por la coordinación del cambio modal en la reducción o ahorro en los costos de transporte y emisiones de CO₂. El piloto demostró que el sistema de transporte sincromodal está en la capacidad de introducir sostenibilidad en el sistema de transporte de carga con un aumento en la eficiencia, eficacia, flexibilidad, confiabilidad entre otros beneficios (Behdani et al., 2016; van Reissen et al., 2015b).

2.2. NIVELES DE PLANIFICACIÓN EN EL TRANSPORTE INTERMODAL

Los problemas de planificación de transporte de carga deben ser formulados enfocándose en cada uno de los actores para los diferentes niveles de toma de decisión (Crainic & Laporte, 1997). Los diferentes niveles de planificación de transporte de carga, que a su vez son aplicables a las nuevas metodologías de transporte, como el transporte sincromodal se encuentran categorizados clásicamente en tres categorías: Estratégica (largo plazo), táctica (mediano plazo) y operacional (corto plazo).

2.2.1. Planificación estratégica

Las decisiones en la planificación estratégica se enfocan en desarrollar políticas y darles forma a las estrategias de operación durante el horizonte de operación. Específicamente, se centran en inversiones de gran impacto a partir del diseño de las redes de infraestructura con respecto a la localización y tipología de los recursos, como determinar la ubicación y tipo de operación de las terminales (e.g. tránsito, transbordo), optimización de las rutas (e.g. mejoramiento de los trazados, ampliaciones), tipo de vehículos y capacidad mínima de la flota; y en el caso del transporte intermodal además abordan estos aspectos a los diferentes modos de transporte contemplados en el corredor.

2.2.2. Planificación táctica/operacional

Desde el punto de vista de planificación, en el transporte intermodal el nivel táctico se enfoca en optimizar la infraestructura establecida escogiendo y asociando los diferentes modos de transporte, así como sus capacidades, itinerarios y frecuencias (SteadieSeifi et al., 2014). La asignación del transporte de carga se puede desagregar en dos categorías en la planificación táctica. Primero, se centra en el transporte de largas distancias (*long haul*) en modos de transporte más eficientes como barcazas o en trenes (aunque también se pueden utilizar camiones) y luego se encuentra la entrega puerta a puerta que básicamente se basan en operaciones con camiones (*pre y end haul*). El primero se aborda desde un diseño de redes de servicio y el segundo se enfoca como un problema de ruteo de vehículo. Donde, el diseño de redes de servicio (SND) es cada vez más usado para afrontar las planificaciones tácticas como lo son programación de servicio, operaciones en terminales y ruteo de carga (Crainic, 2000).

En la planificación táctica, la inclusión de la colaboración o competitividad entre los actores es determinante para alcanzar niveles de servicios adecuados, aquí entra la sincronización en la planificación del sistema. Por lo general, en el transporte intermodal se concebían cada uno de los participantes de la cadena logística como actores independientes. Pero en la actualidad, ha aumentado la necesidad de un entorno más colaborativo para aumentar la eficiencia reduciendo los costos logísticos y sociales, este tipo de comportamiento es cada vez más tenido en cuenta durante la planificación táctica (i.e. transporte sincromodal).

Ahora, si bien los planes estratégicos y tácticos dan una guía de cómo desarrollar las actividades de transporte, al final el enfoque que determina como mantener en funcionamiento desde un punto de vista eficiente y competitivo es el nivel operacional. Para abordar estas problemáticas es esencial tener en cuenta la información a tiempo real, debido a los constantes requerimientos que se van desarrollando durante la operación de los servicios de transporte. Teniendo en cuenta que casi todas las variables que se presentan durante la operación presentan un comportamiento no determinístico, se debe mirar el aspecto dinámico y estocástico de las operaciones. Por esto, las decisiones tomadas se basan en condiciones actuales y estimaciones del futuro, por lo que no solamente se trata de minimizar costos sino además aumentar la confiabilidad del sistema (SteadieSeifi et al., 2014).

De acuerdo con el tipo problemáticas que aborda la planificación operacional, esta se enfoca en dos tipos categorías: el manejo de los recursos y la replanificación de los itinerarios. La primera categoría aborda los problemas de distribución a través de la red, como el posicionamiento, reposicionamiento y almacenamiento de los vehículos, con el objetivo de localizar los vehículos una vez hayan realizado los movimientos necesarios según sus itinerarios. Estos movimientos de localización se enfocan básicamente en dos subcategorías, el reposicionamiento de vehículos vacíos y el manejo de la flota. Dado que la ubicación de los vehículos en incierta una vez realizan sus movimientos, el reposicionamiento de vehículos se centra en minimizar los costos de transporte de los vehículos vacíos, así como sus costos de inventarios. Ahora, el manejo de la flota tiene en cuenta las limitaciones que presentan los vehículos para atender los servicios, por lo que se centra en

localizar, reposicionar y asignar los vehículos disponibles para satisfacer la demanda, maximizando las ganancias de los operadores, además pueden incluir el reposicionamiento de vehículos vacíos.

Por otro lado, la planificación operacional en su segunda categoría se encuentra replanificación de itinerarios que aborda la evolución de la planificación en tiempo real. Teniendo en cuenta, que la planificación debe ser un proceso dinámico con constante adaptación y respuesta a las múltiples eventualidades que se encuentra durante la operación de los servicios. Para alcanzar este objetivo es comúnmente utilizado herramientas tecnológicas y computacionales como tecnologías de comunicación e información (ICT) (e.g. tecnologías de rastreo) y sistema inteligente de información (ITS).

La planificación del transporte toma decisiones basados en una teórica anticipación de los procesos futuros en cambio un sistema de control a tiempo real tiene que asegurarse una ejecución factible y eficientes de los procesos de transporte, después de los procesos de transporte el sistema de control tiene que reaccionar a cada disrupción significativa en la red de transporte (Bock, 2010).

2.3. DISEÑO DE REDES DE TRANSPORTE DE CARGA

El diseño de redes es utilizado en múltiples campos de las ciencias, desde logísticas, telecomunicaciones, hasta la floricultura. Su premisa se centra en enrutar o transportar un bien o servicio a través de una serie de arcos con el objetivo de salir de un origen y llegar a un destino. El alcance de la planificación de los diseños de redes generalmente alcanza un nivel estratégico, mientras en la planificación táctica se utiliza un horizonte a mediano plano representado en una asignación de flujos a través de una red establecida.

El problema en un diseño de una red es determinar el conjunto de nodos y arcos que minimice los costos a través de una selección de arcos en dicha red que permita el flujo de los productos, mientras minimiza el costo total de la red (Perdersen et al., 2009). Dicho costo total estará definido por la suma de los costos fijos de los arcos, más los costos variables por el transporte de los productos en el conjunto de arcos seleccionados.

Dentro del diseño de la red de transporte se hace necesario contemplar la ubicación estratégica de las terminales de consolidación en términos de accesibilidad, manejo y distancias. Este manejo aglomerado de la carga permite alcanzar economías a escalas que a su vez reducen los costos de transporte, como lo es el transporte de grandes distancias con la utilización de grandes barcos, trenes o incluso camiones (*long-haul*). Tanto para el transporte intermodal como sincromodal, la consolidación de la carga es un concepto fundamental para alcanzar una mayor utilización de la capacidad de los distintos modos de transporte.

Para una mayor consolidación de la carga es esencial la utilización de unidades estandarizadas, donde entre las más comunes se encuentra el uso de los contenedores. La importancia de los contenedores en el comercio internacional ha desarrollado que sean unos de los mayores componentes del transporte intermodal. Dentro de las principales razones de la utilización de los contenedores se encuentra un aumento de la seguridad de la carga, reducción de los costos de transbordo, estandarización y accesibilidad a múltiples modos de transporte (Crainic & Kim, 2007).

Entre las distintas redes para el transporte de carga con o sin terminales de consolidación que se presentan actualmente se encuentran las siguientes tipologías de redes: Entrega directa, corredores (i.e. grandes volúmenes sobre un arco específico), *hub* y *spoke*, *hubs* conectados, rutas estáticas y rutas dinámicas (ver Figura 4). Woxenius (2007) realiza una descripción más exhaustiva de la tipología de redes en transporte tanto de pasajeros como de carga.

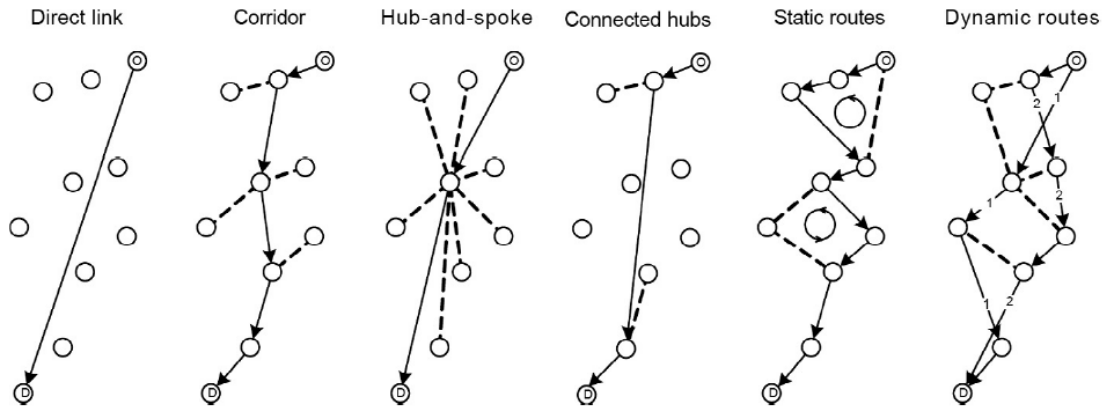


Figura 4. Seis opciones para el transporte de un par origen destino
Fuente: (Woxenius, 2007)

El transporte de carga se mueve generalmente en una red *hub-and-spoke*, desde terminales de baja demanda hacia centro de consolidación, donde son clasificadas y aglomeradas. Una vez se encuentren consolidados se mueven a través de modos de transporte más eficiente entre *hubs*, para luego nuevamente ser transportado a su terminal de destino (Crainic, 2007). Principalmente en la literatura se aborda el problema de localización de los *hubs*, que consiste en la ubicación óptima de los *hubs* dependiendo de la entrada y salida de la carga en el sistema (*spokes*).

Los sistemas de consolidación de la carga en el transporte intermodal que están organizados en una red tipo *hub-and-spoke*, donde mueven la carga a través de un origen y destino y son transferido a centro de consolidación (*hub*) que pueden ser terminales de contenedores, acopio o transbordo intermodal (Figura 5).

Aunque depende de las condiciones y especificaciones de la red disponible en cada zona de estudio, para el transporte intermodal de carga se deben presentar grandes volúmenes de carga en su corredor, con el propósito de aumentar la utilización de los modos más eficientes con mayor capacidad como lo son los trenes, barcasas o barcos, por lo que general se plantea una tipología de red tipo *hub* y *spoke* o *hubs* conectados. Estos modos de transporte tienen la particularidad que necesitan terminales de mayor capacidad para manejar sus operaciones por lo que esta tipología ofrece mayores oportunidades de utilizar la combinación de estos modos con otros menos eficientes o conectar zonas de producción con limitadas posibilidades de conexión con corredores de gran capacidad.

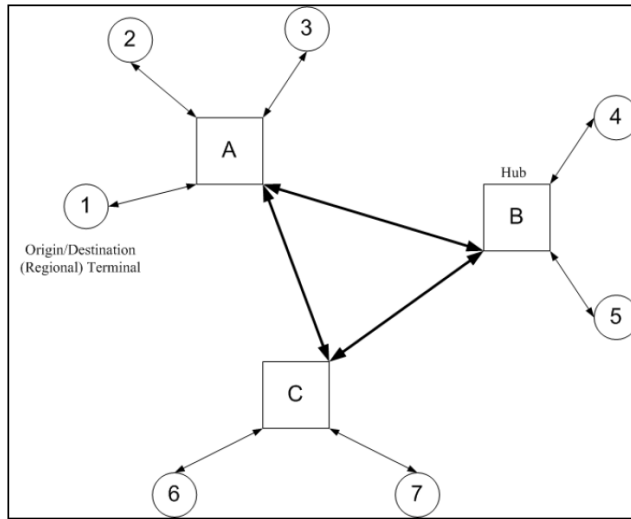


Figura 5 Red Hub y Spoke
Fuente: (Bektas & Crainic, 2007)

El transporte intermodal está organizado a través de una red de transporte de carga intermodal (IFTN). Esta red consiste en diferentes redes para cada uno de los modos de transporte disponibles (e.g. autopistas, canales navegables o redes ferroviarias). Estas redes de transporte unimodales están conectadas a través de terminales de transbordo intermodal (*hubs*). Los operadores de transporte de carga intermodal son organizaciones o empresas que poseen o alquilan los vehículos, y proveen a los usuarios servicios de transporte de contenedores a través de una red de transporte intermodal, como se ilustra en la Figura 6 (Li et al., 2015).

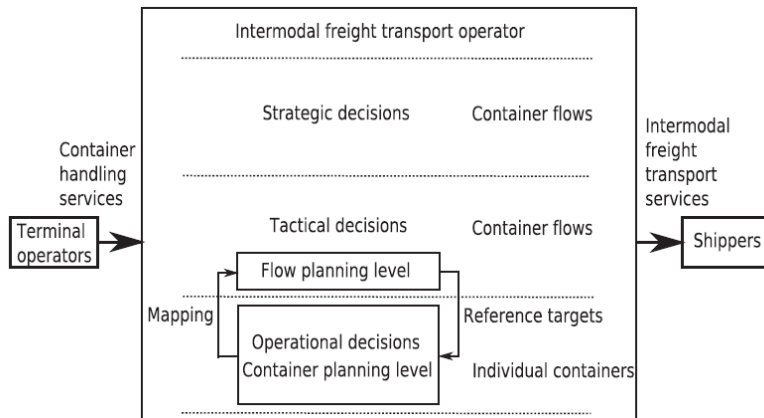


Figura 6 Marco para un transporte de carga multinivel aplicado a un operador de transporte de carga intermodal

Fuente: (Li et al., 2015)

Dentro de nuestra red de transporte utilizaremos una tipología de red tipo *hubs* conectados que será usada para modelar un sistema de transporte sincromodal, a través de varias redes de infraestructura para diferentes modos (autopistas, líneas férreas y canales navegables) conectadas entre terminales de transbordo intermodales que funcionan como *hubs*, permitiendo un uso más

intensivo de otros modos de transporte, optimizando los recursos disponibles dentro de nuestra red o corredor de estudio.

2.4. DISEÑO DE REDES DE SERVICIOS

Dependiendo del propósito, alcance y planificación del problema el diseño de transporte de carga a través de redes se puede definir en dos grandes categorías. En primer lugar, la planificación de redes de flujo (NFP), que se enfoca en asignar los diferentes flujos de carga a través de los arcos de dichas redes. En segundo lugar, se encuentra el diseño de las redes de servicio (SND), que consiste en determinar los flujos o cantidad de carga que serán asignados a unos servicios disponibles. Las redes de servicio están prediseñadas por los operadores para resolver problemas de diseño de redes de servicio (Crainic, 2000).

Los problemas del diseño de las redes de servicio (SND) han sido muy utilizados para representar casos reales en transporte de carga, debido a una mayor flexibilidad y representación de las redes de transporte. En estos modelos, los investigadores abordan la optimización de localización de los contendores con los recursos disponibles para alcanzar la minimización de los costos con un nivel de servicio que satisfaga a los operadores logísticos. Estos modelos generalmente utilizan las formulaciones de redes con una programación lineal entera mixta, aunque debido a la complejidad del problema y aleatoriedad de las variables, se han utilizado programación estocásticas (Lium et al., 2009), y formulaciones con heurísticas y metaheurística (Bock, 2010; Perderson et al., 2009). La formulación más utilizada es una representación dependiente del tiempo, con una demanda que varía a lo largo del horizonte de planificación (Perderson & Crainic, 2007). El tiempo se puede representar dependiendo de su complejidad en diferentes perspectivas, se puede utilizar un enfoque de tiempo discreto (Andersen et al., 2009a), continuos (Sharypova et al., 2012) o combinado (Behdani et al., 2016).

Generalmente se supone en los problemas de diseño de redes de servicio SND que la toma de decisión es realizada por un solo agente, usualmente son los operadores de logística. No obstante, es evidente que la red está compuesta por múltiples agentes que a su vez cada uno tienen sus propias prioridades, por lo que no se cuenta con una simetría de la información, sino con unos supuestos de colaboración. Este problema, se traduce en múltiples restricciones al momento de realizar un sistema más eficiente y colaborativo, generando cada vez problemas de optimización más complejos.

Cuando hay múltiples modos disponibles en el mismo par origen destino, son usados múltiples arcos para representar estos movimientos realizados por modos específicos en el corredor. De manera simultánea se realiza tanto la asignación de la carga a las diferentes rutas como la determinación de la cantidad y tipo de servicios para la operación. Por lo general el problema de redes de servicio se plantea como un problema de mínimo costo (MCNF) y como diseño de redes basadas en recorridos (*paths*) (PBND).

Los diseños de redes de servicios, como se mencionó anteriormente, se aplican por lo general en la planificación táctica, donde los operadores tratan de combinar la carga o pasajeros en vehículos predispuesto (e.g. trenes, camiones) desde un par origen – destino (Lium et al., 2009). Los servicios

además de un origen y destino pueden tener asignadas paradas en terminales intermedias (SteadieSeifi et al., 2014). En general, los servicios tienen definidos diferentes tipos de atributos, en el caso de transporte intermodal tienen varios modos de transporte que a su vez presentan diferentes características de operación (e.g. capacidad de carga, velocidad, y costos fijos).

El objetivo del diseño de la red de servicios (SND) se basa en encontrar una planificación óptima de un servicio o una secuencia que a su vez están asociados a diferentes modos de transporte, flota y tiempo de salida, para así poder cumplir a satisfacción unos niveles de servicios mínimos y unos requerimientos de demanda. Usualmente se relacionan varios tipos de problemáticas en los diseños de redes de servicios además de la optimización de la red como un problema de localización (e.g. infraestructura, terminales), capacidad, congestión, consolidación de la carga, clasificación de vehículos, consolidación en bloques (e.g. vagones, convoyes), optimización de flotas (e.g. reposicionamiento de vehículos, contenedores vacíos) hasta la aplicación de políticas de transporte (Perdersen et al., 2009). Por lo que, aunque se utilizan generalmente en un nivel de planificación táctica, no está limitado a los demás niveles, teniendo la capacidad de enfocarse no solo en una etapa de planificación sino en varias al mismo tiempo.

Las redes de servicios se basan en dar solución a las siguientes problemáticas:

- Determinar qué servicios incluir en la planificación de transporte; es decir, rutas O-D, terminales de transbordo y que tipos de vehículos (modos) y características (e.g. capacidad velocidad, flota)
- Determinar la programación de los servicios, especificando sus movimientos en espacio y tiempo. Es decir, determinado sus frecuencias, número de salidas, horas de salida y hora probable de llegada.
- Por último, distribuir el tráfico dentro de los servicios establecidos, es decir, como se van a repetir los vehículos de los diferentes modos, así como la cantidad de carga en cada uno a través de los servicios. Especificando las reglas de operación en cada servicio (e.g. donde consolidar la carga y/o los vehículos)

Se asumen generalmente que la utilización del manejo de los recursos de la flota (e.g. vehículos, personal, operadores) se encuentra disponibles, por lo que la administración, asignación y reposicionamiento de los vehículos se encuentra determinado en un nivel de planificación operacional y ya está disponible para la programación de los servicios (Perdersen et al., 2009).

Desde el punto de vista topológico, los nodos representan terminales en los orígenes y destinos, y los arcos de las redes representan servicios (o parte de ellos) que pueden estar incluidos dentro de un plan de transporte desarrollado o propuesto por los operadores de logística. Estos arcos presentan un costo fijo, además de un costo variables que representan la operación de los servicios; es decir, por la utilización de un servicio se generan costos variables atribuibles a transportar ciertos productos en determinados servicios (Perdersen et al., 2009).

Dentro de los SND se pueden representar por dos tipos de variables: continuas o binarias. Las variables continuas representan una cantidad de flujo, y en el caso de SND dependiente de tiempo pueden representar instantes o intervalos de tiempo. Además, dentro de las variables continuas,

podemos encontrar variables enteras, estas pueden representar repeticiones o capacidades dentro de los servicios. Por otro lado, las variables binarias son utilizadas para asignar la utilización de un modo o servicio determinado.

Cada uno de los servicios que participan en el diseño de la red se supone que ya maneja una administración del manejo de los recursos; es decir, que dependiendo de la frecuencia de los servicios (diaria o cada determinado día), estos operaran con las mismas condiciones preestablecidas inicialmente o durante la programación, lo que resulta en un flujo constante de recursos para satisfacer dichos servicios. Usualmente en el diseño de redes de servicios se supone que los recursos (e.g. vehículos, tripulación, operadores) siempre están disponibles (Perdersen et al., 2009). Por su parte, cuando se requiere o se propone también optimar los recursos las representaciones basadas en ciclos integran las rotaciones de los vehículos con arcos de reposicionamiento en diferentes intervalos de tiempo (Andersen et al., 2009b; SteadieSeifi et al., 2014)

Los diseños de redes de servicios (SND) dependiendo de las características o tratamiento de las variables se pueden diferenciar entre problemas estáticos y dinámicos. El primero, supone que las condiciones de operación están establecidas inicialmente y no varían durante el horizonte de planificación. Mientras, el segundo propone que al menos una variable (e.g. demanda) variará a lo largo del tiempo de planificación (SteadieSeifi, et al., 2014). Específicamente, en problemas SND dinámicos, la formulación de la demanda por lo general utiliza una distribución en el tiempo donde estará disponible en las terminales de origen. Este enfoque dinámico permite proyectar o modelar diferentes escenarios si se requiere durante la planificación, modificando no solamente la demanda, sino también la flota e infraestructura disponibles.

Además, teniendo en cuenta como se planifican la programación de los servicios podemos encontrar otras diferencias entre diseños de redes de servicios estáticos (frecuencia) o dinámicos. Los de estáticos o frecuencia se enfocan entre definir qué tipo de servicios operar y cada cuánto, moviéndose en una planificación estratégica/táctica. A su vez, los servicios dinámicos se basan en la programación más flexible de los servicios, priorizando el tiempo de salida y llegada de dichos servicios (Crainic, 2000); a diferencia del primer grupo, tienden a cubrir en niveles de planificación táctica/operacional (Wieberneit, 2008). Los SND dinámicos usualmente se presentan con una formulación de diseños de redes de servicios dependientes del tiempo según lo muestra revisión de la literatura del diseño de redes de servicio dinámicos en el transporte de carga realizada por Wieberneit (2008).

Los SND dependientes de tiempo presentan no solamente una representación espacial de la red, sino además contienen una dimensión estacional representada en el tiempo de la operación, esta interacción es usualmente representada con una red espacio-tiempo. Estas redes espacio-tiempo tienen la capacidad de representar muchos problemas de la vida real de los SND. Como por ejemplo el tiempo de espera en la terminal puede ser representado por un arco durante diferentes intervalos de tiempo para una misma terminal (nodo) (SteadieSeifi et al., 2014). Además, tienen la capacidad de representar interrupciones o eventualidades en el sistema a lo largo del horizonte de planificación, obteniendo una red más flexible, por lo que da como resultado una red más robusta.

2.4.1. Representación red espacio - tiempo.

Ahora, la representación de una red espacio – tiempo es construida de una manera secuencial y circular, para representar la periodicidad resultante de la programación de los servicios, así como la carga o descarga de los vehículos y los arcos de reposicionamiento (Crainic, 2007). En la Figura 7 se un representa a través de un diagrama que contiene en sus filas una serie nodos mientras las columnas se representan un intervalo tiempo dentro del horizonte de planificación. Es decir, que un nodo puede representar una terminal dentro de un espacio de tiempo determinado (e.g. dentro del horario de las terminales). Mientras los arcos representan el tiempo de salida y llegada de una terminal N1 en el tiempo T1 a la terminal N2 al tiempo T2

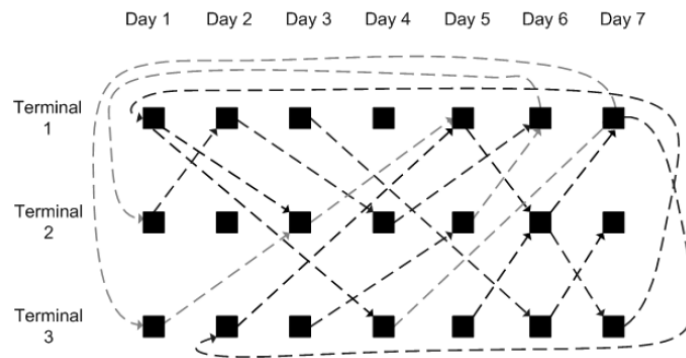


Figura 7 Servicios intermodales en una red espacio-tiempo
Fuente: (Pedersen & Crainic, 2007)

Dependiendo del significado o propósito de los arcos en las representaciones espacio-tiempo podemos encontrar representaciones basadas en arcos, recorridos o ciclos. Los basados en arcos, como indica su nombre, son los arcos que representan los servicios, por lo que cada arco en particular sería un servicio con condiciones de operación diferentes. En segundo lugar, las representaciones basadas en recorridos o rutas, cada arco hace parte de una estrategia (recorrido) donde se especifica una ruta exacta con una secuencia de servicios y terminales (van Reissen et al., 2015b). Por último, las representaciones basadas en ciclos presentan una selección de servicios en una estructura de recorridos cerrada o cíclica (i.e. una serie de recorridos que empiezan y terminan en mismo nodo) (Andersen et al., 2009b).

En nuestra búsqueda de una formulación para el transporte sincromodal, proponemos una red espacio-tiempo con una representación dual de los viajes para los diferentes servicios. En primer lugar, se usa una formulación basadas en arcos para los viajes entre un par origen-destino para determinado servicio. En segundo lugar, se emplea una formulación basadas en arcos, donde se relaciona las conexiones factibles entre una terminal origen y otra de destino con una terminal de transbordo. Estas dos formulaciones se relacionan a través del balance de la carga y la sincronización entre la carga y los viajes en las terminales de transbordo respectivamente.

2.4.2. Representación del tiempo

Uno de los principales problemas al momento de modelar matemáticamente las redes de servicios dependiente del tiempo es el tratamiento de los eventos durante el horizonte de planificación. Esta decisión se basará en nivel de precisión y el grado de integridad de los actores, dependiendo de los planteamientos, enfoques y supuestos de cada investigación. Básicamente, se puede categorizar en tres alternativas: enfoques con modelos continuos, modelos discretos o combinados.

Como se mencionó en capítulos anteriores, en el enfoque discreto, el tiempo durante el horizonte de planificación se divide en un número de intervalos de tiempo. En estos casos los eventos ocurridos en la planificación como movimiento de vehículos o carga, carga o descarga o reposicionamiento esta determinados durante estos intervalos de tiempo. Debido a la minuciosidad del transporte intermodal es usual utilizar intervalos de tiempos de acuerdo a la duración del evento más corto dentro de la formulación. Durante cada intervalo de tiempo, se asignan unas únicas variables que representan las condiciones de operabilidad durante dichos intervalos. Dependiendo de la discretización del tiempo, se pone complejo computacionalmente el problema matemático. (Sharypova, et al., 2012)

En el enfoque continuo, un evento llámese tiempo de llegada o salida puede ocurrir en cualquier momento dentro del horizonte de planificación. Para estimar estos fenómenos es necesario incurrir en variables de iniciación y finalización de tiempos. Estos modelos son más pequeños que los modelos con enfoque discretos, pero presentan mayor complejidad computacionalmente debido al tratamiento discreto es una simplificación durante los intervalos de tiempo mientras el tiempo continuo se requiere encontrar una solución de la programación de servicios durante todo el periodo de planificación.

Estas representaciones cada vez más precisas y acomodadas a los problemas reales, requieren de un esfuerzo computacional enorme, por lo que además de métodos precisos, se utilizan heurísticas y metaheurísticas con el fin de encontrar soluciones óptimas y rápidas para la complejidad del problema.

En nuestro modelo utilizaremos un enfoque combinado, propuesto por Behdani et al. (2016), donde los autores utilizan un espacio de tiempo continuo en el horizonte de planificación a través de unos arcos sectorizados en intervalos de tiempo que representan en nuestro caso los días de operación de las terminales de consolidación, transbordo y destino. Dentro de estos intervalos se limita la ocurrencia de los eventos en el marco de tiempo continuo, y a través de la red espacio-tiempo se relacionan los eventos de inicio y finalización de los servicios de acuerdo a origen y destino del arco en cada intervalo de tiempo respectivamente.

2.5. CONTRIBUCIÓN DE ESTA INVESTIGACIÓN

Como se demostró en la revisión de la literatura, la mayoría de los modelos se han desarrollado en un nivel táctico u operacional, en su mayoría con un enfoque de tiempo discreto, incluyendo múltiples actores con el fin de integrar la cadena de transporte aumentando el nivel de cooperación ya sea en recursos o información. El propósito de nuestra investigación es complementar los

modelos existentes con la integración de múltiples productos, modos, penalidades y transbordos a través de la sincronización de la programación de servicios, según nuestra revisión estos temas se han abordado por separado o algunas agrupaciones, pero no todos de manera simultánea.

Por otro lado, con la implementación de una representación dual basados en rutas y arcos relacionamos la sincronización de los servicios en las terminales de transbordo de acuerdo a los arcos de entrada y salida asignados en cada ruta. Este enfoque nos permite reducir el tamaño del problema al acotar las iteraciones en las terminales de transbordo, consecuentemente se mejoran los tiempos del problema de optimización.

Además, en esta investigación proponemos un enfoque del tiempo combinado (i.e. discreto-continuo). En este nuevo enfoque durante el horizonte de planificación se divide en intervalos de tiempos que representen adecuadamente los movimientos dentro de la red de transporte. En dicho intervalo de tiempo, los eventos pueden ocurrir en cualquier instante de tiempo. Este enfoque lo encontramos práctico para determinar o modelar la operación de terminales dentro de horarios establecidos ya sean marítimas o de transbordo, permitiendo sincronizar los diferentes modos durante la operación y de la misma manera castigar los incumplimientos por entregas a destiempo o fuera del tiempo límite.

En general, esta investigación intenta generar una planificación sincromodal adaptable a múltiples modos de transporte en un contexto de economías en desarrollo, con el propósito de identificar los principales beneficios y retos para desarrollar un transporte más eficiente y sostenibles en capacidad de manejar múltiples tipos de cargas o productos. Además, presentar el marco de un sistema de transporte más robusto al ser independientes cada uno de los modos y terminales dentro de la formulación permite introducir futuras eventualidades o interrupciones haciendo en el sistema más resiliente y confiable. La aplicación específica al corredor del valle del río Magdalena en Colombia, donde confluyen los modos férreo y carretero constituye una contribución al ser un caso inédito de análisis y modelación de la sincromodalidad en América Latina.

3. MODELOS DE PROGRAMACIÓN DE SERVICIOS MULTIPRODUCTO PARA TRANSPORTE SINCROMODAL

La formulación de problema plantea el desarrollo de un modelo matemático para la planificación del sistema de transporte de carga sincromodal entre las terminales marítimas y terminales terrestres. El enfoque se aborda desde un nivel táctico/operacional de asignación de flujos de contenedores a través de la red establecida utilizando un diseño de redes de servicios, integrando los múltiples modos a través de las terminales de consolidación y/o transbordo. Por lo tanto, se asume un alto grado de colaboración de los diferentes participantes de la cadena de transporte de logística, disponiendo de información de todo el sistema de transporte, requiriéndose que el operador logístico se encuentra en capacidad de manejar esta simetría de la información. Lo anterior, facilitando la integración de la planificación del transporte de carga con los operadores de las terminales de transbordo intermodal.

Desde el punto de vista de planificación de transporte, el diseño de las redes de servicios en primer lugar se enfoca en un nivel táctico, utilizando eficientemente de la capacidad y disponibilidad de las redes de infraestructura para cada uno de los diferentes modos y terminales de transbordo incluidas en el corredor. Mientras en el nivel operacional, aborda la programación de los tiempos de salida o llegada dentro del horario de operación en las terminales y la sincronización de la operación de los servicios para los distintos modos en las terminales de transbordo. Esta cooperación refleja la necesidad de una mayor de integración tanto vertical (operadores de las terminales, transportadores) y horizontal (diferentes modos de transporte), con el objetivo de ofrecer un sistema lo suficiente robusto para manejar todos los actores en la cadena de transporte.

A continuación, se realiza una descripción de la estructura del capítulo que se encuentra distribuido de la siguiente manera. Primero se plantea la formulación del problema, así como las principales asunciones o supuestos que se tuvieron en cuenta para modelar el caso de estudio. Luego, se describen las características y requerimientos de la demanda, además de los comportamientos dentro de la red de los nodos y arcos específicamente su distribución en las terminales de transbordo e integración a lo largo del horizonte de planificación. Posteriormente, se define la interpretación del manejo del tiempo en la representación de la red espacio-tiempo. Por último, se plantea el modelo matemático proponiendo la formulación de los conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y sus respectivas restricciones.

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema que planteamos se considera como un diseño de programación de redes de servicios multiproducto en un sistema de transporte sincromodal con penalidades para los servicios por llegar fuera de operación en las terminales y para los productos por incumplir el cronograma pactado en la entrega. En estos diseños, los operadores de logísticas ofrecen servicios de transporte para diferentes infraestructuras (e.g. carretera, canales o líneas férreas) y servicios de transbordo de contenedores entre las terminales intermodales con los orígenes y destinos de la carga.

Con el objetivo de conectar los focos de producción de carga directamente o a través de terminales de transbordo con los grandes puertos marítimos, los contenedores pueden ser cargado, descargado o transbordado entre servicios. El conjunto de servicios ofrecidos responde al conjunto de ordenes de transporte de los productores en las terminales de origen (i.e. demanda) hacia las terminales de destino. Específicamente en esta formulación, solo se tendrá en cuenta el transporte unidireccional en el corredor, moviendo la carga de exportación de contenedores. Los servicios que son ofrecidos por los operadores de logística buscan satisfacer las necesidades o requerimientos de los productores de la carga.

Los modo-servicio están definidos por un modo m que tiene asociado una serie de servicios factibles (i.e. días de salida de la terminal de origen y llegada en la terminal de destino) dependiendo de la tipología del vehículo (e.g. camión, tren, barcaza) y el tiempo de operación entre un par origen-destino. Para operar los servicios es necesario que los modo-servicios estén disponibles, pero con una limitación de acuerdo a las condiciones reales de operación. Como todos los modos presentan capacidades, velocidades y programaciones diferentes, cada uno de los servicios serán considerados diferentes entre sí. Entonces, un modo (e.g. camión, tren, barcazas) puede desarrollar una secuencia de servicio pasando por varias terminales desde su terminal de origen a través de un recorrido hasta llegar a un puerto marítimo (destino).

Una orden de carga es una aglomeración de contenedores que tiene como origen una terminal en común y se encuentran disponibles antes del tiempo de salida de dicho servicio. Es decir, que no se hace necesario que todas las ordenes de carga en las terminales esté disponible de igual forma que los servicios, sólo tiene que estarlo en la terminal de origen antes que el modo-servicio esté listo para salir.

Los transportadores para los diferentes modos y los operadores de las terminales son los usuarios de la red de transporte sincromodal, los productores y consumidores finales son considerados como el origen y destino de la carga respectivamente. Teniendo en cuenta que solo se analizará el corredor unidireccionalmente con sentido a las exportaciones, las terminales de transbordo pueden ofrecer diferentes servicios del manejo la carga como carga y descarga.

El presente modelo tiene en consideración las capacidades de los modos y el número limitado de servicios por día que pueden manejar las terminales para determinar una óptima programación y sincronización de los servicios para todos los modos de transporte, mientras consolida la carga en las terminales y modos disponibles. Dentro de los principales requerimientos, los operadores de logística deben tener la capacidad de obtener un conocimiento detallado de la demanda e información a tiempo real de los diferentes modos para integrar el volumen de carga en la asignación del sistema de transporte.

El resultado del modelo de transporte sincromodal desarrolla una solución que permite específicamente determinar:

1. El conjunto de servicios que satisfacen cada orden de carga para un par origen-destino
2. Tiempo de salida y llegada de cada servicio por modo
3. Penalidades por los incumplimientos de los horarios de operación de las terminales

4. Penalidades por los incumplimientos del horario de entrega de la carga
5. Ruteo de la carga
6. Asignación de la cantidad de carga que es transportado por un servicio específico
7. Asignación de la cantidad de carga que es transbordada en las terminales especializadas

En general, la premisa del modelo de optimización tiene como objetivo principal la minimización de los costos totales del sistema incluyendo los costos privados (transporte, transbordo y penalidades) y sociales (externalidades) distribuyendo la demanda de carga través del sistema utilizando los servicios del transporte sincromodal durante el horizonte de planificación. Los costos de operación es la suma de los costos de operación fijos y variables asociados a los servicios y la carga, respectivamente. Todos estos costos se integran en una formulación matemática de una red de transporte con una flexibilización de los tiempos de salida de los servicios, incluyendo la consolidación de la carga y sincronización con otros modos de transporte siempre y cuando se encuentren disponibles.

3.1.1. Supuestos del modelo

Antes de formular matemáticamente el modelo de programación para el transporte sincromodal, se presentan los supuestos o asunciones que son responsables de las restricciones al modelo de acuerdo al comportamiento del sistema.

- Un servicio está definido por un único origen destino, estos servicios no permiten paradas intermedias.
- Demanda será determinística y dispondrá de un origen, destino, tiempo de salida (disponibilidad) y tiempo de llegada (entrega)
- Para el caso de aplicación se consideran tres modos de transporte: camiones, trenes y barcazas; no obstante, el modelo puede considerar otros modos.
- El conjunto de rutas factibles está asociada a las conexiones de acuerdo a los modos disponibles para cada par origen-destino que tiene comunicación a través de una terminal de transbordo.
- Solo se considera un arco disponible entre terminales origen-destino para el medio carretero. Por lo que solo se considera un único servicio entre un par origen-destino. Lo anterior implica, que cada unidad de carga que refleja este servicio representa un vehículo en el medio carretero.
- Como la cantidad de carga servicio en el medio carretero depende del número de camiones que usa el servicio, los costos fijos asociados al servicio del medio carretero tendrán un valor de 0, mientras en los costos variables se incluirán el valor total del costo de operación sobre un par origen-destino.
- El número de servicio disponibles para todos los modos dependerá de las capacidades de la infraestructura por modo y la capacidad de manejo de las terminales en el contexto típico de operación, por lo que no se tendrá en cuenta el balance de la flota (i.e. reposicionamiento de vehículos). Solo se considera un número máximo de servicios que pueden manejar las terminales por modo.

- El tiempo de salida de servicios este definido en el intervalo de operación en la terminal por lo que no se permite salida de servicios en periodos diferentes al horario de operación de las terminales. Mientras el tiempo de llegada a las terminales después del cierre de operación es permitido pero penalizado.
- No se permite el transbordo entre camiones
- No se considera congestión en los arcos de la red, por lo que los arcos no disponen de capacidad por modo. Tampoco se tendrá en cuenta la congestión alrededor de las terminales marítimas (puertos) o terrestres (*hubs*).
- El número máximo de contenedores por modo que ejecutan un servicio no puede exceder la capacidad de la misma
- Los contenedores y los modos tienen que sincronizarse en las terminales de transbordo de acuerdo a los tiempos de llegada de los servicios.
- Una orden de carga del producto p puede distribuirse en diferentes servicios.
- Como el corredor presenta distancias mayores a 600 km con una disponibilidad de conexión fluvial, en condiciones óptimas de operación se necesita entre 3 días en alcanzar un par origen destino más equidistantes. Por lo que se propone un horizonte de planificación de una semana (8 días) para integrar todos los modos disponibles en la modelación.
- Para disponer de la sincronización entre los servicios y conexiones con el medio carretero en las terminales cada intervalo en la planificación se establece en un día (24 horas).
- En los transbordos, no se considera el costo de inventario en las terminales de consolidación. Solamente se incluyen los costos asociados al manejo de la carga durante en descargue a terminal y cargue hacia el siguiente modo.

Para alcanzar el máximo valor al transporte sincromodal, la formulación del modelo integra los anteriores supuestos para modelar la operación en un corredor de carga multimodal, aumentando el nivel de cooperación y designando la toma de decisiones de todo el sistema en un solo actor, con el propósito de determinar con información actualizada una decisión óptima dependiendo de los requerimientos y eventualidades de la demanda e infraestructura y recursos disponibles del sistema.

3.1.2. Representación de la demanda

Usualmente los servicios en las redes de transporte presentan cierta periodicidad en las ordenes de carga realizadas por los productores. Pero lo anterior, no implica que se puede asumir que se tiene la certeza del comportamiento de la demanda durante el horizonte de planificación debido a los múltiples factores externos que afectan la producción en una economía (i.e. clima, transporte, política).

Esta convergencia de factores genera que la demanda presente cierta aleatoriedad, ocasionando un problema de optimización y computacional más complejo al manejar parámetros estocásticos y probabilísticos. Como simplificación a nuestro problema, el modelo planteado presentará una demanda determinística, espaciada temporalmente a lo largo del horizonte de planificación con su disponibilidad y el tiempo de entrega asociado a un par origen-destino. En Lium et al. (2009); Perez

Riviera & Mes (2017) y Xu et al. (2015) los autores realizan una documentación sobre demandas estocásticas en problemas de carga intermodales y sincromodales.

Por lo general, las demandas de cada individuo se pueden agregar en clúster que tiene como representación una zona determinada. Esta agregación permite reducir la complejidad del modelo necesitando menos información al disminuir el número de focos de producción. Para alcanzar esta sectorización, se agrupo las zonas de producción por tipos de productos y distancias entre focos, con el objetivo de que cada zona pueda representar adecuadamente las conexiones entre los productores y terminales de consolidación o transbordo.

A pesar de que el modelo presenta un enfoque multiproducto, para facilitar el transporte intermodal se usara un conjunto de contendedores homogéneos agrupados en ordenes de carga con igual características físicas como volumen y geometría. Definimos el conjunto de ordenes de carga P , donde queda especificado el número de ordenes de carga que pueden manejar cada una de las terminales propuesta en la red del modelo.

Para cada orden de carga, se identifica la zona de origen asociada a una terminal $i = o(p)$, donde se especifica el instante el cual la carga se encuentra disponible en el tiempo h_p . De igual forma, se establece el puerto de destino asociado a la terminal $j = d(p)$ con su tiempo límite de entrega e_p . Cabe mencionar nuevamente que dentro del alcance de nuestro modelo proponemos un corredor unidireccional con el movimiento de carga tipo exportación. Mientras, el numero g_p^i representa la cantidad de contenedores para la orden de carga p disponibles en la terminal i para ser transportada en su par origen-destino.

$$w_p^i = \begin{cases} g_p^i & \text{si } i=o(p) \\ -g_p^i & \text{si } i=d(p) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Por último, considerando que los focos de carga generalmente negocian el precio de un determinado volumen de carga en un periodo de tiempo a mediano plazo, se puede asumir que los operadores tienen estimado el potencial de carga de cada productor para así tener en cuenta un estimativo de los recursos necesario para suplir esa demanda y cumplir con los cronogramas pactados con cada uno de los usuarios.

3.2. MODELO MATEMÁTICO PARA LA PROGRAMACIÓN DE SERVICIOS EN EL TRANSPORTE SINCROMODAL

En esta sección, formulamos el modelo matemático de nuestro problema de programación en el transporte de carga sincromodal. El modelo se plantea como un problema de optimización utilizando programación lineal entera mixta. En primer lugar, se realizó una introducción genérica de los conjuntos, conjuntos derivados, parámetros y variables con sus respectivas notaciones. Luego, describimos el comportamiento de los nodos y arcos, y el manejo del tiempo durante el horizonte de planificación, Por último, formulamos la función objetivo y sus restricciones

3.2.1. Notación

Con el objetivo de que la formulación matemática para la sincronización de la programación de los servicios sea más clara, las siguientes notaciones son utilizadas para describir los conjuntos, parámetros y variables de decisión.

3.2.1.1. Conjuntos

En esta sección presentamos los conjuntos que identifican el dominio entre los atributos para la formulación matemática de nuestro modelo. Los conjuntos se encuentran categorizados en cuatro grupos dependiendo de la tipología de las variables que identifican cada conjunto. Estos conjuntos hacen referencia específicamente a la descripción de la red, ordenes de carga, modo-servicio y definición del tiempo.

\mathcal{N}	Terminales (nodos) disponibles en la red, indexado en i $i \in \{1, \dots, \mathcal{N}\}$
K	Nodos de transbordo, indexado en k $k \in \{1, \dots, K\}, K \subseteq \mathcal{N}$
\mathcal{A}	Conexiones (arcos) disponibles entre terminales, indexado en a $\mathcal{A} = \{a(i, j) : i, j \in \mathcal{N} \mid i \neq j\}$
C	Conjunto de rutas factibles que conectan un par origen-destino a través de una terminal de transbordo, indexado en c . $C = \{a(i, k) \cup a(k, j) : i, j \in \mathcal{N}, k \in K \mid i \neq j \neq k\}$
M	Modos disponibles en la red, indexado en m $m \in \{1, \dots, M\}$
P	Órdenes de carga, indexados por p $p \in \{1, \dots, P\}$
N	Días en el horizonte de planificación, indexado en n $n \in \{1, \dots, N\}$
V	Tipos de modo-servicios disponibles, indexado por v . $v \in \{v_1, v_2, \dots, V\}$
L	Cambios entre modos-servicios disponibles para las diferentes terminales de transbordo, indexado por l $l \in \{v_1 v_2, v_1 v_3, \dots, L\}$
D	Conexiones factibles entre días para los modos-servicios disponibles entre las terminales de transbordo, indexado en d $d \in \{111, 112, \dots, D\}$

3.2.1.2. Conjuntos derivados

Una vez identificados los conjuntos principales del modelo, se definieron los conjuntos para los distintos tipos de integraciones dentro de la red de servicios (SND), relacionando las diferentes conexiones tanto espacial (red) como temporalmente (tiempo).

G_i^+	Arcos que tienen como origen el nodo i , indexado por a $\forall i \in \mathcal{N}; G_i^+ \subseteq \mathcal{A}$
G_i^-	Arcos que tienen como destino el nodo i , indexado por a $\forall i \in \mathcal{N}; G_i^- \subseteq \mathcal{A}$
\mathcal{T}_p	Arcos factibles para la orden de carga p $\forall p \in P; \mathcal{T}_p \subseteq \mathcal{A}$
E_c	Arcos origen-transbordo factibles para la ruta c $\forall c \in C; E_c \subseteq \mathcal{A}$
S_c	Arcos transbordo-destino factibles para la ruta c $\forall c \in C; S_c \subseteq \mathcal{A}$
I_n	Conexiones factibles entre días donde n es el día de salida desde una terminal de origen $\forall n \in N; I_n \subseteq D$
O_n	Conexiones factibles entre días donde n es el día de llegada la terminal de transbordo $\forall n \in N; O_n \subseteq D$
F_n	Conexiones factibles entre días donde n es el día de llegada a la terminal destino $\forall n \in N; F_n \subseteq D$
R_c	Ordenes que carga factibles cuando se usa la ruta c $\forall c \in C; R_c \subseteq P$
H_p	Conexiones factibles entre días para la orden de carga p $\forall p \in P; H_p \subseteq D$
X_m	Tipos de modo-servicios disponibles para el modo m $\forall m \in M; X_m \subseteq V$
J_l	Conexiones factibles entre días para el cambio entre modos-servicios l $\forall l \in L; J_l \subseteq D$
U_l	Tipo de modo-servicio inicial para el cambio de modo-servicio l $\forall l \in L; U_l \subseteq V$
W_l	Tipo de modo-servicio final para el cambio de modo-servicio l $\forall l \in L; W_l \subseteq V$
Q	Conexiones factibles según nodo de transbordo k , ruta c y cambio de modo-servicio l $Q = \{(k, c, l) : k \in K \wedge c \in C \wedge l \in L\}$
B	Disponibilidad en el día n de la orden de carga p $B = \{(n, p) : n \in N \wedge p \in P\}$
G	Conexiones factibles según del día n , arco a y modo-servicio v $G = \{(n, a, v) : n \in N \wedge a \in \mathcal{A} \wedge v \in V\}$
T	Conexiones factibles según el día de salida n_1 , día de llegada n_2 para el modo-servicio v . $T = \{(n_1, n_2, v) : n_1, n_2 \in N \wedge v(m_1, s_1) \in V \mid n_2 = n_1 + s_1 - 1\}$

Z	<p>Conexiones factibles para el nodo de transbordo k según su arco de entrada a_1 y arco de salida a_2</p> $Z = \{(k, a_1, a_2) : k \in K \wedge a_1(i, k) \neq a_2(k, j) \mid (i, j) \notin K\}$
Y	<p>Conexiones factibles para el modo-servicio v_1 y el modo servicio v_2, excluyendo las transferencias entre camiones.</p> $Y = \{(v_1, v_2) : v \in V \mid v_1(m_1, s) \neq v_2(m_1, s)\}$

3.2.1.3. Parámetros

Dentro de las definiciones planteadas en el modelo, se establecieron las constantes que representan los parámetros de operación del sistema dependiendo de las condiciones y supuestos establecidos dentro del alcance de la formulación del modelo, aplicadas específicamente en el contexto del corredor del caso de estudio. Los parámetros se encuentran divididos en tres categorías: tiempo, costos, operación del sistema.

Primero, los parámetros de tiempo que especifican los horarios de operación terminales de origen, transbordo y destino, y la disponibilidad de la demanda en las terminales de origen. Luego, se encuentran los parámetros de operación del sistema, en el cual se encuentran definidos la demanda dentro del horizonte de planificación w_p^i , las constantes u_v , π_n^i y δ_{nm}^i que representan la capacidad del modo-servicio, terminales y el número de servicios disponibles por modo v . Por último se define el parámetro M_r , que es una constante que representa un número muy grande que estará en función del tipo de restricciones aplicable en el modelo.

β	Número de horas de un día
t_o	Hora de apertura de las terminales
t_c	Hora de cierre de las terminales
r_v^a	Tiempo de operación en el arco a para el modo-servicio v $\forall a \in \mathcal{A}, \forall v \in V$
b_p	Tiempo de disponibilidad de la orden de carga p $\forall p \in P$
e_p	Tiempo máximo de entrega de la orden de carga p $\forall p \in P$
h_{vp}	Tiempo de carga-descarga para el modo-servicio v de la orden de carga p $\forall v \in V, \forall p \in P$
$M_{1,2}$	Máximo valor asociado al tipo de restricción (1. carga, 2. tiempo)
u_v	Capacidad del modo-servicio v , $\forall v \in V$
π_n^k	Capacidad de la terminal de transbordo k en el día n , $k \in K, n \in N$
δ_{nm}^i	Numero de servicios máximo en la terminal i en el día n para el modo m $\forall i \in \mathcal{N}, \forall n \in N, \forall m \in M$
w_p^i	Demanda en la terminal i para la orden de carga p $\forall p \in P, i \in \mathcal{N}$

3.2.1.4. Parámetros en la función objetivo

En la función objetivo se definieron los parámetros que relacionan los costos de operación del sistema. Nuestro modelo presenta tres tipos de costos para la operación, primero los costos de transporte que especifican los costos fijos y variables por utilizar el sistema determinado modo, y los costos por cargue y descargue en las terminales de transbordo. Segundo, se encuentran las penalidades por los incumplimientos en la operación de las terminales y los requerimientos pactados para la entrega de la carga. Por último, se describe los costos asociados a las externalidades por cada tipo de modo-servicio v .

f_v^a	Costos fijos en el arco a del modo-servicio v , $\forall a \in \mathcal{A}, \forall v \in V$
c_v^a	Costos variables en el arco a para el modo-servicio v . $\forall v \in V, a \in \mathcal{A}$
α_l	Costo de transbordo para el cambio de modo-servicio l $\forall l \in L$
σ_p	Costo por entregar después del tiempo límite para la orden de carga p $\forall p \in P$
τ_v	Costo de la penalidad por llegar fuera de operación del modo-servicio v . $\forall v \in V$
ε_v^a	Costos externos asociados al arco a del modo-servicio v , $\forall a \in \mathcal{A}, \forall v \in V$

3.2.1.5. Variables de decisión

Dentro de la formulación, se consideraron cuatro conjuntos de variables de decisión asociados al diseño de las redes de servicio. En primer lugar, la variable binaria y_{vn}^a que describe si en el arco a , el modo-servicio v , es usado en el día n . Luego la selección de la variable binaria λ_{vpn}^a , describe si la orden de carga p usa el modo servicio v . La variable binaria γ_{cdl}^k identifica la ocurrencia del transbordo en la terminal k que conecta a través de una ruta c , en las conexiones factibles d , para el cambio de modo-servicio l . Por último, la variable binaria $\rho_{vn_1n_2}^a$, identifica si en la terminal de destino del arco a , el modo-servicio v llega después de operación.

Además, se definieron seis conjuntos de variables de decisión continuas. El primero conjunto de variables x_{vpn}^a , determina la cantidad de la orden de carga p que usa el modo-servicio v en el día n . Luego, un conjunto de variables q_{cdlp}^k que identifica la cantidad de la orden de carga p se transborda en la ruta c , del cambio de modo-servicio l . Ahora, los conjuntos de variables μ_{vpn}^a , $\eta_{vn_1n_2}^a$ y $\theta_{vn_1n_2}^a$ identifican las penalidades de tiempo por llegar fuera del tiempo límite de entrega de la orden de carga p y por fuera de operación después del cierre y antes de la apertura de las terminales para el modo-servicio v respectivamente. Por último, los conjuntos de variables t_{vn}^a , determinan los tiempos de salidas de los modos-servicios.

λ_{vpn}^a	Igual a 1 si usa el arco a , del modo servicio v , transportando la orden de carga p , en el día n , 0 en otro caso. $a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P, n \in N$
y_{vn}^a	Igual a 1 si usa el arco a , del modo servicio v , en el día n , 0 en otro caso. $a \in \mathcal{A}, v \in V, n \in N$

γ_{cdl}^k	Igual a 1 en la terminal de transbordo k que conecta la ruta c , durante la conexión entre días d hay un cambio de modo-servicio l , 0 en otro caso. $k \in K, c \in C, d \in D, l \in L$
$\rho_{vn_1n_2}^a$	Igual a 1 si en el arco a , donde se mueve el modo-servicio v , desde el día salida n_1 , llega después del cierre de la terminal en el día de llegada n_2 , 0 en otro caso. $a \in \mathcal{A}, (n_1, n_2, v) \in T$
x_{vpn}^a	Cantidad de carga transportada en el arco a , del modo servicio v , transportando la orden de carga p , en el día n . $a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P, n \in N$
q_{cdlp}^k	Cantidad de carga transportada en la terminal de transbordo k que conecta la ruta c , durante la conexión entre días d , con un cambio de modo-servicio l , para el producto p . $k \in K, c \in C, d \in D, l \in L, p \in P$
t_{vn}^a	Tiempo de salida en el arco a , del modo servicio v , en el día n $a \in \mathcal{A}, v \in V, n \in N$
μ_{vpn}^a	Tiempo adicional por entregar después de la fecha límite en el arco a , del modo servicio v , transportando la orden de carga p , en el día n . $a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P, n \in N$
$\eta_{vn_1n_2}^a$	Tiempo por llegar después del cierre de operaciones de la terminal destino del arco a , en el modo-servicio v , desde el día salida n_1 , hasta el día de llegada n_2 . $a \in \mathcal{A}, (n_1, n_2, v) \in T$
$\theta_{vn_1n_2}^a$	Tiempo por llegar antes de la apertura de operaciones de la terminal destino arco a , en el modo-servicio v , desde el día salida n_1 , hasta el día de llegada n_2 . $a \in \mathcal{A}, (n_1, n_2, v) \in T$

3.2.2. Configuración de la red

En primer lugar, como se mencionó anteriormente, la red del sistema de transporte está descrita sobre una red física que representa un corredor logístico. Dentro del grafo $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{A})$, los nodos físicos $i \in \mathcal{N}$ representan las terminales del sistema (e.g. origen, transbordo, destino) que a su vez se encuentran conectados por los arcos $A = \{(i, j): i, j \in \mathcal{A}\}$ que describen las conexiones entre terminales a través la infraestructura disponible para los diferentes modos en el par origen -destino.

De acuerdo a la formulación dependiente del tiempo de nuestro problema, se representa la operación del sistema durante el horizonte de planificación N a través de una red espacio-tiempo. Donde dividimos el horizonte de planificación en intervalos de tiempo en días $n = \{1, \dots, N\}$. La representación de la red espacio tiempo esta descrita por el grafo $\mathcal{G}(\mathcal{N}^N, \mathcal{A}^{G \cap T})$ donde \mathcal{N}^N representa todas las repeticiones de los nodos \mathcal{N} durante el horizonte de planificación.

Con respecto a los arcos, dependiendo de las características de los servicios ofrecidos para los distintos modos, los comportamientos descritos para los arcos que se conectan en la representación espacio-tiempo para los diferentes días durante el horizonte de planificación serán temporalmente diferentes entre sí, por lo que se hace necesario establecer los conjuntos de días que tienen asociados los diferentes servicios. Las configuraciones de los arcos tendrán en cuenta el día de inicio n_1 que representa la salida de la terminal de origen y mientras el día de llegada n_2 representa el tiempo de llegada a la terminal de destino. El inicio y salida de los arcos durante los periodos de

tiempo está representada intercepción de los conjuntos $(n_1, a, v) \in G \cap (n_1, n_2, v) \in T$, donde el conjunto G representa la disponibilidad en el día de salida n_1 para los arcos de la red a , de los modo-servicios v , mientras el conjunto T define el día de llegada para el modo-servicio v en el día n_2 .

Las conexiones temporales representadas hacia el día de llegada n_2 dentro de la red espacio tiempo dependerá del tipo de servicio s asignado para cada modo-servicio v entre los diferentes arcos a . Teniendo en cuenta, que dentro de los modos se exponen diferentes tipologías que implican diferentes capacidades y velocidades, y entre los arcos presentan variedades de distancias entre nodos. En el caso del tipo de servicio $s = 1$, el modo-servicio v sale la terminal origen i y tiene el mismo día de llegada a la terminal de destino j , se representará de la siguiente forma $n_1 = n_2$. Por otro lado, para los tipos de servicios $s = 2, 3$ y 4 que tiene como día de salida n_1 dispondrán de $n_2 = n_1 + 1$, $n_2 = n_1 + 2$ o $n_2 = n_1 + 2$ respectivamente. En la *Figura 8* se presenta una representación del comportamiento de los arcos temporales que pueden desarrollarse en el conjunto T .

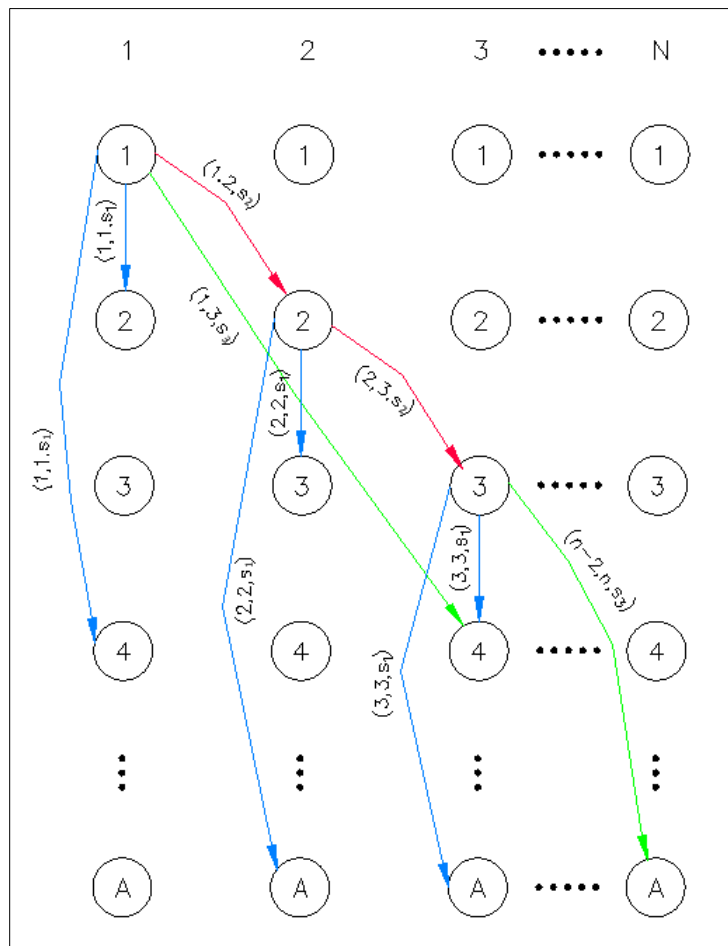


Figura 8 Representación espacio tiempo
Fuente: Elaboración Propia

En la formulación implícita basada en arcos, con el propósito de sincronizar los modo-servicios que pueden manejar las terminales de transbordo es necesario establecer cuáles son las posibles

conexiones entre los distintos modos disponibles. Dichas conexiones entre modo-servicios a nivel de arco están definidas por el conjunto $Y = \{(v_1, v_2) : v \in V \mid v_1(m_1, s) \neq v_2(m_1, s)\}$, aplicados para las terminales de transbordo k . Cabe resaltar que para los vehículos tipo camión m_1 no se permitirá el uso de transbordo entre este tipo de modo.

Por otro lado, en la formulación explícita a nivel de rutas se presenta una configuración para el conjunto que contempla todas las posibles conexiones a nivel de ruta a través del conjunto L . Donde $v_1 v_2, v_1 v_3, \dots, L$, representa el cambio factible desde el modo-servicio v_1 de llegada, hasta al modo servicio v_2 de salida según las conexiones espaciales de la red desde los arcos y temporales desde los días.

Una vez definidos las conexiones de los modo-servicios, a través de la variable binaria γ_{cdl}^k se representa la ocurrencia del transbordo en la terminal k que conecta la ruta c , en las conexiones de días d , para el cambio de modo-servicio l . Esta conexión tanto espacial determinada por el conjunto C como temporal por el conjunto D relaciona la distribución de la carga en las terminales de transbordo según la operación de los tipos de modo-servicios. En la *Figura 9* se presenta la ilustración a través de las rutas c , durante las conexiones factibles d entre el mismo día llegada a todas las terminales $d = 111$ y con día de llegada a las terminales de transbordo y destino los días $n_2 = n_1 + 1$, por lo tanto tomara el valor de $d = 122$.

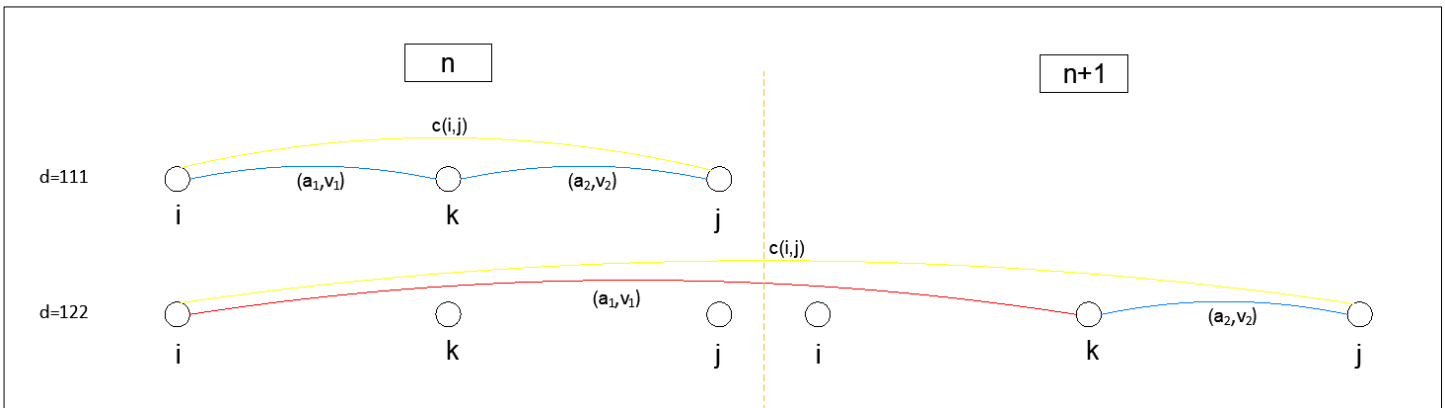


Figura 9 Arcos de conexión entre intervalos que salen del nodo de origen i

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3. Representación espacio-tiempo: enfoque tiempo discreto- continuo

En esta sección describimos el marco del tiempo para la modelación formulada. El horizonte de planificación dependiendo de cada escenario están definido usualmente por una semana, dos semanas o un mes, el cual es dividido por periodos de tiempo, que a su vez pueden estar definido por media hora, una o varias horas, o inclusive uno o varios días (Andersen et al., 2009b). La decisión de la discretización del tiempo para la ocurrencia de los eventos durante la planificación de la operación del sistema de transporte, constituye una importante determinación para el comportamiento del modelo de optimización.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, en el enfoque de tiempo continuo-discreto el marco del dominio del tiempo está dado por el instante inicio del día 1 hasta la terminación del día N . Dentro del horizonte de planificación se divide en subintervalos dependiendo de la definición del problema y a través de un conjunto de subintervalos de tiempo se limita la ocurrencia de los eventos del marco continuo dentro del intervalo especificado. En la Figura 10 se describe la sectorización de los segmentos de tiempo de acuerdo al conjunto de subintervalos aplicados en el horizonte de planificación.

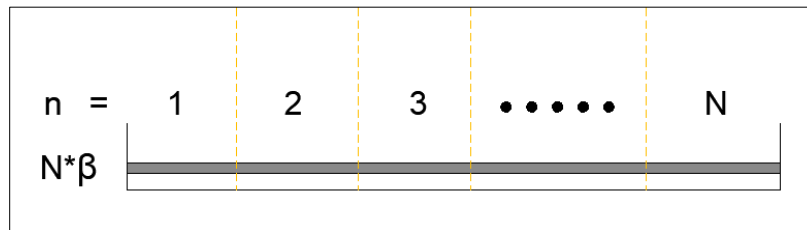


Figura 10 Sectorización del tiempo en el horizonte de planificación

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, la operación de las terminales está descrita en la Figura 11, en la cual se representa los tres tipos de segmento de horario válidos para un intervalo de operación de la red. El horario número uno se representa el tiempo que puede llegar el modo-servicio v antes de la apertura de la terminal en el día $n + 1$. Mientras el numero dos, describe el horario de operación normal de las terminales. Por último, en el horario número tres se representa el intervalo donde puede llegar el modo-servicio v después del cierre de la terminal en el día n . Lo anterior implica que el modo-servicio v para hacer atendido debe esperar a la apertura de la terminal del día $n + 1$.

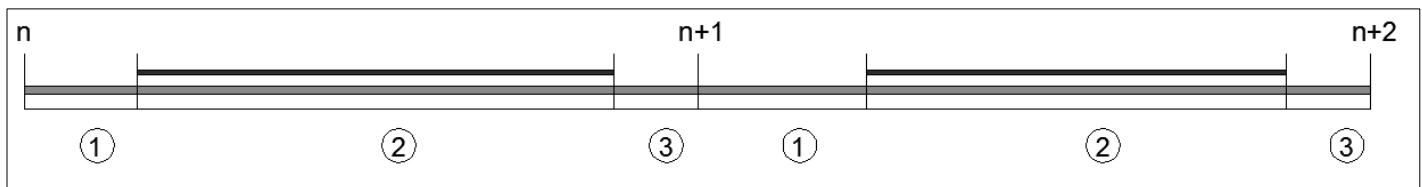


Figura 11 Distribución de la operación en el intervalo de tiempo n y $n + 1$

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4. Función objetivo y restricciones

La función objetivo minimiza los costos sociales (costos privados logísticos más externalidades) dentro de la red de transporte, donde se incluyen por el uso de los modo-servicios, el costo de la carga transbordada, penalidades por retraso en la entrega en los puertos y penalidades por llegar fuera de operación en las terminales. Además, se agregan los costos asociados a las externalidades dependiendo del impacto de cada tipología de los modos.

El primer término de la ecuación (1) representa el costo fijo por utilizar determinado modo-servicio v . El segundo término describe el costo asignado a las características de cada arco disponible para el modo v . El tercer término es el costo de transbordo entre diferentes modos en las terminales k .

El transbordo q_{cdlp}^k incluyen tanto los costos de carga-descarga el cambio de modo-servicio l . El cuarto termino determina las penalidades por los incumplimientos en los requerimientos de entrega de la orden de carga p . Luego, se incluyen los costos asociados a la llegada fuera de operación teniendo en cuenta si es después del cierre o antes de la apertura de las terminales tanto destino como de transbordo. Por último, se introducen los costos de las externalidades para tipo de modo-servicio v . Dentro de estos términos se condiciona la sincronización de los servicios introduciendo la salida de los servicios con la disponibilidad de la demanda, programación de las terminales, manejo de los transbordos y penalidades por demoras en el sistema.

$$\min = \left(\begin{aligned} & \left(\sum_{n \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} f_v^a \cdot y_{vn}^a \right)_{:(n,a,v) \in G} + \\ & \left(\sum_{n \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} c_v^a \cdot x_{vpn}^a \right)_{:(n,a,v) \in G \wedge (n,p) \in B} + \\ & \left(\sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \alpha_l \cdot q_{cdlp}^k \right)_{:p \in R_c \wedge (k,c,l) \in Q \wedge d \in H_p \wedge d \in J_l} + \\ & \left(\sum_{n \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sigma_p \cdot \mu_{vpn}^a \right)_{:(n,a,v) \in G \wedge (n,p) \in B} + \\ & \left(\sum_{n_1 \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{n_2 \in P} \tau_v \cdot \eta_{vn_1 n_2}^a \right)_{:(n_1, n_2, v) \in T} + \\ & \left(\sum_{n_1 \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{n_2 \in P} \tau_v \cdot \theta_{vn_1 n_2}^a \right)_{:(n_1, n_2, v) \in T} + \\ & \left(\sum_{n \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \varepsilon_v^a \cdot x_{vpn}^a \right)_{:(n,a,v) \in G \wedge (n,p) \in B} \end{aligned} \right) \quad (1)$$

Restricciones de conservación de flujos

La diferencia de carga total transportada por el nodo i de ser mayor o igual a la carga que sale del nodo i menos la carga que llega el nodo i para cualquier día n_1 ; siempre y cuando los días de operación del modo-servicio v (i.e. $(n_1, n_2, v) \in T$) estén dentro de la disponibilidad de la orden de carga p en el horizonte de planificación (i.e. $(n_1, p) \in B \wedge (n_2, p) \in B$).

$$\sum_{n_1 \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{n_2 \in N} x_{vpn_1}^a - \sum_{:(n_1, a, v) \in G \wedge a \in G_i^+ \wedge (n_1, n_2, v) \in T \wedge (n_1, p) \in B \wedge (n_2, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p} \quad (2)$$

$$\sum_{n_1 \in N} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{v \in V} \sum_{n_2 \in N} x_{vpn_1}^a \geq w_p^i$$

$$:(n_1, a, v) \in G \wedge a \in G_i^- \wedge (n_1, n_2, v) \in T \wedge (n_1, p) \in B \wedge (n_2, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

$$\forall i \in N, p \in P$$

La restricción (3) relaciona la variable binaria y continua para la carga transportada por el modo-servicio.

$$x_{vpn}^a \leq M_2 \cdot (\lambda_{vpn}^a) \quad (3)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P: (n, a, v) \in G$$

Restricciones de capacidad

Las siguientes restricciones especifican las capacidades de los modo-servicios, de la instalación y la flota asignada en un día de operación. La carga transportada de todas las ordenes de carga p asignados al modo-servicio v no puede exceder la máxima capacidad del modo si este es utilizado (i.e. $y_{vn}^a = 1$). Mientras, si el modo-servicio no es operado, no debe haber ninguna carga transportada por él mismo.

$$\sum_{p \in P} x_{pvn}^a \leq u_v \cdot y_{vn}^a$$

$$:(n, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p \quad (4)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V: (n, a, v) \in G$$

La restricción (5) limita la capacidad de la instalación en la terminal de consolidación o transbordo k , garantizando que la carga manejada de todos los modo-servicios $x_{pvn_1}^a$ que llegan a la terminal en un día n_2 no debe ser mayor a la capacidad de la misma.

$$\sum_{n_1 \in N} \sum_{a \in G^-(i)} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} x_{pvn_1}^a \leq \pi^k$$

$$:(n_1, a, v) \in G \wedge (n_1, p) \in B \wedge (n_1, n_2, v) \in T \wedge a \in \mathcal{T}_p \quad (5)$$

$$\forall k \in K, n_2 \in N$$

Po último, la restricción (6) limita el número de servicios que puede atender la terminal i en un día de operación n para el modo m .

$$\sum_{a \in G^+(i)} \sum_{v \in V} y_{vn}^a \leq \delta_{nm}^i$$

$$:(n, a, v) \in G \wedge v \in X_m \quad (6)$$

$$\forall i \in N, m \in M, n \in N$$

Restricciones para las salidas de los vehículos

Las siguientes restricciones evalúan los tiempos de salidas en las terminales de origen o transbordo de los modo-servicios utilizados. La restricción (7) condiciona que el tiempo de salida del modo-servicios debe ser después del inicio de operaciones de la terminal i . Mientras la restricción (8) condiciona que el modo-servicio no puede salir de la terminal después del cierre de operación de la terminal. Los términos $to + \beta(n - 1)$ y $tc + \beta(n - 1)$ determinan el inicio y cierre de operaciones de la terminal i en el día n respectivamente. En general, el tiempo de salida está definido dentro de la operación de la terminal.

$$t_{vn}^a \geq to + \beta(n - 1) - M_2 \cdot (1 - \lambda_{vpn}^a) \quad (7)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P: (n, a, v) \in G \wedge (n, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

$$t_{vn}^a \leq tc + \beta(n - 1) + M_2 \cdot (1 - \lambda_{vpn}^a) \quad (8)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P: (n, a, v) \in G \wedge (n, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

La restricción (9) representa el tiempo de salida de las terminales de origen o transbordo está definido por el tiempo de disponibilidad de la orden de carga p mas el tiempo de carga-descarga h_{vp} en el modo-servicio v . Esto garantiza que el tiempo de salida del modo-servicio v no podrá ser menor al tiempo determinado por la ultima orden de carga p asignada a dicho modo-servicio.

$$t_{vn}^a \geq b_p + h_{vp} \cdot x_{vpn}^a - M_2 \cdot (1 - \lambda_{vpn}^a) \quad (9)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P: (n, a, v) \in G \wedge (n, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

La restricción (10) relaciona la variable binaria y continua para el tiempo de salida del modo-servicio.

$$t_{vn}^a \geq M_2 \cdot y_{vn}^a \quad (10)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V: (n, a, v) \in G$$

Restricciones para las llegadas de los servicios

Para el modo-servicio v definimos los tiempos de llegada en las terminales de destino en el día n_2 estén dentro de las conexiones propuestas en el conjunto T . La restricción (11) condiciona el tiempo de llegada del modo servicio v estará dentro del día específico n .

$$tc + \beta n_2 \geq t_{vn_1}^a + r_v^a \quad (11)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V: (n_1, n_2, v) \in T \wedge (n_1, a, v) \in G$$

Restricciones de transbordo

Las restricciones asociadas al transbordo tienen como objetivo garantizar un balance entre la carga en tránsito que se descarga y carga entre diferentes modos en las terminales de transbordo k . La variable binaria γ_{cdl}^k especifica si la condición de transbordo tiene ocurrencia en el cambio de modo-servicios l . A continuación, se resume esta formulación en la restricción (12), donde se relaciona la variable binaria y continua para el transbordo.

$$\sum_{p \in P: p \in R_c \wedge d \in H_p} q_{cdlp}^k \leq M_1 \cdot \gamma_{cdl}^k \quad (12)$$

$$k \in K, c \in C, d \in D, l \in L: d \in J_l \wedge (k, c, l) \in Q$$

La siguiente restricción (13) define el balance de carga en la conexión origen-transbordo, especificando que la carga que llega a las terminales de transbordo k desde el modo-servicio inicial $(n_1, a_1, v_1) \in G$ considerando su llegada a la terminal $(n_1, n_2, v_1) \in T$ en el día n_2 debe ser igual a la carga transbordada entre las rutas factibles C teniendo en cuenta la disponibilidad de la conexiones L y el tiempo de la salida y llegada a las terminales de transbordo y destino definidos por el conjunto D . Los conjuntos derivados $R_c, E_c, U_l, I_{n_1}, O_{n_2}, J_l$ y H_p tienen el propósito de relacionar la formulación dual para que haya coherencia desde el nivel de arco, que tiene como llegada una terminal de transbordo en los arcos a_1 , modo-servicio v_1 y el día de salida n_1 con el nivel de rutas entre la ruta c , cambio de modo-servicio l y las conexiones factibles entre días d respectivamente.

$$x_{v_1 p n_1}^{a_1} = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} q_{cdlp}^k \quad : p \in R_c \wedge a_1 \in E_c \wedge v_1 \in U_l \wedge d \in I_{n_1} \wedge d \in O_{n_2} \wedge (k, c, l) \in Q \wedge d \in J_l \wedge d \in H_p \quad (13)$$

$$\forall k \in K, a_1 \in \mathcal{A}, n_1 \in N, v_1 \in V, n_2 \in N: (n_1, a, v) \in G \wedge (n_1, n_2, v) \in T \wedge a \in G_i^- \wedge (n_1, p) \in B \wedge (n_2, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

La restricción (14) define el balance de carga en la conexión transbordo-destino, especificando que carga que sale de las terminales de transbordo k el modo-servicio final $(n_2, a_2, v_2) \in G$ considerando su llegada a la terminal $(n_2, n_3, v_1) \in T$ en el día n_2 debe ser igual a la carga transbordada entre las rutas factibles C teniendo en cuenta la disponibilidad de la conexiones L y el tiempo de la salida y llegada a las terminales de transbordo y destino definidos por el conjunto D . Los conjuntos derivados $R_c, S_c, W_l, O_{n_2}, F_{n_3}, J_l$ y H_p tienen el propósito de relacionar la formulación dual para que haya coherencia desde el nivel de arco, que tiene como salida una terminal de transbordo en los arcos a_2 , modo-servicio 2 y el día de salida n_2 con el nivel de rutas entre la ruta c , cambio de modo-servicio l y las conexiones factibles entre días d respectivamente.

$$x_{v_2 p n_2}^{a_2} = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} q_{cdlp}^k \quad : p \in R_c \wedge a_2 \in S_c \wedge v_2 \in W_l \wedge d \in O_{n_2} \wedge d \in F_{n_3} \wedge (k, c, l) \in Q \wedge d \in J_l \wedge d \in H_p \quad (14)$$

$$\forall k \in K, a_2 \in \mathcal{A}, n_2 \in N, v_2 \in V, n_3 \in N: (n_2, a, v) \in G \wedge (n_2, n_3, v) \in T \wedge a \in G_i^- \wedge (n_2, p) \in B \wedge (n_3, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

Restricciones de sincronización

En caso de que la carga sea transbordada en una terminal de transbordo k , la sincronización para el tiempo de salida del modo-servicio v_2 debe incluir el tiempo de llegada del modo-servicio v_1 . En este caso, se requerirá que el tiempo de salida $t_{v_2 n_2}^{a_2}$ de la terminal k , sea mayor al tiempo de llegada de los servicios que son transbordado ($t_{v_1 n_1}^{a_1} + r_{v_1}^{a_1}$), evitando que se traslapen los servicios que tengan transbordos., el tiempo de salida en la terminal k puede ocurrir en cualquier instante del día n_2 . Los conjuntos derivados $E_c, U_l, I_{n_1}, O_{n_2}, J_l$ y S_c, W_l, J_l desde un nivel de ruta relacionan los viajes que llegan y salen de la terminal de transbordo y que están descritos por las variables $t_{v_1 n_1}^{a_1}$ y $t_{v_2 n_2}^{a_2}$ respectivamente. Por su parte los conjuntos $(k, a_1, a_2) \in Z$ y $(v_1, v_2) \in Y$ vinculan una única posibilidad para la ruta c y el cambio modo-servicio l . Lo anterior, si hay ocurrencia de transbordo, la triple sumatoria solo tendrá una única correlación y siempre tomará un único valor de 1 para la sumatoria de la variable binaria γ_{cdl}^k dando siempre cumplimiento a la restricción.

$$t_{v_2 n}^{a_2} - (t_{v_1 n}^{a_1} + r_{v_1}^{a_1}) \geq M_2 \cdot \left(\sum_{c \in C} \sum_{d \in D} \sum_{l \in L} \gamma_{cdl}^k - 1 \right) \quad (15)$$

$: a_1 \in E_c \wedge a_2 \in S_c \wedge v_1 \in U_l \wedge v_2 \in W_l \wedge d \in I_{n_1} \wedge d \in O_{n_2} \wedge (k, c, l) \in Q \wedge d \in J_l$

$$\forall k \in K, a_1 \in \mathcal{A}, a_2 \in \mathcal{A}, n_1 \in N, v_1 \in V, n_2 \in N, v_2 \in V: (k, a_1, a_2) \in Z \wedge (n_1, n_2, v_1) \in T \wedge (v_1, v_2) \in Y \wedge (n_1, a_1, v_1) \in G \wedge (n_2, a_2, v_2) \in G$$

Restricciones de fuera de operación

Las penalidades dentro de la función objetivo tienen la finalidad de disminuir el impacto de los incumplimientos de los operadores dentro del sistema. En esta formulación matemática se plantearon tres tipos de penalidades: por entrega fuera del tiempo límite de las ordenes de carga, por llegada de los modo-servicios fuera del horario de operación de las terminales de destino o transbordo, ya sea porque por llegar después del cierre en el día n o antes de la apertura en el día $n + 1$. Entre el primer tipo de penalidades, la restricción (16) determina el tiempo adicional de espera con respecto a los requerimientos pactados e_p inicialmente de los productores en recibir su carga en la terminal de destino.

$$\mu_{vpn}^a \geq t_{vn}^a + r_v^a - e_n \quad (16)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V, p \in P: (n, a, v) \in G \wedge (n, p) \in B \wedge a \in \mathcal{T}_p$$

Con respecto al segundo tipo de penalidades por llegada por fuera de operación, se enfoca si los modo-servicios que llegan a la terminal de destino posterior al horario de cierre de la terminal en el día n tienen que esperar el horario de apertura de la terminal en el día $n + 1$. Esta condición genera un costo adicional por el tiempo ocioso de los modo-servicios por el incumplimiento de las programaciones de las terminales. A continuación, en la Figura 12 se muestra una ilustración del tiempo de espera en las terminales por llegar fuera de operación

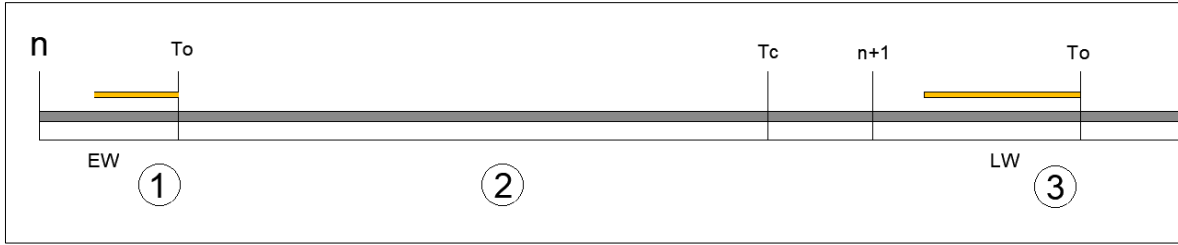


Figura 12 Tiempo de espera por llegada fuera de operación

Fuente: Elaboración Propia

Si se encuentra la ocurrencia de una penalidad por fuera de operación, de acuerdo a la restricción (17) la variable binaria $\rho_{vn_1n_2}^a$ toma el valor de 1, si el modo-servicio $(n_1, a, v) \in G$ llega a la terminal de destino $(t_{vn_1}^a + r_v^a)$ en el día n_2 después del cierre de operaciones $(tc + \beta(n_2 - 1))$. Si no hay ocurrencia de llegada por fuera de operación $\rho_{vn_1n_2}^a = 0$, por lo que la restricción (17) siempre será verdadera en caso de que se cumpla alguna penalidad.

$$(tc + \beta(n_2 - 1)) - (t_{vn_1}^a + r_v^a) + M_t \cdot \rho_{vn_1n_2}^a \geq 0 \quad (17)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V: (n_1, n_2, v) \in T \wedge (n_1, a, v) \in G$$

Una vez definido la ocurrencia de alguna penalidad, el tiempo de espera por llegar después del cierre de operaciones en el día n_2 esta descrito en la restricción (18), el cual está definido por el tiempo de apertura $(to + \beta \cdot n_2)$ menos el tiempo de llegada de los modo-servicios $(t_{vn_1}^a + r_v^a)$ a las terminales, siempre y cuando se encuentre la ocurrencia de una llegada por fuera de operación.

$$\eta_{vn_1n_2}^a \geq (to + \beta \cdot n_2) \cdot \rho_{vn_1n_2}^a - (t_{vn_1}^a + r_v^a) \quad (18)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V: (n_1, n_2, v) \in T \wedge (n_1, a, v) \in G$$

Por otro lado, El tiempo de espera por llegar antes del inicio de operaciones en el día n_2 esta descrito en la restricción (19), el cual está definido por el tiempo de apertura to en el día n_2 menos el tiempo de llegada de los modos servicios $(t_{vn_1}^a + r_v^a)$ a las terminales, siempre y cuando se encuentre la que el modo-servicio ha sido utilizado.

$$\theta_{vn_1n_2}^a \geq (to + \beta \cdot (n_2 - 1)) \cdot y_{vn_1}^a - (t_{vn_1}^a + r_v^a) \quad (19)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V: (n_1, n_2, v) \in T \wedge (n_1, a, v) \in G$$

Integridad y no negatividad

Por último, las siguientes restricciones (20) a la (29) son para las variables binarias o de no negatividad

$$y_{vn}^a \in \{0,1\} \quad (20)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, \forall v \in V, \forall n \in N$$

$$\lambda_{vpn}^a \in \{0,1\} \quad (21)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, \forall P \in p, \forall v \in V, \forall n \in N$$

$$\gamma_{cdl}^k \in \{0,1\} \quad (22)$$

$$\forall k \in K, c \in C, d \in D, l \in L$$

$$\rho_{vn_1n_2}^a \in \{0,1\} \quad (23)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V$$

$$t_{vn}^a \geq 0 \quad (24)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, \forall v \in V, \forall n \in N$$

$$x_{vpn}^a \geq 0 \quad (25)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, \forall P \in p, \forall v \in V, \forall n \in N$$

$$q_{cdlp}^k \geq 0 \quad (26)$$

$$\forall k \in K, c \in C, d \in D, l \in L, P \in p$$

$$\mu_{vpn}^a \geq 0 \quad (27)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, p \in P, v \in V, n \in N$$

$$\eta_{vn_1n_2}^a \geq 0 \tag{28}$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V$$

$$\theta_{vn_1n_2}^a \geq 0 \tag{29}$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, n_1 \in N, n_2 \in N, v \in V$$

4. CASO DE ESTUDIO: CORREDOR DE CARGA VALLE DEL RIO MAGDALENA

En este capítulo se realizará una descripción del caso de estudio con sus escenarios y experimentos tomando como contexto el corredor de carga del valle del río Magdalena que conecta la región centro-andina del país con los puertos en el Caribe colombiano. El capítulo está organizado de la siguiente manera: en primer lugar, un análisis del transporte de carga multimodal en Colombia, seguido de una descripción de la red intermodal usada para comprobar nuestro modelo matemático. Luego, continúa con un resumen de los parámetros de entrada y definición del horizonte de planificación de acuerdo a la red de transporte analizada. Por último, se describe los escenarios y experimentos planteados para indagar y reconocer el comportamiento del transporte sincromodal en contexto de economías en desarrollo.

4.1. Transporte multimodal en Colombia

En las últimas décadas Colombia ha visto un crecimiento significativo de sus exportaciones, en gran medida por la entrada de los tratados de libre comercio con diferentes países u asociaciones económicas interregionales (e.g. unión europea). Este aumento ha ocasionado grandes beneficios a nivel de la economía del país, pero también ha generado múltiples retos desde el punto de vista de infraestructura, debido a los rezagos que presenta el país en materia de logística específicamente en transporte de carga.

Debido a que Colombia ha tenido una política basada en transporte por el medio carretero para suplir sus necesidades de logística, ha ocasionado un constante subdesarrollo en el uso de otros modos de transporte, que son a su vez aún más eficientes. El transporte carretero en el contexto colombiano, presenta particularmente un elevado costo de operación debido en gran medida a los costos de combustibles, el mal estado de las carreteras y los altos precios de los peajes. Según el CONPES 3758 (2013), los costos transporte de carga en la importación y exportación de productos en Colombia tienen una participación de 78,76% en los costos totales de una operación de comercio exterior, mientras en otras regiones como en los países de alto ingreso de la OCDE representan 48,5%, Asia Oriental y el Pacífico (40%) e incluso América Latina (43%). Esta situación genera que Colombia, se encuentre en desventaja en materia de comercio internacional con las diferentes zonas económicas del mundo por los altos costos de transporte de carga.

Esta inequidad en el desarrollo de infraestructura se ve reflejado de igual forma en un bajo nivel de multimodalidad en comparación a otros países del mundo. De acuerdo a los datos arrojados por ANIF (2014), el porcentaje en el transporte de carga que usa algún tipo de multimodalismo en Colombia es de tan solo 1.5% mientras que en países de Europa la cifra alcanza más del 60%. Esto se explica porque estos países, llevan décadas implementando políticas para migrar del medio carretero hacia modos que puedan ser más eficientes y amigables medioambientalmente.

Específicamente, en cuanto al medio férreo, según el Ministerio de Transporte (2020) en el Plan Maestro Ferroviario, de los más de 3000 km que contaba Colombia hace varias décadas, solo quedan operacionales 420 km, los cuales se encuentran en su gran mayoría monopolizadas por productos a carbón. Con estos lineamientos y priorización en intervenciones plasmados en el PMF, se proyecta

alcanzar la cifra de 1077 km operables en el año 2023, dentro de los cuales se propone la estructuración y factibilidad del llamado tren del Caribe que comunicaría a través de la red férrea del Atlántico los puertos de Cartagena y Barranquilla con el centro del país.

Por último, en cuanto a la red de canales navegables en el territorio colombiano, gracias a gran diversidad de geomorfología (i.e. relieve) se desarrollaron diferentes ríos que proporcionan canales navegables a lo largo del territorio nacional. Con respecto a la cuenca del valle del río Magdalena que presenta una extensión de 2770 km en toda su cuenca, pero debido a la baja inversión en diferentes puntos críticos y el bajo mantenimiento de los calados para la operación de barcasas, el tramo que se encuentra disponible para el transporte de carga se ha reducido desde Barrancabermeja a Barranquilla, alcanzando una longitud de 909 km. Para el Año 2021, se están estructurando dos proyectos con el objetivo de aumentar la capacidad, garantizando un calado durante todo el año para embarcaciones más grandes en el río Magdalena entre Barrancabermeja y Barranquilla y el Canal del Dique que representa la conexión entre el río y el Puerto de Cartagena.

4.2. Red de transporte: Valle del río Magdalena

Para aplicar el modelo propuesto, construimos una red de transporte intermodal en base a la red de transporte multimodal existente en el valle del río Magdalena y los proyectos estratégicos priorizados mencionados en el subcapítulo anterior. Este corredor comunica directamente la región Centro-Andina con la región Caribe del país. Aquí encontramos la disponibilidad de tres medios de transporte: carretero, férreo y fluvial; cada uno con modo disponible: camión, tren y barcasas respectivamente.

En el medio carretero, en los últimos años se ha puesto en marcha una serie de proyectos de infraestructura con el propósito de optimizar las carreteras del territorio nacional. Dentro del marco de estos proyectos denominados concesiones de tercera y cuarta generación, se incluyeron diferentes tramos que hacen parte del corredor del valle del río Magdalena: Ruta del sol Sector 1, 2 y 3, Puerta Hierro – Palmar de Varela -Cruz del Viso y Ruta Caribe.

Como se estableció en los supuestos del modelo, para el medio carretero solo se dispone un único arco disponible entre par origen-destino. Para identificar dicho arco, se usó el Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga – SICETAC – del Ministerio de Transporte Colombiano, que determina el costo y tiempo según el tipo de camión y carga a transportar para origen y destino especificado

En cuanto a la red ferroviaria, se incluyó principalmente, el corredor denominado red férrea del Atlántico, actualmente concesionada para su operación por FENOCO S.A. en el tramo desde el municipio de Chiriguaná (Cesar) hasta el puerto de Santa Marta. En el 2018, después de la afectación de la ola invernal del 2010, el gobierno nacional recuperó el tramo correspondiente desde La Dorada (Caldas) hasta Chiriguaná, reactivando la comunicación en el medio férreo desde la región centro hasta la región Caribe. Además, la red incluye un proyecto estratégico a nivel nacional, denominado Tren Caribe que se encuentra descrito en el Plan Maestro Ferroviario. Este proyecto ofrece agregar a la red una opción de conectividad férrea para los puertos de Cartagena y Barranquilla, puesto que actualmente la red férrea del Atlántico sólo llega al puerto de Santa Marta.

Por su lado el río Magdalena, ofrece las mayores opciones de competitividad por su trazado estratégico a lo largo del territorio nacional. Con el objetivo de repotenciar el transporte de carga fluvial, actualmente se encuentra es estructuración dos proyectos para garantizar la navegabilidad desde Barrancabermeja hasta los puertos de Barranquilla y Cartagena. El primer proyecto denominado APP (Asociación público-privada) Río Magdalena, comprende el tramo desde Barrancabermeja hasta Puerto de Barranquilla. En segundo lugar, el proyecto denominado APP Canal del Dique, optimizara la arteria desde el municipio de Calamar (Bolívar) hasta el puerto de Cartagena. Estos proyectos en su conjunto garantizarían un calado de operación para un vehículo tipo remolcador con seis barcasas (R-2B-2B-2B) capaces de acomodar hasta 192 contenedores durante las 24 horas al día todo el año.

En nuestra red intermodal se encuentran planteadas siete (7) terminales distribuidas de la siguiente manera: dos (2) terminales de origen (i.e. generadoras) ubicadas en dos de los focos de producción más importante del país, como lo son la región centro (e.g. Bogotá, Cundinamarca, Boyacá, Meta) y la región andina (e.g. Antioquia, Caldas, Tolima). Por otro lado, se incluyeron tres de los principales puertos del Caribe ubicados en las ciudades costeras de Cartagena, Barranquilla y Santa Marta.

Al no contar con terminales especializadas de transbordo, se introdujeron a la red dos terminales de transbordo separadas geográficamente entre sí, con disponibilidad de conectar a los tres medios de transporte, ofreciendo una red más robusta desde el punto de vista del intercambio modal.

La primera terminal de transbordo se encuentra ubicada en el municipio de Barrancabermeja (Santander). Este municipio es estratégico a nivel nacional ya presenta una importante industria de hidrocarburos, además, en su área de influencia presenta conectividad para diferentes medios de transporte. Mientras, la segunda terminal de transbordo está ubicada en el municipio de Tamalameque; municipio ubicado cerca de las minas de carbón del departamento del Cesar y de igual forma con opciones de conectividad para los tres medios de transporte.

En la Figura 13 se ilustra la red intermodal en el valle del río Magdalena. Las terminales de origen, transbordo y destino están representadas por cuadrados, círculos y triángulos respectivamente. En cuanto a los medios de transporte, se presentan de acuerdo a los arcos factibles que minimizan el costo para el medio carretero, y para los medios férreo y fluvial se presentan la infraestructura actual más los proyectos estratégicos del corredor previamente mencionados.



Figura 13 Red de transporte sincromodal
Fuente: Elaboración Propia

4.3. Parámetros de entrada

A continuación, se definen los parámetros de entrada para la formulación del modelo. Cabe recordar que todos los parámetros son de tipo determinísticos, por lo que se tiene conocimiento de estos a lo largo del horizonte de planificación, y son adaptados de acuerdo a las características del caso de estudio en el contexto de Colombia. Sin embargo, debido a que actualmente no se encuentra con toda la infraestructura disponible, se tomaron como valores de referencia para algunos parámetros.

4.3.1. Demanda

En las últimas décadas, las exportaciones en Colombia han estado centralizadas en productos provenientes de la minería, hidrocarburos y sus derivados. Para el año 2017, representaban un 47,2% del total de las exportaciones. Por su parte, la agricultura representa a través del café, banano y las flores una participación del 15,06%. Además, otros productos derivados de la industria presentan una participación de 8,68% (Rojas, 2019). Esta participación ha conllevado que los medios de transporte de mayor eficiencia como el férreo y fluvial se encuentren monopolizados por la extracción de carbón e hidrocarburos respectivamente.

A pesar de esta sectorización de la carga, estos medios de transporte tienen la capacidad de manejar mucha más carga industrializada, prometiendo dinamizar las exportaciones del país. Según ANI (2020), con la recuperación del tramo entre La Dorada (Nodo generador) y Chiriguaná solo en los primeros 5 meses de año se han movilizado más de 20.000 toneladas de carga, concentrado principalmente como plásticos, cafés entre otros. Por su lado para el río Magdalena, de acuerdo con Cormagdalena (2020), entre los primeros dos (2) meses del año se han movilizado un promedio de 35.700 toneladas de carga seca, representadas en un 48% por carga contenerizada.

Con respecto a la demanda a nivel de departamento, la carga para exportación en el país está concentrada en los departamentos de Cundinamarca, Antioquia y Valle del Cauca que en total concentran el 50% de la carga de exportación del país (Rojas, 2019). Como se describió anteriormente en nuestro caso de estudio, se utilizaron dos focos de producción ubicados en la región centro y andina que tienen como principal generador de carga los departamentos de Cundinamarca y Antioquia. Estos departamentos representan un 19,4% y 19,3% de la carga total del país respectivamente (ver *Figura 14*). Con la ubicación de estas terminales en los principales focos de producción se garantiza que entre el corredor sobre el valle del río Magdalena se presenten importantes volúmenes de carga.

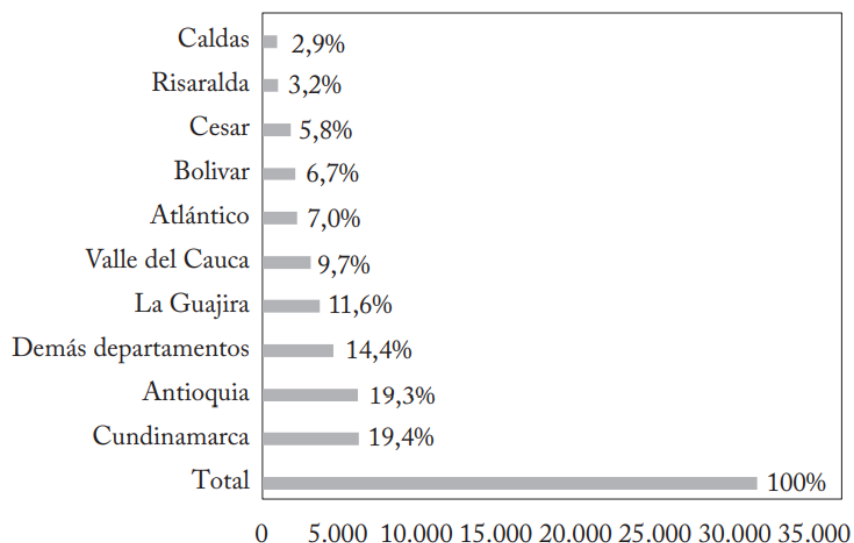


Figura 14 Exportaciones por departamento
Fuente: DANE, 2017 tomado (Rojas, 2019)

Para el desarrollo del modelo matemático es necesario conocer de antemano la distribución de la demanda con sus protocolos de entrega (i.e. franja horaria). De acuerdo al análisis de la carga movilizada en Colombia, entre la línea férrea del Atlántico y el río Magdalena se están movilizando aproximadamente unos 1.800 contenedores mensuales. A partir de esta movilización base y teniendo en cuenta los proyectos estratégicos sobre la línea férrea y optimización del canal navegable que representará aumento de la capacidad de la infraestructura, para esta representación del caso de estudio se supone un grupo de ordenes diarias de carga máximo de 500 contenedores por terminal generadora. Esta demanda es inferior a la capacidad total de los modos de transporte disponible, por lo que se garantiza que la red puede suplir las necesidades de demanda. En cada orden de carga se establece unos tiempos de disponibilidad en la terminal de origen y tiempos de entrega en la terminal de destino realistas y lo suficientemente amplio para que se puedan ejecutar operación de un servicio en un par origen-destino.

4.3.2. Capacidad de los modos disponibles

Como se describió en los supuestos y en la descripción de la red intermodal, en nuestro modelo se presentarán tres modos de transporte: camión, tren y barcazas. Con el propósito de proveer condiciones similares de capacidad se estableció una equivalencia entre los modos de transporte disponibles en la red. En la Tabla 2 tomada del CONPES 3758 (2013), se realizó un comparativo de la flota necesaria para suplir una demanda de 7.200 toneladas, la cual necesita la siguiente distribución de las capacidades por modo.

Modo	Toneladas por Unidad	Equipo para 7.200 Ton (Unidades requeridas)	Velocidad (km/h)
Carretero	35	206 camiones	50
Férreo	35 ton/vagón	204 vagones	25
Fluvial	1.200 ton/barcaza	6 barcazas	14

Tabla 2 Comparativo capacidades entre modos

Fuente: CONPES 3758 (2013) tomado del Ministerio de Transporte, 2004 y Diseño de obras de encauzamiento, Emdepa, 2011.

En base a este comparativo, para que todos los modos estén bajos los mismos supuestos iniciales de capacidad y teniendo en cuenta la equivalencia para cada modo, se establecieron las capacidades tipo para los modo-servicios u_v de la siguiente manera.

- Camión C3S3: 200 Contenedores por servicio.
- Barcazas: 192 Contenedores. Teniendo en cuenta los calados mínimos operacionales para la APP del río Magdalena del año 2014, se debe tener en operación un vehículo tipo R-2B-2B-2B, que puede acomodar hasta 192 contenedores de 35 toneladas.
- Tren: 200 vagones.

4.3.3. Distancias y tiempos de viaje

La información para las distancias y los tiempos de viaje para los modos de transporte fue estimada de la siguiente manera: para el medio carretero se recolectó los resultados obtenidos en el Sistema

de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga – SICETAC – del Ministerio de Transporte Colombiano para cada origen-destino según el vehículo tipo para el modo carretero, definido previamente y el tipo de carga contenerizada.

Con relación al modo tren y barcazas, a través de la herramienta de Google Earth se estableció el trazado existente para cada infraestructura (i.e. vías férreas y canales navegables). Mientras para las velocidades se tomaron los valores obtenidos en la Tabla 2 descritas en el CONPES 3758 (2013). Una vez definidas las distancias y las velocidades, se obtuvieron los tiempos de viajes aproximados para el par origen-destino según el modo de transporte. En el Anexo A se encuentran relacionados las distancias y tiempos de viajes utilizadas en nuestra red intermodal.

4.3.4. Costos fijos y variables

En relación a los costos de operación para la infraestructura disponible o en proyección de los modos de transporte, se definieron de acuerdo a los supuestos establecidos en el modelo. Para el modo camión, el costo fijo lo consideramos igual a 0, debido a que los camiones son unidades de carga en el servicio. Lo anterior, implica que el costo total de operación por camión está relacionado en el costo variable para el servicio. Este costo se obtuvo mediante el Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga – SICETAC – del Ministerio de Transporte Colombiano, para cada par origen-destino disponible en la red.

Para el modo tren y barcazas se tomó como referencia una distribución de 40-60 de los costos fijos y variables, es decir, que el costo fijo pesa un 40% del costo total de operación del servicio. Mientras el costo total de operación de para un convoy de 6 barcazas se estableció en \$960 por contenedor – km. Por su lado, para los trenes se tomó como referencia un costo total de \$110 por contenedor – km. En el Anexo A se encuentran relacionados los costos fijos y variables utilizados en nuestra red intermodal.

4.3.5. Costos de transbordo

Por otro lado, al no contar con terminales especializadas para manejar transbordos se utilizaron valores de referencia para los costos de transbordo. De acuerdo al tipo de transbordo, se usaron valores para un cambio modal carretero-férreo, carretero-fluvial y férreo-fluvial de \$240.000, \$96.000 y \$180.000 por contenedor transbordado respectivamente.

4.3.6. Costos externalidades

Según la investigación elaborada por Marquez & Cantillo (2013) se establecieron los costos de las externalidades estimadas para el transporte de carga en Colombia. Los autores concluyeron que el promedio de los costos externos adaptado para US\$/contenedor-km en el medio carretero es de 0,448 US\$/contenedor-km, para el medio férreo es de 0,0512 US\$/contenedor -km y para el medio fluvial 0,00336 US\$/contenedor -km.

4.4. Horizonte de planificación

El horizonte planificación como se mencionó dentro de los supuestos debido a la tipología de los vehículos será de por lo menos 8 días, dividido en intervalo de operación diarios (24 horas). Lo anterior, teniendo en cuenta que el recorrido más largo del modo con menores velocidades, que, en nuestro caso, es el servicio por transporte fluvial desde la terminal del Centro del país a Barranquilla en promedio tiene una duración de 3 días.

Con el fin de simular una operación convencional de las terminales de origen, transbordo y destino se establecieron horarios de operación desde las 06:00 AM hasta las 22:00 PM para todos los días en el horizonte de planificación. Este horario implica, que la llegada de los servicios fuera de esta franja horaria conllevará a la imposición de una penalidad para los vehículos.

5. RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS Y EXPERIMENTOS

En este capítulo hacemos una descripción de los experimentos y escenarios evaluados con resultados, de acuerdo a nuestra formulación para la implementación del transporte sincromodal aplicado a nuestro caso de estudio. Primero, definimos algunas apreciaciones aplicables al desarrollo de la ejecución del modelo de optimización. Luego, relacionamos los diferentes experimentos y escenarios evaluados para examinar el comportamiento del transporte de carga bajo distintas metodologías. Por último, realizamos un análisis de los diferentes resultados de acuerdo a las consideraciones propuestas para los experimentos.

5.1. Análisis preliminar y método de solución

En primer lugar, para resolver nuestra formulación, es necesario definir el valor del número muy grande M_r , según el tipo de restricción aplicable para el caso de estudio.

El valor de M_r utilizado en el modelo, se divide en dos tipos de restricciones. En primer lugar, las restricciones que relacionan el movimiento de carga que denominamos M_1 . Estas restricciones están limitadas por el valor de la capacidad más grande disponible según los tipos de modos de nuestra red, en este caso $M_1 = \max |u_v| = u_{ferreo} = 200$. En segundo lugar, las restricciones a asociadas al tiempo M_2 , se limitan al tiempo en que puede ocurrir un evento, en nuestro caso será el valor más lejano en el horizonte de planificación, por lo que $M_2 = \beta * N + t_0 = 198$.

Ahora, el modelo planteado en el capítulo 3.2 fue programado en AMPL usando como software de optimización CPLEX. Debido al número de variables y restricciones del modelo, se hizo necesario el uso del servidor Neo Server con una restricción de 8 horas, el cual es el máximo permitido para las corridas en este servidor público. Para más detalles de las características del servidor Neo Servir, se pueden referir a Czyzyk et al. (1998) y Dolan (2001). El modelo fue adaptado de acuerdo a las consideraciones y parámetros expuestos en los capítulos anteriores, refiriéndose específicamente al contexto de la red intermodal del valle del Rio Magdalena. Tanto los escenarios y los experimentos comparten las siguientes características.

1. Los costos, tiempos de viajes y demanda se mantienen constantes para cada uno de los experimentos.
2. Se mantuvieron los tres modos de transporte cada uno conservando las mismas capacidades de los vehículos y números de servicios permitidos por arco.
3. Se utilizaron 8 días en el horizonte de planificación para simular una semana de operación típica.
4. Todos tuvieron el mismo número de terminales y conexiones factibles entre cada una de estas.

5.2. Escenarios y experimentos

A continuación, definimos los escenarios y experimentos planteados para evaluar el comportamiento del modelo propuesto.

5.2.1. Definición de los escenarios

Con el propósito de indagar el impacto en los costos percibidos en la sociedad (i.e. externalidades) del transporte sincromodal, se evaluarán dos escenarios de modelación para cada uno de los experimentos que representan las diferentes metodologías estudiadas en esta investigación. A continuación, se realiza una breve descripción de cada escenario de modelación.

1. Desde el punto de vista del privado, en la modelación solamente se incluirán los costos logísticos y de manera independiente se estimarán el impacto de las externalidades asociadas a cada modo de transporte. Lo anterior implica que la ecuación (1) se elimine el ultimo termino para el cálculo de las externalidades de la función objetivo.
2. Desde el punto de vista social, en la asignación del modelo se tendrá en cuenta el impacto de las externalidades. Por lo que, en la función objetivo se agregarán el efecto de las externalidades, tal como está plasmado en la ecuación (1).

Este enfoque de modelación permitirá estudiar cual es el impacto de aplicar una metodología como el transporte sincromodal desde una perspectiva financiera manejada exclusivamente por los operadores logísticos (i.e. privada) o por el contrario con un planteamiento económico administrado desde lo gubernamental (i.e. social). Los diferentes resultados son discutidos más adelante en el capítulo.

5.2.2. Definición de los experimentos

En orden de evaluar los posibles beneficios del transporte sincromodal con respecto a otras metodologías de transporte de carga se definieron tres tipos de experimentos. Cada uno consideradas condiciones de operación y flexibilidad diferentes, tratando de reproducir las condiciones actuales y potenciales desarrollos en el transporte de carga de Colombia

1. Experimento Base: se utilizan las consideraciones de operación plasmadas en el inicio del capítulo (modos, aglomeración de la carga, penalidades), pero se restringe las siguientes características: los eventos de transbordos quedan prohibidos, es decir, que para transportar las ordenes de carga entre un par origen-destino, es necesario utilizar viajes directos con la posibilidad de distribuir la carga entre diferentes modos de transporte.

Esto implica que las restricciones (12) a la (15) se supriman en este experimento. Además, para evitar que en las terminales de transbordo k se este transportando carga. en el parámetro δ_{nm}^k se adopta un valor de igual a cero.

$$\delta_{nm}^k = 0$$

2. Experimento Intermodalidad: se permite el uso de transbordo y la sincronización de servicios, pero se adaptó un esquema de programación preestablecida para cada uno de los modos de transporte. Este planteamiento reproduce una rigidización de las programaciones de los

servicios, reduciendo la adaptabilidad de la red de transporte. Lo anterior implica introducir un nuevo parámetro, denominado ts_v , que condiciona la salida del modo-servicio en una hora preestablecida dentro del horario de operación en la terminal.

Para dar cumplimiento a este horario preestablecido es necesario modificar la restricción (10) de la siguiente manera:

$$t_{vn}^a \geq (\beta * (n - 1) * ts_v) \cdot y_{vn}^a \quad (10)$$

$$\forall n \in N, a \in \mathcal{A}, v \in V: (n, a, v) \in G$$

Esta nueva restricción garantiza que si el modo-servicio v es utilizado siempre tendrá como horario de salida el parámetro ts_v , dentro de cada día del horizonte de planificación.

3. Experimento Sincromodalidad: se agregaron todas las características asociadas al desarrollo de un transporte sincromodal, dando cumplimiento a todas las restricciones y supuestos planteados en el capítulo 3.2.

En general, en la Tabla 3, los experimentos están ordenados de menor a mayor nivel de integración. Dentro del caso de estudio, cada experimento será evaluado sobre los escenarios previamente descritos, para analizar el impacto sobre la asignación de los flujos en la medida que se aumenta el nivel de integración y se analiza el problema desde un punto de vista privado a social (i.e. externalidades)

Experimento	Aglomeración de la carga	Penalizaciones	Flexibilización de horarios	Transbordo
1	Si	Si	Si	No
2	Si	Si	No	Si
3	Si	Si	Si	Si

Tabla 3 Comparativo entre experimentos

Fuente: Elaboración propia

5.3. Resultados

Para comprobar los resultados de las asignaciones de carga para las diferentes metodologías que están plasmados en los experimentos y escenarios, se evaluaron los indicadores asociados a los costos de transporte, tanto privados como externos, cantidad de transbordo, utilización de los servicios y tiempos por actividades. Esta evaluación, se hizo en referencia al experimento base con el propósito de identificar el comportamiento de la red a la medida que se va aumentando el nivel la flexibilidad e integración del sistema.

En primer lugar, se analizó el efecto de la integración de los costos externos dentro de la modelación del problema o caso de estudio. Debido al número de combinaciones entre las ordenes de carga, terminales y número de días, se tomó de manera de ejemplo la asignación de la carga para la orden número (1) en la red. en la *Figura 15* y *Figura 16* se presenta la definición de la programación de los

servicios necesarios para cumplir las necesidades de carga, sin incluir y con las externalidades dentro de la modelación respectivamente.

Para el caso de esta orden de carga, se puede evidenciar que al incluir las externalidades en la toma de decisiones se produjo un aumento en la utilización de los transbordos. Esto se puede explicar al incluir las externalidades de los camiones, se hace más competitivo el uso de los modos de transporte más amigables medioambientalmente.

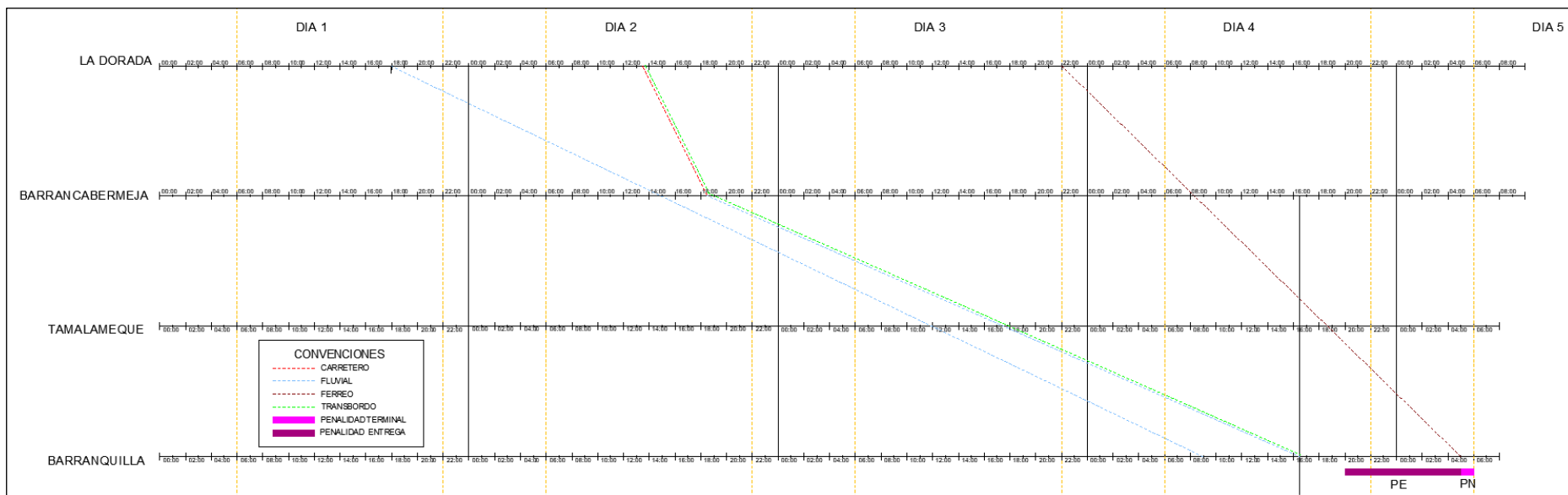


Figura 15 Asignación de carga para la orden de carga 1 en el escenario 1 para el experimento sincromodal

Fuente: Elaboración Propia

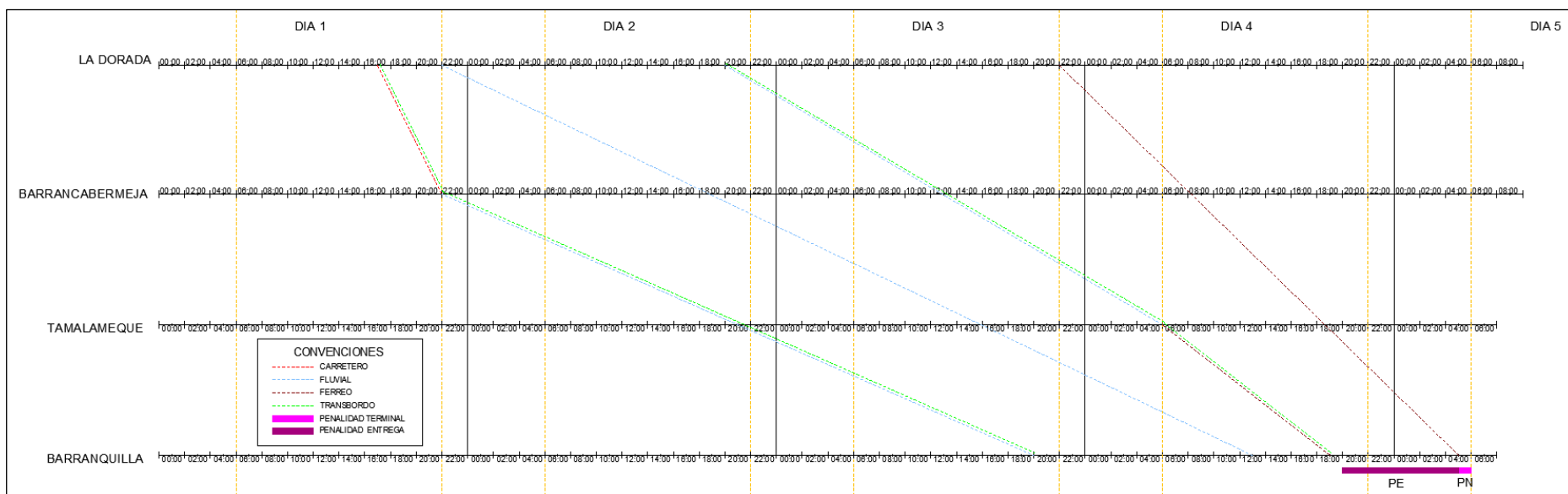


Figura 16 Asignación de carga para la orden de carga 1 en el escenario 2 para el experimento sincromodal

Fuente: Elaboración Propia

5.3.1. Evaluación del impacto de las externalidades.

Durante el análisis del impacto de las externalidades calculadas exógenamente (después de la modelación) y endógenamente (dentro de la modelación) se evidenció una reducción muy pequeña de solo 1,2% en el costo total de transporte de carga como se muestra en la Tabla 4. Sin embargo, se realizaron algunas mejoras con respecto a las penalidades, que explícitamente se ve reflejada en un aumento en los niveles de servicio al incurrir en menores incumplimientos en la carga y terminales.

Además, a pesar de que se apreció un aumento en los costos fijos y transbordo en 0,8% y 4,1% respectivamente, hubo una reducción de los costos totales debido al aumento en el número de los servicios en los modos tren y barcazas, y sus transbordos fue compensado por una menor utilización de transporte a través de camiones, presentando una reducción del 58,3% en la utilización de los camiones disponibles. En la *Figura 17*, con respecto al cambio modal, se reflejó una disminución del 10,1% del cambio hacia modo barcazas y un aumento del 8,9% en el cambio hacia el modo tren, siendo consistente a los valores de la variación de utilización de los servicios con un 13,2% y 3,4% respectivamente. En general, se evidenció que planificar desde una perspectiva social en el transporte sincromodal se presentan mayores beneficios en las externalidades, obteniendo reducciones de aproximadamente de 4%.

INDICADOR	ESCENARIOS SINCROMODALIDAD		DIFERENCIA (%)
	EXTERNALIDADES EXÓGENAS	EXTERNALIDADES ENDÓGENAS	
Costo total (US\$)	3.692.395	3.650.302	1,2
Costo fijo: tren y barcazas (US\$)	665.221	670.364	- 0,8
Costo variable (US\$)	2.014.796	2.000.312	0,7
Costo transbordo (US\$)	101.132	105.420	- 4,1
Costo penalidades (US\$)	33.932	27.286	24,4
Costo externalidades (US\$)	877.314	846.920	3,6
Cambo modal barcazas (%)	51,6	46,8	10,1
Cambo modal tren (%)	48,4	53,2	- 8,9
Cambo modal camión (%)	0,0	0,0	0,0
Utilización barcazas (%)	68,6	60,6	13,2
Utilización tren (%)	57,6	59,7	- 3,4
Utilización camión (%)	35,3	22,3	58,3

Tabla 4 Efectos de las externalidades en la formulación del transporte sincromodal

Fuente: Elaboración propia

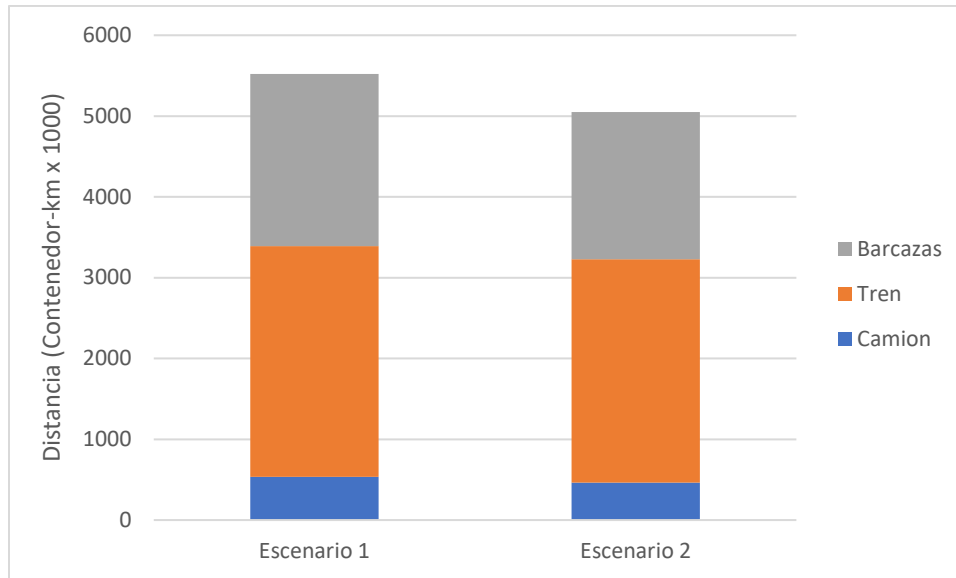


Figura 17 Distancia recorrida por modo por escenario.
Fuente: Elaboración Propia

5.3.2. Evaluación del cambio modal y asignación de la carga

Con respecto a la evaluación del comportamiento de las diferentes metodologías se puede constatar el impacto de la aplicación de una metodología en el transporte sincromodal en economías de desarrollo. Como era de esperarse, al aumentar el nivel de integración de los actores hubo una optimización de los recursos que consecuentemente se reflejó en una disminución de costos. De igual forma, con respecto al costo de transbordo, al aumentar el uso de medios de transporte más eficientes como el transporte fluvial o el férreo se incurrió en mayores interacciones en las terminales de transbordo por lo que fue aumentando su costo asociado.

En la *Tabla 5* se realizó el análisis comparativo para las metodologías de transporte sin incluir el efecto de las externalidades en la modelación. En esta modelación explícita, se presentaron una disminución de costos de hasta 60% con respecto al experimento sincromodal, principalmente porque en el experimento base se hace uso excesivo de envíos a través de camiones. Lo anterior, compensa el aumento de los costos fijo de los modos tren y barcazas, dado que se presenta una reducción de aproximadamente del 50% en el uso de camiones.

Con respecto al experimento intermodal, se demostró que introducir transbordos en la red de transporte, presenta mejoras operacionales de hasta el 18%. Sin embargo, al contar con un sistema de programaciones rígidas, se presentaron un aumento del 67% de las penalidades. En este caso, el transporte sincromodal ofrece un incremento en los niveles de servicios (penalidades) sin sacrificar e inclusive mejorando los costos de transporte.

Estos comportamientos se ven reflejado en la *Figura 18*, donde se evidencia que al rigidizar los horarios se ocasiona un incremento en los tiempos de espera después de la disponibilidad de la orden (i.e tiempo de atención), penalidad por entregar después de la fecha límite y tiempo de espera por llegar fuera de operación. Si bien el experimento sincromodal, se aprecia un aumento de los

tiempos de viajes asociado al mayor uso del transporte fluvial el cual presenta menores velocidades de operación, una flexibilización además de disminuir los costos privados y sociales presenta una mejora en los tiempos en el sistema indicando un aumento en los niveles de servicio en términos de tiempo y costos.

INDICADOR	EXPERIMENTO			DIFERENCIA (%)	
	1. BASE	2. INTERMODALIDAD	3. SINCROMODALIDAD	BASE A INTER	BASE A SINCR
Costo total (US\$)	5.929.587	5.009.598	3.692.395	18.4	60.6
Costo fijo: tren y barcazas (US\$)	428.676	561.896	665.221	- 23.7	- 35.6
Costo variable (US\$)	4.073.684	3.148.628	2.014.796	29.4	102.2
Costo transbordo (US\$)	-	84.208	101.132	-	-
Costo penalidades (US\$)	19.601	59.684	33.932	- 67.2	- 42.2
Costo externalidades (US\$)	1.407.626	1.155.182	877.314	21.9	60.4
Cambo modal barcazas (%)	-	22.9	51.6		
Cambo modal tren (%)	-	76.2	48.4		
Cambo modal camión (%)	-	0.9	-		
Utilización barcazas (%)	89.1	55.0	68.6	62.0	29.9
Utilización tren (%)	65.9	48.0	57.6	37.3	14.2
Utilización camión (%)	52.1	33.4	35.3	56.1	47.6

Tabla 5 Análisis exógeno de las externalidades en la formulación del transporte sincromodal
Fuente: Elaboración propia

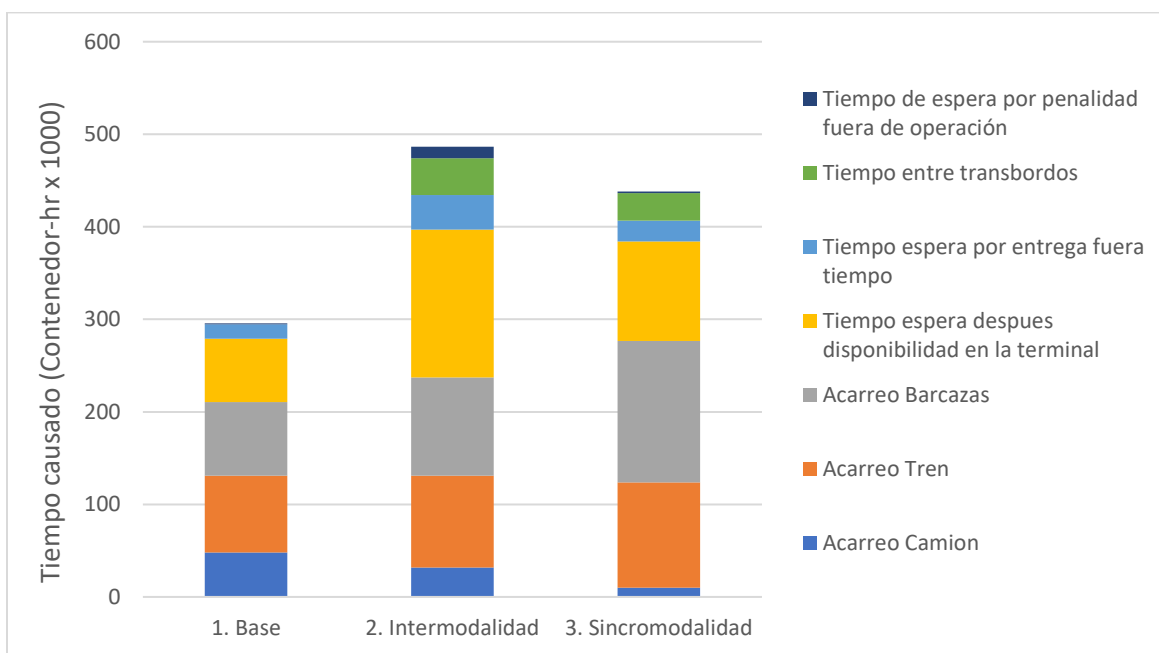


Figura 18 Tiempo promedio por actividad para los diferentes experimentos en el escenario 1
Fuente: Elaboración Propia

En *Tabla 6* se realizó el análisis comparativo para las metodologías en este caso incluyendo el efecto de las externalidades en la modelación. Para este escenario, se evidenciaron los mismos

comportamientos en los costos y las capacidades de los modos con respecto al escenario exógeno, sin embargo, se evidenció un aumento aún más pronunciado en los indicadores de capacidad con respecto al escenario 1, para los diferentes modos con incrementos del 50% y 30% para los modos barcazas y fluvial, y una reducción de hasta 150% en el uso de camiones en el experimento sincromodal. Por lo que se presentó una mejor utilización de las capacidades de los modos.

En la *Figura 19*, se compara en términos de tiempos las diferentes metodologías igual que el escenario 1. Sin embargo, a pesar que los tiempos totales en el sistema para el experimento intermodal y sincromodal son sensiblemente iguales para este escenario, los tiempos de espera en el experimento sincromodal presentan una reducción con respecto al intermodal mas acentuado que a su vez es generado por un aumento del transporte fluvial con una mejor programación de los servicios.

INDICADOR	EXPERIMENTO			DIFERENCIA (%)	
	1. BASE	2. INTERMODALIDAD	3. SINCROMODALIDAD	BASE A INTER	BASE A SINCRO
Costo total (US\$)	5.923.527	4.933.346	3.650.302	20.1	62.3
Costo fijo: tren y barcazas (US\$)	430.328	548.556	670.364	- 21.6	- 35.8
Costo variable (US\$)	4.071.028	3.133.074	2.000.312	29.9	103.5
Costo transbordo (US\$)	-	74.380	105.420	-	-
Costo penalidades (US\$)	12.061	51.356	27.286	- 76.5	- 55.8
Costo externalidades (US\$)	1.410.110	1.125.980	846.920	25.2	66.5
Cambo modal barcazas (%)	-	14,2	46,8		
Cambo modal tren (%)	-	85,8	53,2		
Cambo modal camión (%)	-	-	-		
Utilización barcazas (%)	91,3	59,5	60,6	53,3	50,7
Utilización tren (%)	77,8	52,8	59,7	47,2	30,3
Utilización camión (%)	55,0	16,5	22,3	232,7	146,3

Tabla 6 Análisis endógeno de las externalidades en la formulación del transporte sincromodal

Fuente: Elaboración Propia

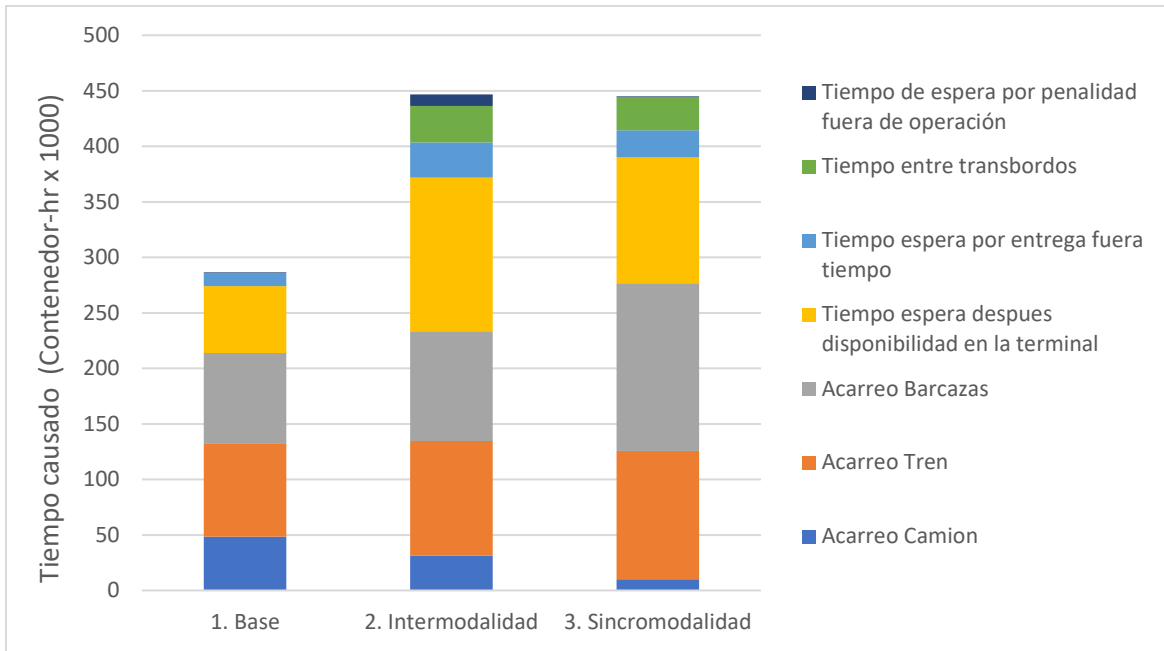


Figura 19 Tiempo promedio por actividad para los diferentes experimentos en el escenario 2

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados obtenidos, también se puede inferir que una flexibilización de la programación puede alcanzar reducciones en las externalidades de hasta 66%. Por su parte se demostró que la sincronización de los servicios aumenta sustancialmente el cambio modal hacia el medio fluvial, que debido a los largos tiempos de viajes es más difícil acomodar en una programación rígida de los servicios. Además, la posibilidad de transbordo en corredores lo suficientemente extenso, permite reducir los costos totales, ya que el coste de transbordo hacia modos más eficientes es compensado por el costo de operaciones menos eficientes (e.g. camiones).

6. CONCLUSIONES

En esta investigación nos enfocamos en desarrollar una formulación que permita modelar el desarrollo de una red de transporte de carga sincromodal, teniendo en cuenta diferentes necesarios para que un transporte de carga sea más flexible, robusto, con manejo de información de múltiples actores

Con el enfoque de tiempo discreto-continuo se presentó un buen comportamiento para representar los eventos asociados a las conectividad espacial y temporal en la red espacio-tiempo. Además, en la formulación dual arco-ruta se permitió modelar de manera adecuada la sincronización de servicios en las terminales de transbordo, ya que hubo una correlación acertada entre los arcos de salida y entrada, y las rutas.

En el análisis del efecto de las externalidades en la modelación se apreció un aumento en los costos fijos y transbordo en 0,8% y 4,1% respectivamente. Sin embargo, hubo una reducción de los costos totales debido al aumento en el número de los servicios en los modos tren y barcasas fue compensado por una menor utilización de transporte a través de camiones, presentando una reducción del 58,3% en la utilización de los camiones disponibles. Tanto en la modelación explícita como implícita, se presentaron una disminución de costos 60% y 62% respectivamente con respecto al experimento sincromodal. Lo anterior, compensa el aumento de los costos fijo de los modos tren y barcasas, dado que se presenta una reducción de apropiadamente del 50% en el uso de camiones.

Los resultados de los experimentos reflejan que un transporte sincromodal aplicado en economías como la colombiana, permite mejorar indicadores de capacidad, niveles de servicio (i.e. reducción de penalidades) tanto desde un enfoque privado como social. La aplicación del modelo en el corredor del valle del río Magdalena mostró su flexibilidad, permitiendo evaluar diferentes escenarios y demostrando los beneficios de la sincromodalidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos, también se puede inferir que introducir una flexibilización de la programación, transbordo y sincronización de los servicios se puede alcanzar reducciones en las externalidades y un aumento de los modos tren y barcasas. La flexibilidad de las programaciones de los servicios demostró ser indispensable para alcanzar menores costos de operación, disminuyendo los viajes directos e incentivando el intercambio modal que ocasiona un aumento en el nivel de utilización de los modos más eficientes en términos de capacidad y costos.

En general, se demostró nuevamente que la integración de las externalidades en la modelación de transporte de carga, ofrece reducciones tanto en los costos privados como sociales. Además, para el caso del transporte de carga en Colombia, el desarrollo de algún tipo de multimodalidad ofrece múltiples oportunidades de crecimiento para economías en desarrollo en términos de competitividad y bienestar social (i.e. reducción externalidades). Si bien, Colombia apenas está desarrollando una infraestructura y logística para desarrollar un transporte intermodal, según nuestra investigación, el desarrollo de una estrategia logística más ambiciosa en términos de integración, flexibilización y control como el transporte sincromodal, podría generar un sistema más robusto con capacidad de adaptarse a diferentes eventualidades, como las que padece Colombia

debido al difícil relieve y clima a lo largo de geografía. Además, se puede generar de un mayor uso y eficiencia de la infraestructura férrea y fluvial, aportando dinamismos hacia múltiples opciones de carga que pueda transportar. Esto es muy importante, para el contexto colombiano debido a la poca utilización y monopolización de estos modos de transporte, que ha conllevado a que el país presente altos costos de transporte, restándole competitividad con otras economías.

Como propuesta para futuras investigaciones, sería importante en una red bajo las mismas consideraciones analizar un enfoque estocástico para las variables más críticas de la operación como lo son la demanda y los tiempos de viajes. Otro enfoque, interesante sería relacionar el comportamiento de las externalidades en términos de niveles de congestión que se pueda presentar en los arcos o terminales, con el fin de indagar aún más el impacto de las externalidades en estas nuevas metodologías.

REFERENCIAS

- Agbo, A. A., Li, W., Atombo, C., Lodewijks, G., & Zheng, L. (2017). Feasibility study for the introduction of synchromodal freight transportation concept. *Cogent Engineering*, 1-25.
- Agbo, A. A., & Zhang, Y. (2017). Sustainable freight transport optimisation through synchromodal networks. *Cogent Engineering*, 4, 1-22.
- Ambra, T., Caris, A., & Macharis, C. (2018). Towards freight transport system unification: Reviewing and combining the advancements in the physical internet and synchromodal transport research. *International Journal of Production Research*, 57(6), 1606-1623.
- Ambra, T., Caris, A., & Macharis, C. (2019). Should I Stay or Should I Go? Assessing Intermodal and Synchromodal Resilience from a Decentralized Perspective. *Sustainability*, 11, 1-24.
- Andersen, J., & Christiansen, M. (2009). Designing New European Rail Freight Services. *The Journal of the Operational Research Society*, 60(3), 348-360.
- Andersen, J., Crainic, T., & Christiansen, M. (2009a). Service network design with asset management: Formulations and comparative analyses. *Transportation Research Part C*, 17, 197-207.
- Andersen, J., Crainic, T., & Christiansen, M. (2009b). Service network design with management and coordination of multiple fleets. *European Journal of Operational Research*, 193, 377-389.
- ANIF, A. N. de I. F. (2014). *Costos de transporte, multimodalismo y la Competitividad de Colombia*.
- Behdani, B., Fan, Y., Wiegmans, B., & Zuidwijk, R. (2016). Multimodal schedule design for synchromodal freight transport systems. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 16(3), 424-444.
- Bektas, T., & Crainic, T. (2007). A Brief Overview of Intermodal Transportation. *CIRRELT*, 03, 1-25.
- Bock, S. (2010). Real-time control of freight forwarder transportation networks by integrating multimodal transport chains. *European Journal of Operational Research*, 200, 733-746.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). Maritime Transportation. En *Handbook in OR & MS* (C. Barnhart and G. Laporte, Vol. 14, pp. 189-284).
- CONPES 3758, C. N. de P. E. y S. (2013). *PLAN PARA RESTABLECER LA NAVEGABILIDAD DEL RÍO MAGDALENA*. Departamento Nacional de Planeación.
- Crainic, T. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122, 272-288.
- Crainic, T. (2007). Service design Models for Rail Intermodal Transportation. *CIRRELT*, 04, 1-12.
- Crainic, T., & Kim, K. H. (2007). Intermodal Transportation. En *Handbook in OR & MS* (C. Barnhart and G. Laporte, Vol. 14, pp. 467-537).
- Crainic, T., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97, 409-438.

- Czyzyk, J., Mesnier, M. P., & Moré, J. J. (1998). The NEOS server. *EEE Computational Science and Engineering*, 5(3), 68-75.
- Dolan, E. (2001). *The NEOS Server 4.0 Administrative Guide, Technical Memorandum ANL*. Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory.
- Dong, C., Boute, R., Mckinnon, A., & Verelst, Ma. (2018). Investigating synchromodality from a supply chain perspective. *Transportation Research Part D*, 61, 42-57.
- ECMT, E. C. of M. of T. (1993). *Combined Transport Terminology*.
- European Commission. (1996). A strategy for revitalising the Community's railways. *White Paper*, 96, 1-43.
- European Commission. (2011). European transport policy for 2010: Time to decide. Office for official publications of the European communities. *White Paper*, 1-119.
- Farahani, N. Z., Noble, J. S., Klein, C. M., & Enayati, M. (2018). A decision support tool for energy efficient synchromodal supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 186, 682-702.
- Giusti, R., Manerba, D., Bruno, G., & Tadei, R. (2019). Synchromodal logistics: An overview of critical success factors, enabling technologies, and open research issues. *Transportation Research Part E*, 129, 92-110.
- Lemmens, N., Gijsbrechts, J., & Boute, R. (2019). Synchromodality in the Physical Internet – dual sourcing and real-time switching between transport modes. *European Transport Research Review*, 11, 1-10.
- Lemos Nabais, J., Batista, C., Ayala Botto, M., & Cordon Lagares, E. (2018). Computational Framework for Port Community Systems Towards Synchromodal Freight Networks. *Estudios de Economia Aplicada*, 36(3), 691-714.
- Li, L., Negenborn, R. R., & De Schutter, B. (2015). Intermodal freight transport planning – A receding horizon control approach. *Transportation Research Part C*, 60, 77-95.
- Li, L., Negenborn, R. R., & De Schutter, B. (2017). Distributed model predictive control for cooperative synchromodal freight transport. *Transportation Research Part E*, 105, 240-260.
- Liao, C. H., Tseng, P. H., & Lu, C. S. (2009). Comparing carbon dioxide emissions of trucking and intermodal container transport in Taiwan. *Transportation Research Part D*, 14(7), 493-496.
- Lium, A.-G., Crainic, T., & Wallace, S. W. (2009). A Study of Demand Stochasticity in Service Network Design. *Transportation Science*, 43(2), 144-157.
- Macharis, C., & Bontekoning, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of Operational Research*, 153, 400-416.
- Marquez, L., & Cantillo, V. (2013). Evaluating strategic freight transport corridors including external costs. *Transportation Planning and Technology*, 36(6), 529-546.
- Mes, M., & Iacob, M.-E. (2016). Synchromodal Transport Planning at a Logistics Service Provider. In *Logistics and supply chain innovation* (pp. 23-36). H. Zijm et al.

- Ministerio de Transporte. (2020). *Plan Maestro Ferroviario*.
- Naciones Unidas. (2011). Developments in international seaborne trade. En *Review of Maritime Transport* (pp. 1-34). United Nations Publications.
- Perdersen, M., & Crainic, T. (2007). Optimization of Intermodal Freight Train Service Schedules on Train Canals. *CIRRELT*, 51, 1-40.
- Perdersen, M., Crainic, T., & Madsen, O. (2009). Models and Tabu Search Metaheuristics for Service Network Design with Asset-Balance Requirements. *Transportation Science*, 43(2), 158-177.
- Perez Riviera, A. E., & Mes, M. (2017). Anticipatory freight selection in intermodal long-haul round-trips. *Transportation Research Part E*, 105, 176-194.
- Perez Riviera, A. E., & Mes, M. (2019). Integrated scheduling of drayage and long-haul operations in synchromodal transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31, 763–806.
- Pfoser, S., Treiblmaier, H., & Schauer, O. (2016). Critical success factors of synchromodality: Results from a case study and literature review. *Transportation Research Procedia*, 14, 1463-1471.
- Pleszko, J. (2012). Multi-variant configurations of supply chains in the context of synchromodal transport. *LogForum*, 8(4), 287-295.
- Qu, W., Rezaei, J., Maknoon, Y., & Tavasszy, L. (2019). Hinterland freight transportation replanning model under the framework of synchromodality. *Transportation Research Part E*, 131, 308-328.
- Resat, H. G., & Turkay, M. (2019). A discrete-continuous optimization approach for the design and operation of synchromodal transportation networks. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 512-525.
- Rojas, J. J. (2019). La política de comercio exterior y las exportaciones colombianas. *Revista de Economía Institucional*, 21(41), 51-70.
- Sharypova, K., Crainic, T., van Woensel, T., & Fransoo, J. C. (2012). Scheduled Service Network Design with Synchronization and Transshipment Constraints for Intermodal Container Transportation Networks. *CIRRELT*, 77, 1-23.
- StadieSeifi, M., Dellaert, N. P., Nuijten, W., van Woensel, T., & Raoufi, R. (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 233, 1-15.
- van Reissen, B., Negenborn, R. R., & Dekker, R. (2017). The Cargo Fare Class Mix problem for an intermodal corridor-revenue management in synchromodal container transportation. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29, 634-658.
- van Reissen, B., Negenborn, R. R., Dekker, R., & Lodewijks, G. (2015a). Impact and relevance of transit disturbances on planning in intermodal container networks using disturbance cost analysis. *Maritime Economics & Logistics*, 17, 440-463.

van Reissen, B., Negenborn, R. R., Dekker, R., & Lodewijks, G. (2015b). Service network design for an intermodal container network with flexible transit times and the possibility of using subcontracted transport. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(4), 457-478.

Wieberneit, N. (2008). Service network design for freight transportation: A review. *OR Spectrum*, 30, 77-112.

Woodburn, A. (2007). The role for rail in port-based container freight flows in Britain. *Maritime Policy & Management*, 34(4), 311-300.

Woxenius, J. (2007). Generic Framework for Transport Network Designs: Applications and Treatment in Intermodal Freight Transport Literature. *Transport Reviews*, 27(6), 733-749.

Xu, Y., Cao, C., Jia, B., & Zang, G. (2015). Model and Algorithm for Container Allocation Problem with Random Freight Demands in Synchronodal Transportation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(15), 1-13.

Zhang, M., & Pel, A. J. (2016). Synchronodal hinterland freight transport: Model study for the port of Rotterdam. *Journal of Transport Geography*, 52, 1-10.

Ziliaskopoulos, A., & Wardell, W. (2000). An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays. *European Journal of Operational Research*, 125, 486-502.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO A: PARÁMETROS DE ENTRADA

Par Origen-Destino	Tipo de Producto	Cantidad (Contenedores)	Tiempo disponibilidad (hr)	Tiempo entrega (hr)
La Dorada - Barranquilla	Contenedores General	350	16	92
Antioquia - Cartagena	Contenedores General	150	13	66
La Dorada - Santa Marta	Contenedores General	400	37	104
La Dorada - Cartagena	Contenedores General	100	42	82
Antioquia - Barranquilla	Contenedores General	100	34	90
La Dorada - Cartagena	Contenedores General	350	58	140
Antioquia - Barranquilla	Contenedores General	250	60	110
Antioquia - Santa Marta	Contenedores General	350	80	138
La Dorada - Cartagena	Contenedores General	200	83	130
Antioquia - Barranquilla	Contenedores General	250	104	152
La Dorada - Santa Marta	Contenedores General	200	112	160
Antioquia - Cartagena	Contenedores General	150	136	176
La Dorada - Barranquilla	Contenedores General	200	133	178
La Dorada - Santa Marta	Contenedores General	250	152	188
Antioquia - Cartagena	Contenedores Refrigerados	100	150	190
La Dorada - Santa Marta	Contenedores Refrigerados	200	15	66
Antioquia - Barranquilla	Contenedores Refrigerados	100	10	80
Antioquia - Santa Marta	Contenedores Refrigerados	200	8	56
Antioquia - Cartagena	Contenedores Refrigerados	350	41	82
La Dorada - Barranquilla	Contenedores Refrigerados	250	36	84
Antioquia - Santa Marta	Contenedores Refrigerados	300	56	104
La Dorada - Barranquilla	Contenedores Refrigerados	150	64	106
Antioquia - Santa Marta	Contenedores Refrigerados	200	86	134
La Dorada - Cartagena	Contenedores Refrigerados	300	78	128
Antioquia - Cartagena	Contenedores Refrigerados	250	108	153
La Dorada - Barranquilla	Contenedores Refrigerados	350	105	158
La Dorada - Santa Marta	Contenedores Refrigerados	300	127	178
Antioquia - Cartagena	Contenedores Refrigerados	250	132	176
La Dorada - Barranquilla	Contenedores Refrigerados	150	150	190
Antioquia - Santa Marta	Contenedores Refrigerados	200	152	188

Tabla 7 Parámetros de la demanda a lo largo del horizonte de planificación

Fuente: Elaboración Propia

Par Origen-Destino	Costo Modo (US\$)		
	Camión	Tren	Barcazas
La Dorada - Barrancabermeja	-	6.551	5.529
La Dorada - Tamalameque	-	12.561	10.677
La Dorada - Barranquilla	-	21.198	19.915
La Dorada - Cartagena	-	22.849	22.849

Par Origen-Destino	Costo Modo (US\$)		
	Camión	Tren	Barcazas
La Dorada - Santa Marta	-	22.849	22.849
Antioquia - Barrancabermeja	-	2.950	2.020
Antioquia - Tamalameque	-	8.961	7.350
Antioquia - Barranquilla	-	17.597	16.588
Antioquia - Cartagena	-	19.249	16.588
Antioquia - Santa Marta	-	19.249	-
Barrancabermeja - Barranquilla	-	14.646	14.385
Barrancabermeja - Cartagena	-	16.298	14.992
Barrancabermeja - Santa Marta	-	16.298	-
Tamalameque - Barranquilla	-	8.636	9.238
Tamalameque - Cartagena	-	10.287	9.845
Tamalameque - Santa Marta	-	10.287	-

Tabla 8 Costos fijos para los pares Origen-Destino

Fuente: Elaboración Propia

Par Origen-Destino	Costo Modo (US\$)		
	Camión	Tren	Barcazas
La Dorada - Barrancabermeja	539	49	43
La Dorada - Tamalameque	893	94	82
La Dorada - Barranquilla	1.357	158	155
La Dorada - Cartagena	1.411	171	160
La Dorada - Santa Marta	1.230	171	-
Antioquia - Barrancabermeja	405	22	17
Antioquia - Tamalameque	672	67	57
Antioquia - Barranquilla	1.216	131	129
Antioquia - Cartagena	1.251	144	134
Antioquia - Santa Marta	1.072	144	-
Barrancabermeja - Barranquilla	1.049	109	112
Barrancabermeja - Cartagena	1.098	122	117
Barrancabermeja - Santa Marta	922	122	-
Tamalameque - Barranquilla	659	64	72
Tamalameque - Cartagena	789	77	76
Tamalameque - Santa Marta	592	77	-

Tabla 9 Costos variables para los pares Origen-Destino

Fuente: Elaboración Propia

Cambio	Costo transbordo (US\$)
Camión-Tren	74
Camión-Barcazas	28
Tren-Barcazas	55

Tabla 10 Costos de transbordo

Fuente: Elaboración Propia

Tipo de Producto	Penalidades por entrega (US\$)
Contenedores General	100
Contenedores Refrigerados	200

Tabla 11 Penalidades por entrega los productos después de la fecha pactada

Fuente: Elaboración Propia

Modo	Penalidades por fuera de operación (US\$)
Camión	300
Tren	300
Barcazas	288

Tabla 12 Penalidades por llegada a las terminales de destino fuera de operación

Fuente: Elaboración Propia

Par Origen-Destino	Costo Modo (US\$)		
	Camión	Tren	Barcazas
La Dorada - Barrancabermeja	112	13	0,8
La Dorada - Tamalameque	219	25	1,6
La Dorada - Barranquilla	379	43	2,8
La Dorada - Cartagena	409	47	3,1
La Dorada - Santa Marta	359	41	-
Antioquia - Barrancabermeja	55	6	0,4
Antioquia - Tamalameque	165	19	1,2
Antioquia - Barranquilla	332	37	2,4
Antioquia - Cartagena	352	40	2,6
Antioquia - Santa Marta	302	35	-
Barrancabermeja - Barranquilla	267	31	2,0
Barrancabermeja - Cartagena	297	34	2,2
Barrancabermeja - Santa Marta	247	28	0
Tamalameque - Barranquilla	162	18	1,2
Tamalameque - Cartagena	194	22	1,5
Tamalameque - Santa Marta	145	17	-

Tabla 13 Costos externos para los pares Origen-Destino

Fuente: Elaboración Propia

7.2. ANEXO B: MODELO AMPL

7.3. ANEXO C: RESULTADOS NEOS SERVER