

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Propuesta de una red de transporte multimodal para las exportaciones de café verde desde los departamentos de Huila, Tolima y Caldas hacia Estados Unidos

Tatiana Echeverri Salazar

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Departamento de Ingeniería de la Organización
Medellín, Colombia
Año 2023

Propuesta de una red de transporte multimodal para las exportaciones de café verde desde los departamentos de Huila, Tolima y Caldas hacia Estados Unidos

Tatiana Echeverri Salazar

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Industrial

Director (a):

Ph.D., Alexander Alberto Correa Espinal

Línea de Investigación:

Producción y Operaciones

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

Año 2023

RESUMEN

Propuesta de una red de transporte multimodal para las exportaciones de café verde desde los departamentos de Huila, Tolima y Caldas hacia Estados Unidos

Este trabajo final de maestría tiene como objetivo proponer una red de transporte multimodal para reducir los costos logísticos y el tiempo de exportación de café verde desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos, teniendo en cuenta la infraestructura existente.

Para alcanzar este propósito se estudia la red de transporte desde su estructura, los agentes que intervienen en los procesos y los problemas de planeación de redes de transporte multimodal.

Finalmente, se obtienen amplios resultados que permiten la toma de decisiones desde el aspecto táctico en la determinación del flujo a través de la red de transporte multimodal, así como la selección de proveedores y modos de transporte.

Palabras clave: red de transporte, transporte multimodal, costo, tiempo, exportación, café verde

ABSTRACT

Proposal for a multimodal transport network for green coffee exports from Huila, Tolima and Caldas to the United States

This thesis aims to propose a multimodal transport network to reduce logistics costs and time for exporting green coffee from the states of Huila, Tolima, and Caldas to the ports of New York, Charleston, and Oakland in the United States considering the existing infrastructure.

To achieve this purpose, the transport network is studied from its structure, the agents involved in the processes and the planning problems of multimodal transport networks.

Finally, extensive results are obtained that allow decision-making from the tactical aspect in determining the flow through the multimodal transport network, as well as the selection of suppliers and modes of transport.

Key words: transport network, multimodal transport, cost, time, export, green coffee

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
TABLA DE CONTENIDO	5
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE ILUSTRACIONES	11
CAPITULO 1	12
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO 2	14
TRANSPORTE MULTIMODAL Y APLICACIONES: ESTADO DEL ARTE	14
2.1 TRANSPORTE MULTIMODAL	14
2.2 ESTADO DEL ARTE	15
2.2.1 METODOLOGÍA	15
2.2.2 PASOS REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA	16
2.3 CONCLUSIONES	28
CAPITULO 3	30
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN: CONTEXTO, DELIMITACIÓN Y DEFINICIÓN	30
3.1 CONTEXTO GENERAL DEL PROBLEMA	30
3.2 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA	31
3.2.1 DISTRIBUCIÓN DE CAFÉ POR DEPARTAMENTOS: IDENTIFICACIÓN DE ORÍGENES	32
3.2.2 INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE EN COLOMBIA: IDENTIFICACIÓN DE NODOS INTERMEDIOS	33
3.2.3 PAISES Y REGIONES IMPORTADORAS DE CAFÉ COLOMBIANO: IDENTIFICACIÓN DE DESTINOS	40
3.3 RED DE TRANSPORTE MULTIMODAL: REPRESENTACIÓN GRÁFICA	41
3.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	44
3.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	46
3.5.1 OBJETIVO GENERAL	47
3.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	47
3.6 ALCANCE	47
3.7 CONCLUSIONES	49

CAPITULO 4	50
EXPORTACIÓN DEL CAFÉ VERDE: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO, ACTORES Y ELEMENTOS QUE COMPONEN LA RED.	50
4.1 ACTORES DE LA RED DE TRANSPORTE	50
4.1.1 FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA	51
4.1.2 EMPRESAS EXPORTADORAS DE CAFÉ VERDE	51
4.1.3 TRILLADORAS COMO PUNTO ORIGEN	52
4.1.4 TRANSPORTISTAS TERRESTRES	52
4.1.5 PUERTOS MULTIMODALES	52
4.1.6 PUERTOS MARÍTIMOS	53
4.1.7 OPERADOR PORTUARIO PARA CAFÉ VERDE	53
4.1.8 AGENCIA DE ADUANAS	54
4.1.9 NAVIERAS	54
4.2 EXPORTACIÓN DEL CAFÉ VERDE	55
4.2.1 INCOTERM: COST AND FREIGHT (CIF)	55
4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXPORTACIÓN	56
4.2.3 COSTOS ASOCIADOS AL PROCESO	60
4.2.4 TIEMPOS ASOCIADOS AL PROCESO	60
4.3 ELEMENTOS DE LA RED	60
4.3.1 NODOS	61
4.3.2 ARCOS	62
4.3.3 GRÁFICA RED NODOS-ARCOS	63
CAPITULO 5	66
RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	66
5.1 NODOS ORIGEN: TRILLADORAS	66
5.2 ARCOS TRANSPORTE TERRESTRE	67
5.3 NODOS MULTIMODALES: TERMINALES FÉRREO Y FLUVIAL	69
5.4 ARCOS MULTIMODALES: TERMINALES FÉRREO Y FLUVIAL	70
5.5 NODOS PUERTOS MARÍTIMOS ORIGEN	70
5.6 ARCOS TRANSPORTE MARÍTIMO	71
5.7 CONCLUSIONES	73
CAPITULO 6	
SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE TRANSPORTE MULTIMODAL	75
6.1 PROBLEMAS DE REDES DE TRANSPORTE MULTIMODAL	75

6.2 TÉCNICAS PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE REDES DE TRANSPORTE MULTIMODAL	76
6.3 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA	79
6.3.1 METODOLOGÍA.....	79
6.3.2 SIMULACIÓN.....	84
6.3.3 SOFTWARE PROMODEL.....	86
6.4 CONCLUSIONES.....	86
CAPITULO 7	ESTRUCTURACIÓN DEL
MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA RED DE TRANSPORTE MULTIMODAL.....	88
7.1 ELEMENTOS PARA CONTRUIR EL MODELO DE SIMULACIÓN.....	88
7.1.1 LOCACIONES.....	89
7.1.2 ENTIDADES.....	90
7.1.3 RECURSOS.....	91
7.1.4 ARRIBOS.....	92
7.1.5 REDES DE TRABAJO.....	93
7.1.6 ATRIBUTOS.....	95
7.1.7 VARIABLES:.....	96
7.1.8 CONSTRUCTOS DE MODELAMIENTO:.....	103
7.1.9 LIBRERÍA GRÁFICA:.....	103
7.1.10 MEDIDAS DE DESEMPEÑO:.....	104
7.1.11 RELOJ DE SIMULACIÓN Y RÉPLICAS.....	105
7.2 MODELOS DE SIMULACIÓN.....	105
7.2.1 SUBRED 1 / ESCENARIO 1: ORIGEN NEIVA CON HAMBURG SUD.....	105
7.2.2 SUBRED 1 / ESCENARIO 2: ORIGEN NEIVA CON HAPAG LLOYD.....	106
7.2.3 SUBRED 2 / ESCENARIO 1: ORIGEN IBAGUÉ CON HAMBURG SUD.....	107
7.2.4 SUBRED 2 / ESCENARIO 2: ORIGEN IBAGUÉ CON HAPAG LLOYD.....	108
7.2.5 SUBRED 3 / ESCENARIO 1: ORIGEN MANIZALES CON HAMBURG SUD.....	108
7.2.6 SUBRED 3 / ESCENARIO 2: ORIGEN MANIZALES CON HAPAG LLOYD.....	109
7.3 CONCLUSIONES.....	110
CAPITULO 8	VALIDACIÓN Y
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
8.1 RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS.....	111
8.1.1 ANÁLISIS: MENORES COSTOS Y TIEMPOS.....	112
8.1.2 OTROS ANÁLISIS.....	118

8.2 RESULTADOS SEGMENTADOS OBTENIDOS	120
8.2.1 RUTA DESDE TRILLADORA HASTA PUERTOS ORIGEN: COSTO Y TIEMPO	120
8.2.2 RUTA DESDE PUERTOS EN ORIGEN A PUERTOS EN DESTINO: COSTO Y TIEMPO	121
8.3 CONCLUSIONES.....	122
CAPITULO 9.....	123
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
9.1 CONCLUSIONES.....	123
9.2 RECOMENDACIONES.....	124
ANEXOS.....	125
1.RESULTADO DE VARIABLES DE LAS 6 SIMULACIONES	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los estudios	21
Tabla 2: Número de documentos por objetivo.....	27
Tabla 3: Número de documentos que incluyen o no ventanas de tiempo.....	27
Tabla 4: Número de documentos que tienen o no tienen en cuenta los trasbordos.....	27
Tabla 5: Número de documentos que emplean cada medio de transporte.....	27
Tabla 6: Número de documentos que incluyen o no algún producto específico.....	27
Tabla 7: Número de documentos que mencionan o no la unidad de carga	27
Tabla 8: Relación área cultivada-superficie en los departamentos del Huila, Tolima y Caldas año 2020. Estadísticas FNC.....	33
Tabla 9: Nodos de origen - Trilladoras	61
Tabla 10: Nodos multimodales – Férreo o Fluvial.....	61
Tabla 11: Nodos marítimos en país de origen.....	61
Tabla 12: Nodos marítimos en país de destino	62
Tabla 13: Posibles arcos o transportes desde nodos de origen - Trilladoras.....	62
Tabla 14: Posibles arcos o transporte desde los nodos multimodales – Férreo o Fluvial.	62
Tabla 15: Posibles arcos o transporte desde los nodos marítimos en origen hasta los nodos marítimos en destino.	63
Tabla 16: Información nodos origen / trilladoras	67
Tabla 17: Información tipos de vehículos	67
Tabla 18: Tipos de vehículos a considerar.....	68
Tabla 19: Información arcos transporte terrestre	69
Tabla 20: Información nodos multimodales	70
Tabla 21: Información arcos multimodales.....	70
Tabla 22: Información nodos puertos marítimos de origen	71
Tabla 23: Información de servicios agencia de aduanas.....	71
Tabla 24: Cumplimiento de itinerarios.....	72
Tabla 25: Información de los arcos de transporte marítimo.	73
Tabla 26: Resumen de técnicas de solución presentadas por M. SteadieSeifi et al (2014) y Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018) y Müller, J., Rentschler, J. (2020).....	78
Tabla 27: Escala de valoración de alternativas frente a criterios.....	81
Tabla 28: Valoración de alternativas 1, 2, 3, 4 frente a criterios A, B, C.....	82
Tabla 29: Importancia de los criterios establecidos.....	83
Tabla 30: Producto del peso de cada criterio por el valor de la alternativa	83
Tabla 31: Sumatoria de los productos.....	83
Tabla 32: Cantidad de elementos que se pueden crear con la versión estudiantil de ProModel	86
Tabla 33: Locaciones creadas en ProModel	90
Tabla 34: Entidades creadas en ProModel.....	91
Tabla 35: Recursos creados en ProModel	92
Tabla 36: Arribos creados en Promodel.....	93
Tabla 37: Atributos creados en ProModel	95
Tabla 38: Variables creadas en ProModel.....	99
Tabla 39: Constantes o parámetros creados en la categoría de variables	103

Tabla 40: Resultados de costos por saco en la red completa	112
Tabla 41: Resultados de tiempos en días en la red completa.....	112
Tabla 42: Resultados menores costos por ruta en la red completa.....	113
Tabla 43: Resultados menores tiempos por ruta en la red completa.....	114
Tabla 44: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para el origen Neiva.....	115
Tabla 45: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para el origen Ibagué.....	116
Tabla 46: Resultados finales para la ruta Ibagué a Charleston	116
Tabla 47: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para el origen Neiva.....	118
Tabla 48: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para todos los orígenes y destinos	118
Tabla 49: Resultados de costos por saco en la red completa por colores	119
Tabla 50: Resultados de tiempos en días en la red completa por colores.....	119
Tabla 51: Costo de las rutas desde trilladoras hasta puertos marítimos de origen.....	120
Tabla 52: Tiempo de las rutas desde trilladoras hasta puertos marítimos de origen.....	121
Tabla 53: Costos logísticos de las rutas marítimas.....	121
Tabla 54: Tiempos de tránsito, almacenamiento y espera de las rutas marítimas	122

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Pasos para la revisión sistemática de literatura. Elaboración: Propia.	16
Ilustración 2: Diagrama de flujo del proceso de búsqueda de información. Elaboración: Propia....	18
Ilustración 3: Miles de hectáreas cultivadas por departamento de Colombia	32
Ilustración 4: Radar Índice de Desempeño Logístico Colombia – Brasil – Vietnam. Tomado de Banco Mundial (2018).	34
Ilustración 5: Infraestructura de transporte modo carretero. Fuente de información: Ministerio de Transporte	36
Ilustración 6: Porcentaje de exportación de café por ciudad año 2019	37
Ilustración 7: Porcentaje de exportación de café por ciudad año 2021	38
Ilustración 8: Redes Férreas. Tomado de Ministerio de Transporte (2021)	39
Ilustración 9: Sacos de café verde (60kg) exportados según destino	40
Ilustración 10: Ubicación geográfica de nodos y arcos. Fuente: Elaboración propia.	42
Ilustración 11: Red de transporte multimodal. Nodos y arcos.	43
Ilustración 12: Número de documentos por año	46
Ilustración 13: Incoterms. Tomado de Kuehne Nagel	56
Ilustración 14: Diagrama de flujo	59
Ilustración 15: Red de nodos y arcos con su respectiva nomenclatura.	64
Ilustración 16: Pasos para la selección de la técnica de solución. Elaboración propia. Fuente: Aznar, J. & Guijarro, F. (2012)	80
Ilustración 17: Redes de trabajo	93
Ilustración 18: Red de trabajo 1	94
Ilustración 19: Red de trabajo 2	94
Ilustración 20: Red de trabajo 3	94
Ilustración 21: Red de trabajo 4	94
Ilustración 22: Red de trabajo 5	95
Ilustración 23: Red de trabajo 6	95
Ilustración 24: Librería gráfica	104
Ilustración 25: Subred 1 / Escenario 1	106
Ilustración 26: Subred 1 / Escenario 2	107
Ilustración 27: Subred 2 / Escenario 1	107
Ilustración 28: Subred 2 / Escenario 2	108
Ilustración 29: Subred 3 / Escenario 1	109
Ilustración 30: Subred 3 / Escenario 2	109
Ilustración 31: Resultados finales para la ruta Ibagué a Charleston	117

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos agrícolas más importantes en el comercio internacional (Kai-Hua Wang, et al 2020), siendo Colombia el tercer exportador a nivel mundial, detrás de Brasil y Vietnam. Sin embargo, dentro la variedad de café arábica que es un perfil suave, especial y de alta calidad, Colombia es el mayor exportador (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021).

Para el transporte internacional de mercancías, con frecuencia se requieren varios modos de transporte, ya sea aéreo, marítimo, terrestre y/o ferroviario, donde el uso de dos o más de ellos se conoce como transporte multimodal y la unidad de carga puede ser el elemento que se desee como una caja, contenedor, vehículo, saco, entre otros (M, SteadieSeifi et al. 2014).

El transporte multimodal ha ganado gran importancia en los últimos años y debido a las tendencias de la globalización y la administración logística, se prevé que dicha popularidad siga creciendo (J. Udomwannakhet et al 2018). De esta manera, se espera que para el año 2050, al menos el 50% de la carga en el mundo se movilice empleando transporte multimodal (Abbassi, A. et al 2019).

En este documento se presenta inicialmente la revisión sistemática de literatura elaborada para encontrar información relevante respecto a la temática del transporte multimodal y las diferentes aplicaciones a productos particulares. Con ello, se define la problemática de investigación relacionada con los altos costos en los procesos logísticos y de transporte, así como la forma en la que se han ido incorporando distintos modos de transporte para contrarrestarlo, y se resalta la importancia que tiene el café verde para la economía colombiana y el incremento de las investigaciones en este campo de transporte multimodal.

Posteriormente, se plantea la forma en la que será abordado el problema basado en el logro de cada uno de los objetivos específicos, teniendo en cuenta revisiones de literatura, entrevistas, observación del proceso, revisión de técnicas de modelamiento, así como la selección y aplicación de herramientas de solución.

Para ello, se describe el proceso de exportación de café verde y se identifican en él los actores o terceros involucrados en cada una de las actividades, considerando la empresa

exportadora, las empresas que prestan servicios de transporte terrestre y marítimo, la Federación Nacional de Cafeteros, los puertos y sus operadores, de tal manera que se den a conocer los agentes que participan en los elementos definidos como nodos y arcos.

Adicionalmente se presenta un capítulo enfocado en la recolección de la información respecto a los costos logísticos y tiempos asociados a la exportación en los nodos y arcos establecidos, para dar paso a la revisión y selección de la técnica de solución.

Finalmente se construye y valida el modelo de la red de transporte a través de la simulación en ProModel para obtener resultados amplios que permitan la toma de decisiones en el ámbito de la planeación táctica.

CAPITULO 2

TRANSPORTE MULTIMODAL Y APLICACIONES: ESTADO DEL ARTE

El transporte multimodal ha sido estudiado desde distintas perspectivas, donde ha tenido enfoques en diferentes tipos de variables y aplicaciones a diversos sectores industriales.

En este capítulo se expondrán las generalidades del transporte multimodal y se planteará el estado del arte para conocer las características de los problemas que han sido abordados anteriormente, así como las aplicaciones a productos específicos.

La Revisión Sistemática de Literatura es la herramienta con la que se abordará el estado del arte, y de esta manera, se da paso al planteamiento del problema que tendrá como base los vacíos de investigación que sean identificados.

2.1 TRANSPORTE MULTIMODAL

Dado que en la literatura se han empleado los términos multimodal e intermodal como sinónimos o se les han atribuido diversos significados que incorporan características diferentes, para este estudio se tienen en cuenta M, SteadieSeifi et al. (2014) y Mnif & Bouamama (2017), donde expresan que el transporte multimodal es aquel en el que se emplean dos o más modos de transporte para el movimiento de mercancías y que dentro de este se encuentran el transporte intermodal y el transporte combinado. Por su parte el Banco Mundial en su Índice de Desempeño Logístico, también lo define como “*el transporte de mercancías (ya sea bajo un único contrato de transporte multimodal o no), realizado con al menos dos medios de transporte diferentes*”.

Como características generales del transporte multimodal, no se considera una única unidad de carga, ni un único transportista u operador durante el movimiento de la mercancía desde el punto de partida hasta el destino. La unidad de carga corresponde al tipo de embalaje o manipulación que se le da a la mercancía para su movimiento (M, SteadieSeifi et al. 2014), donde en el caso del café verde corresponde a sacos en el transporte pre-haul y a contenedores en el transporte long-haul.

Por su parte, los modos de transporte hacen referencia a la infraestructura carretera, férrea, marítima, fluvial y aérea por donde circulan los medios de transporte conocidos como las

embarcaciones, aeronaves, camiones, automóviles, trenes, entre otros. Adicionalmente, los puntos en los que se realiza el transbordo o cambio del modo de transporte son conocidos como nodos de transporte, incluyendo además los puntos de origen y destino de las mercancías. (Resat, H & Turkay, M., 2015)

2.2 ESTADO DEL ARTE

Con el estado del arte se pretende hacer una revisión y análisis a las investigaciones previas en el campo del transporte multimodal, considerando las aplicaciones que se han enfocado en productos específicos, y aquellos que además hayan considerado la disminución en los costos logísticos y/o la reducción en los tiempos de transporte.

Para ello, se emplea la metodología de Revisión Sistemática de Literatura expuesta por J. Ralf Elbert, Jan Philipp Müller & Johannes Rentschler (2020), donde se formula una o varias preguntas de investigación a partir de unas palabras claves identificadas alrededor de la temática, se revisan los estudios producto del proceso de búsqueda de la información en las bases de datos, realizando los ajustes o reformulaciones de acuerdo con los primeros hallazgos, para posteriormente examinar, seleccionar y evaluar los estudios a través del establecimiento de unos criterios de inclusión y exclusión. Finalmente se realiza un análisis y síntesis de la literatura seleccionada, y se presentan los resultados.

2.2.1 METODOLOGÍA

A partir de la Revisión Sistemática de Literatura se pretende conocer un panorama general en el campo de investigación del transporte multimodal, el nivel de profundización que existe respecto a los estudios con enfoques en productos particulares, y que además busquen mejorar los costos y/o tiempos logísticos, para identificar las similitudes y diferencias que tienen los documentos hallados y seleccionados con la presente investigación.

A través de la Revisión Sistemática de Literatura (J. Ralf Elbert, Jan Philipp Müller & Johannes Rentschler, 2020), se la identificación de las contribuciones más relevantes que se han hecho en el campo de planeación y flujo de carga a través de las redes de transporte multimodal, así como sus aplicaciones a productos específicos, durante un periodo de tiempo comprendido entre los años 2000 y 2021.

De esta manera, se pudo identificar, seleccionar, sintetizar y analizar la información recolectada de los documentos de investigación, así como identificar los vacíos en esta temática particular siguiendo los pasos expuestos en la Ilustración 1:

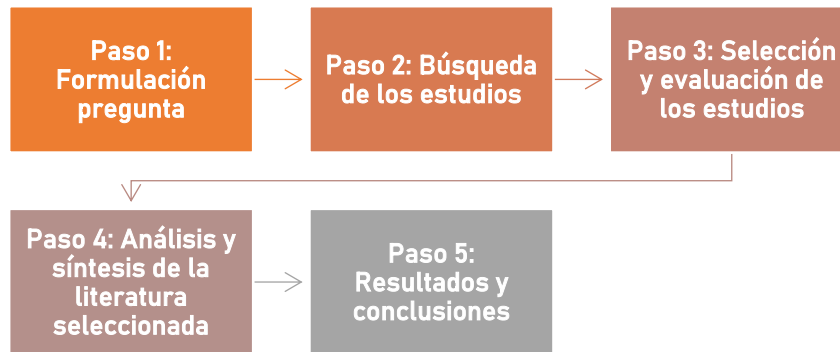


Ilustración 1: Pasos para la revisión sistemática de literatura. Elaboración: Propia.

Fuente: J. Ralf Elbert, Jan Philipp Müller & Johannes Rentschler, 2020

2.2.2 PASOS REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Paso 1: Pregunta base de la Revisión Sistemática de Literatura

Teniendo en cuenta el Índice de Desempeño Logístico donde Colombia tiene un rendimiento poco favorable ocupando el puesto 58° entre 160 países, con un puntaje de 2.94 en una escala de 1 a 5 (The World Bank, 2018), y considerando la gran participación e importancia que tienen los aspectos logísticos en el comercio internacional de café, se formula la siguiente pregunta para la revisión sistemática de literatura y descubrimiento de la problemática, así como su relevancia:

¿Es posible proponer una red de transporte multimodal que permita reducir los costos logísticos y los tiempos de exportación de café verde desde Colombia hacia Estados Unidos?

Para el establecimiento de la anterior pregunta que será la guía de la Revisión Sistemática de Literatura y con la que se pretenden hallar los vacíos de investigación en esta temática, se reajustaron en varias ocasiones las palabras clave con las que se elaboraron las ecuaciones de búsqueda que se presentarán a continuación en el paso 2.

Paso 2: Investigación preliminar y proceso de búsqueda

La búsqueda se hizo en las bases de datos *Scopus*, *Web Of Science*, *IEEE XPLORE* y *Science Direct*, entre los años 2000 y 2021, en los idiomas español, inglés y portugués.

Adicionalmente, se consideraron los siguientes patrones para búsqueda:

- TITLE-ABS-KEY: En título, resumen y palabras clave.
- ALL: Incluyendo todos los parámetros.

Los términos tenidos en cuenta y las ecuaciones finales configuradas fueron:

1. TITLE-ABS-KEY ("multimodal transport network" OR "multimodal transportation network" AND "route")
2. TITLE-ABS-KEY ("multimodal transport" OR "multimodal transportation") AND ALL (food)

Considerando lo anterior, se obtuvo un total de 394 documentos (registros únicos). Cabe resaltar que las palabras **coffee** y **export** al incluirlas en las ecuaciones de búsqueda no arrojaron resultados relacionados con transporte multimodal, y al incluir el término **Colombia** para delimitar el alcance geográfico, tampoco se encontraron resultados relevantes en planeación de redes de transporte multimodal.

Para definir estos criterios, se partió de la pregunta preliminar o base para definir las palabras clave, se establecieron unas ecuaciones de búsqueda iniciales y se obtuvieron los resultados en las bases de datos. Al no encontrar la calidad deseada en la información, se reconfiguraron las palabras clave y se refinaron las ecuaciones de búsqueda alrededor de 6 veces, hasta que se llegó a los criterios planteados (Ilustración 2).

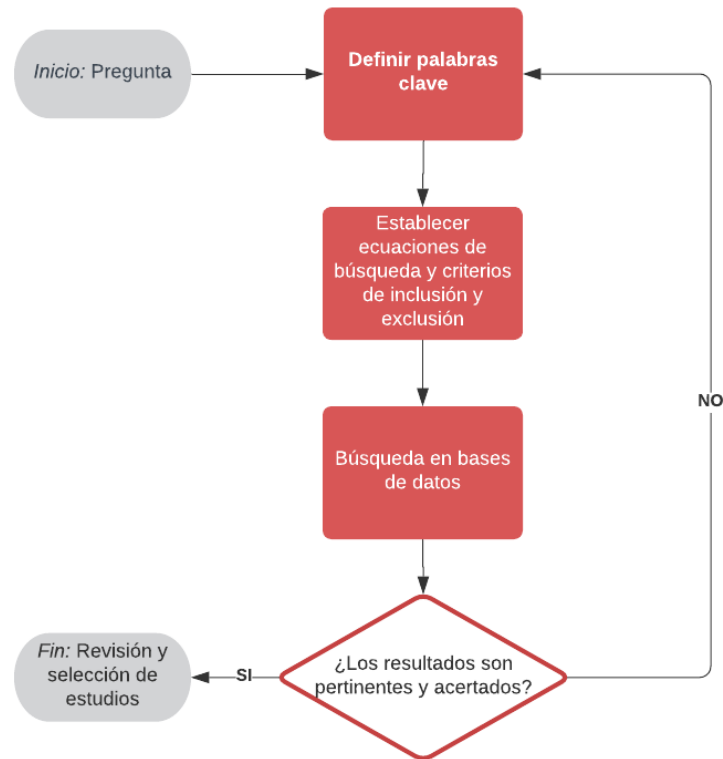


Ilustración 2: Diagrama de flujo del proceso de búsqueda de información. Elaboración: Propia

Las palabras clave con las que se inició el proceso de búsqueda y de contextualización fueron las siguientes:

- Transportation problems
- Transport optimization
- Transportation AND cost AND export
- Transportation AND cost AND optimization
- Transport AND problem AND optimization
- bi-objective optimization problem
- Multimodal transportation
- Intermodal transportation
- Routing problem
- Coffee AND logistics AND Export

Paso 3: Definición de los criterios de selección y evaluación de los estudios

Teniendo en cuenta que se busca proponer una red de transporte multimodal en la que se reduzcan los costos logísticos y tiempos de exportación en café verde, los criterios que se emplearon para acotar los resultados y proceder a la selección de los documentos fueron:

Incluir:

- Minimizar costos
- Minimizar tiempo
- Dos o más modos de transporte
- Validación en casos de productos específicos.

Excluir:

- Un solo modo de transporte
- Transporte de pasajeros
- Disminuir el impacto ambiental
- Respuesta ante emergencias
- Ubicación de instalaciones
- Operación interna de puertos multimodales.

Del total de resultados obtenidos en el proceso de búsqueda, se seleccionaron 21 documentos teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión establecidos previamente.

Se dio prelación a los documentos que abordaran problemas asociados con disminución de costos y/o tiempos en las redes de transporte.

Adicionalmente, los estudios seleccionados se clasifican de acuerdo con los siguientes criterios como se muestra en la tabla 1:

- a) Objetivos:** Características que se buscan mejorar (maximizar o minimizar) en la red de transporte como el caso de los costos, los tiempos, las distancias, las emisiones de CO² o factores ambientales, el riesgo, entre otros.

Nomenclatura C: costo, T: tiempo, D: distancia, Co: Confiabilidad, Se: Seguridad, Ca: Capacidad, CO₂: Emisiones de carbono, R: Riesgo

- b) Ventanas de tiempo:** Considerando que normalmente los modos de transporte cuentan con itinerarios de salida desde los orígenes y llegada a los destinos.

Nomenclatura SI: ✓, NO: --

c) Transbordo: Identificando los estudios que no tengan en cuenta las operaciones que se llevan a cabo en los puntos de transbordo y aquellos que consideran las actividades en los nodos que generan costos y tienen tiempos asociados.

Nomenclatura SI: ✓, NO: --

d) Modos de transporte: Las formas de movilizar la carga a través de la red de transporte multimodal empleando las vías ferroviarias, marítimas, terrestres y/o aéreas.

Nomenclatura Fe: Ferroviario, Te: Terrestre, Ma: Marítimo, Ae: Aéreo

e) Productos: Estudios que no consideran algún tipo de carga específico y aquellos que se enfocan en el movimiento de un producto a través de la red, dado que para cada uno hay restricciones particulares.

f) Unidad de carga: Esta característica fue tomada en cuenta dado que para la red de transporte pueden surgir diferentes manejos en la carga que puede afectar la distribución en los medios de transporte empleados. Normalmente se emplea el contenedor o no se especifica, por lo que se habla de la unidad de carga en general.

Los estudios seleccionados se evalúan dentro de las características previamente mencionadas: objetivos, ventanas de tiempo, transbordo, modos de transporte, producto y unidad de carga; para identificar los criterios particulares con los que cumple cada uno de ellos. De esta manera, se construye la tabla 1, donde se clasifican y resumen de acuerdo con las particularidades encontradas en la revisión de cada documento, y al final de la lista, se incluyen las particularidades que se pretenden abordar con este trabajo.

DOCUMENTO	OBJETIVOS	VENTANAS DE TIEMPO	TRANSBORDO	TRANSPORTE	PRODUCTO	UNIDAD CARGA
Banomyong & Beresford, 2001	C, T, D	--	✓	Fe, Te, Ma	Prendas de vestir	Contenedor
Kang Kai, et al 2009	C, T	--	✓	Fe, Te, Ma, Ae	--	--
Wang Qingbin & Han Zengxia, 2010	C, T	--	✓	Fe, Te, Ma	--	Contenedor
Anthony Beresford, et al 2011	C, T, D	--	--	Fe, Te, Ma	Mineral de hierro	Granel / Capacidad de transporte
Tang Liansheng & Huo Jiazhen 2011	C, T	✓	✓	Fe, Te, Ae	--	--
Bing Wang & Xiaoli Wang, 2013	C, T, D	✓	--	Fe, Te	--	--
Guiwu Xiong & Yong Wang, 2014	C, T	✓	--	Fe, Te, Ma	--	--
Yan Sun & Maoxiang Lang, 2015	C, T, CO2	✓	✓	Fe, Te	--	Contenedor
Ying WANG & Gi-Tae YEO, 2016	C, T, Co, Se, Ca	--	--	Fe, Te, Ma	Automóviles usados	Contenedor
Orjuela, J. et al 2016	C, T, CO2	--	--	Fe, Te, Ma, Ae	Uchuva	--
Bortolini, M. et al 2016	C, T, CO2	--	--	Fe, Te, Ae	Frutas y vegetales	--
Mnif & Bouamama, 2017	C, T	✓	✓	Fe, Te, Ma	Fertilizantes	Capacidad de transporte
Yun Bai, et al 2017	C, T, D	--	--	Fe, Te, Ma	Soya	Contenedor
Haiyan Luo, et al 2018	C	✓	✓	Fe, Te, Ma	--	--
Yan Liu & Lingyun Wei, 2018	C, T	✓	✓	Fe, Te, Ma	--	--
Mnif & Bouamama, 2019	C, T	✓	✓	Fe, Te, Ma, Ae	Múltiples	Capacidad de transporte
Xiaozhen Mi, et al 2019	C	✓	✓	Fe, Ma	--	Contenedor
Apichit Maneengam 2020	C, CO2	--	✓	Ma, Te	Bienes en bulks	Capacidad de transporte
Zhaojin Li 2021	C	✓	--	Fe, Te, Ae	--	--
Kwanjira Kaewfak 2021	C, T, R	--	--	Fe, Te, Ma	Carbón	--
Koohathongsumrit & Meethom 2021	C, T	--	--	Fe, Te, Ma, Ae	Automóviles	Contenedor
ESTA PROPUESTA	C, T	✓	✓	Fe, Te, Ma	Café verde	Saco - Contenedor

Tabla 1: Clasificación de los estudios

Paso 4: Análisis y síntesis de la literatura seleccionada

En los estudios seleccionados, los problemas de transporte multimodal se abordaron desde diversas perspectivas como lo son el transporte entre ciudades (Kang Kai, et al (2009); Wang Qingbin & Han Zengxia, (2010)), movimiento entre países (Banomyong & Beresford, (2001); Anthony Beresford, et al (2011)), o consideran un origen y un destino en términos generales sin darle algún alcance o delimitación geográfica real. Adicionalmente, los estudios desarrollados en torno a productos específicos son muy reducidos, y los encontrados se basan en modelos generales que en el desarrollo no contemplan las estructuras, parámetros, restricciones y objetivos que pueden estar sujetos a las características intrínsecas de un producto particular, como lo menciona M. SteadieSeifi et al (2014), mientras que la presente investigación se enfoca en las particularidades del café verde.

De esta manera, la síntesis de los estudios encontrados se presenta a continuación, y se segmentan de dos maneras:

- Estudios de redes de transporte multimodal con enfoque y desarrollo de modelos generales que no contemplan productos específicos
- Estudios de redes de transporte multimodal con enfoque y desarrollo de modelos basados en productos particulares

a) Redes de transporte multimodal: Casos generales

De los 21 artículos seleccionados que han estudiado las redes de transporte multimodal, 12 no se han ocupado de estudiar las situaciones inherentes a productos específicos dentro de una zona geográfica establecida, sino que se han orientado al desarrollo de modelos generales que puedan ser aplicados sin llegar a la precisión de casos puntuales con sus complejidades.

De esta manera, autores como Kang Kai, et al (2009) y Bing Wang & Xiaoli Wang (2013), proponen modelos para seleccionar el modo y la ruta de transporte para movilizar la carga en general, buscando minimizar los costos y tiempos asociados al transporte y al transbordo, pero no se consideran los itinerarios de transporte, por lo que se están omitiendo costos y tiempos adicionales que se pueden generar en la red por penalidades y almacenamientos en los nodos. Adicionalmente, cabe mencionar que, en la red de transporte de café verde en Colombia, se conocen los tiempos de transporte en los arcos

de la red donde los kilómetros no están directa y proporcionalmente relacionados con los tiempos, dada la geografía.

Wang Qingbin & Han Zengxia (2010) construyen un modelo para minimizar los costos incluyendo los generados en los puntos de transferencia de la carga a un nuevo modo de transporte. Yan Sun & Maoxiang Lang (2015) buscan asignar las mejores rutas al movimiento de mercancías contenerizadas empleando el transporte multimodal, considerando las emisiones de CO² y optimizando los costos. Xiaozhen Mi, et al (2019) establecen un modelo de selección de rutas para minimizar los costos, considerando ventanas de tiempo que surgen de itinerarios de los modos de transporte. Sin embargo, los autores mencionados, consideran el contenedor como la unidad de carga que se transporta a través de la red, asumiendo que en ningún punto dicha unidad de puede manipular o dividir.

Tang Liansheng & Huo Jiazhen (2011) consideran el transporte multimodal dentro de la cadena de suministro, buscando maximizar el beneficio con la reducción de costos y tiempo tanto en el transporte como en los nodos de transbordo. Sin embargo, por considerar la cadena de suministro e incluir precios de venta y costos de producción, se sale de los márgenes que se pretenden abarcar con la red para café verde, ya que estaría solo diseñada para el proceso de exportación del producto final. Adicionalmente, al igual que Guiwu Xiong & Yong Wang (2014), no tienen en cuenta factores como la capacidad de cargue y descargue de los nodos, con los tiempos asociados, ni consideran una región geográfica específica como en el caso de Colombia que tiene restricciones particulares.

Haiyan Luo, et al (2018) formulan un modelo de programación multiobjetivo donde se busca cumplir con los requerimientos en los tiempos establecidos, buscando disminuir los costos y, donde mencionan que, con la optimización de la ruta y modo de transporte, mejoraron la eficiencia y la rentabilidad. Sin embargo, no tienen en cuenta los tiempos en los nodos de transbordo, ni los itinerarios de los diferentes modos de transporte y no se considera un lugar específico para estructurar la red.

Yan Liu & Lingyun Wei (2018) construyen un modelo de optimización para elegir el modo y la ruta de transporte en una red multimodal considerando costos y tiempos tanto del transporte como de los nodos de transferencia. También tienen en cuenta los itinerarios de la vía férrea y fluvial en el modelo, así como la congestión de las vías. Sin embargo, se asume que el costo de transporte depende de la cantidad de producto a transportar y en el

caso del café verde no sucede de esa manera, sino que se paga el cupo completo de un vehículo independiente de que se emplee toda su capacidad, por lo que puede ser variable al distribuirlo de forma unitaria entre los sacos o kilogramos de café verde.

Zhaojin Li et al (2021) estudian un problema donde se consideran vehículos limitados, consolidación, ventanas de tiempo y capacidad de la red, para la selección de los modos de transporte. Sin embargo, desde la perspectiva de las empresas comercializadoras de café verde, los vehículos son ilimitados dado que pueden tomar servicios de cualquier transportadora que cumpla con unos requisitos definidos.

Mnif & Bouamama (2017) consideran los fertilizantes sólo en el momento de la validación, por lo que, la construcción del modelo se hace a partir de características generales. Adicionalmente, Mnif & Bouamama (2019) a pesar de que mencionan varios grupos de productos como los materiales peligrosos, los alimentos, elementos del sector de la salud, entre otros, sólo son tenidos en cuenta para la selección del modo de transporte dadas las restricciones que pueden tener dichos productos, pero el modelo se desarrolla con la idea de transportar bienes, no un producto específico que considere las variables inherentes a ellos.

De esta manera, se evidencia que, aunque el desarrollo y aplicación de estos modelos ayudan a profundizar en el campo de las redes de transporte multimodal y se pueden aplicar a productos que no poseen condiciones especiales para su transporte, dado que no se manipula y se emplea una misma unidad de carga a lo largo de una red, cuando se trata de productos con características complejas como ser de la categoría alimentos o las restricciones propias de una zona geográfica, hace necesaria la incorporación, eliminación y/o modificación de variantes que no consideran los modelos generales.

b) Redes de transporte multimodal: Casos particulares

En los 21 artículos seleccionados, se encontraron 9 con aplicaciones a productos o regiones específicas, donde se empiezan a identificar las particularidades de cada caso relacionadas con la unidad de carga, la manipulación los tipos de transporte que pueden ser empleados o los diversos tipos de costos o tiempos que pueden generarse en la red porque sus objetivos van encaminados a la mejora de aspectos diferentes a los que se buscan con este trabajo.

Por su parte, Banomyong & Beresford (2001) emplean un modelo de costos para analizar las alternativas de rutas existentes en la exportación de prendas de vestir contenerizadas,

desde Lao hasta el sudeste asiático empleando transporte multimodal, pero se considera el contenedor como la unidad de carga. Adicionalmente, en este estudio sólo se trabaja un modelo de costos, donde los tiempos no toman relevancia y, además, se elabora con base en las rutas entre Lao y el sudeste asiático que poseen una infraestructura diferente a la colombiana.

Anthony Beresford, et al (2011) establecen un modelo de costos para la selección de la ruta de transporte que mejor se adecue para la movilización de carga a granel donde el producto es el mineral de hierro, desde Australia a China. Para este estudio particular, no se considera una unidad específica de carga, sino la capacidad que tenga el modo de transporte, y se desarrolla con base en las rutas existentes entre Australia y China.

Ying WANG & Gi-Tae YEO (2016) estudian un caso de exportación de vehículos de segunda mano desde Corea a países de Asia Central para determinar la mejor red de transporte, donde buscan disminuir los costos. Orjuela, J. et al (2016) analizan la exportación de la Uchuva desde Colombia hacia Europa, considerando los costos y tiempos totales de transporte, pérdidas de producto, así como las emisiones de CO². Los autores Bortolini, M. et al (2016) abordan un problema de distribución de productos alimenticios perecederos desde productores italianos hacia minoristas distribuidos por Europa, considerando los costos, la huella de carbono y los tiempos de entrega. Bai, Y. et al (2017) analizan las exportaciones de granos de soya contenerizada en Estados Unidos, desarrollando un modelo de análisis de costos. Sin embargo, los estudios mencionados no tienen en cuenta los costos asociados a cargue o descargue de mercancía, tiempos asociados a nodos de transbordo, capacidades de los modos de transporte o itinerarios.

Apichit Maneengam (2020) propone un modelo de programación bi-objetivo que se enfoca en los costos de transporte y las emisiones de CO², para seleccionar la ruta para movilizar bienes en bulks en Tailandia. En el desarrollo del modelo se consideran vehículos limitados, pero como la flota de transporte no la poseen las empresas comercializadoras de café, el servicio es contratado con terceros y se puede tener una amplia disposición de vehículos en el territorio colombiano. Adicionalmente, no se consideran capacidades en los nodos y la carga no se puede unir o separar a lo largo de la red dado que se transporta en bulks, empleando el carbón como caso de estudio.

Kwanjira Kaewfak (2021) desarrolla un modelo de decisión para determinar la mejor ruta de transporte multimodal, considerando el costo y tiempo de transporte, así como los distintos

riesgos relacionados con la logística. Sin embargo, no se tienen en cuenta las operaciones de transbordo con sus respectivos costos, tiempos e itinerarios de transporte, y la importancia se le da al análisis de los distintos tipos de riesgo. Finalmente, se presenta un caso de estudio con el carbón, pero no se consideran actividades de cargue o descargue, ni operaciones de consolidación o desconsolidación del producto.

Koohathongsumrit & Meethom (2021) proponen un sistema de toma de decisiones basada en múltiples criterios para la selección de rutas en redes multimodales, enfocándose en los diversos tipos de riesgo y considerando las distancias para un posterior análisis de trade-offs de acuerdo con los criterios establecidos. Sin embargo, se enfocan más en los riesgos asociados que en el análisis de los costos y tiempos implicados en el sistema, así como las operaciones de transbordo y movimiento de la mercancía a través de la red.

Así, como cada estudio tiene objetivos finales diferentes en cuanto a las características que se pretenden mejorar o dependen de las necesidades logísticas de los productos abordados, se resalta que ninguno de ellos se ha enfocado en el estudio del transporte del café verde a través de una red de transporte multimodal con las particularidades que implica un país con la infraestructura colombiana. Adicionalmente según El Ministerio de Agricultura de Colombia (2020), dentro del sector agro, el café verde es el producto que más se exporta, por lo que se resalta la importancia de las aplicaciones a casos reales.

Paso 5: Resultados obtenidos

A partir de los documentos seleccionados se elabora un resumen de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta las características relacionadas con el problema de planeación una red de transporte para la exportación de café verde, considerando los objetivos de minimización de los costos logísticos y de los tiempos de tránsito, así como los modos de transporte. Adicionalmente, como el café verde es transportado en sacos y en los puertos son contenerizados, la unidad de carga toma gran relevancia para este estudio ya que es cambiante.

De esta manera, se construye un resumen de los documentos que se encuentran dentro de cada criterio específico, entre los 21 estudios seleccionados. Primero se analizan los objetivos, donde en un estudio se pueden encontrar uno o más prioridades en simultáneo ya sean el costo, tiempo, distancia, confiabilidad, seguridad, capacidad, emisiones de CO² y/o riesgo, y así la suma de las anteriores es mayor a 21. De esta misma manera, por ser condicionante el criterio de transporte multimodal, los estudios deben emplear 2 o más de

ellos, y la suma final de estos modos de transporte es mayor a 21. Para el resto de los criterios como lo son las ventanas de tiempo, el transbordo, el producto y la unidad de carga, solo se evalúa si son considerados o no dentro de los documentos, por lo que la suma dentro de cada uno de ellos es 21.

OBJETIVOS	
Costo	21
Tiempo	17
Distancia	4
Confiabilidad	1
Seguridad	1
Capacidad	1
CO2	3
Riesgo	1

Tabla 2: Número de documentos por objetivo.

VENTANAS DE TIEMPO	
SI	10
NO	11

Tabla 3: Número de documentos que incluyen o no ventanas de tiempo.

TRANSBORDO	
SI	11
NO	10

Tabla 4: Número de documentos que tienen o no tienen en cuenta los trasbordos.

TRANSPORTE	
Terrestre	20
Marítimo	16
Ferrovionario	20
Aéreo	7

Tabla 5: Número de documentos que emplean cada medio de transporte.

PRODUCTO	
SI	11
NO	10

Tabla 6: Número de documentos que incluyen o no algún producto específico.

UNIDAD	
SI	11
NO	10

Tabla 7: Número de documentos que mencionan o no la unidad de carga

En la tabla 2 podemos ver que, de los 21 documentos seleccionados, el 100% tienen entre sus objetivos minimizar los costos. De ellos, 17 documentos que corresponde a aproximadamente el 81% consideran la mejora de los tiempos, siendo estas 2 características las más perseguidas en los estudios, dado que pueden afectar la utilidad y los niveles de satisfacción del cliente por cumplimiento. Los demás objetivos se tuvieron en cuenta en menor proporción como la distancia que se consideró en 4 documentos (19%), el CO² o aspectos ambientales en 3 documentos (14%) y los otros solo se incluyeron en 1 documento cada uno.

Las ventanas de tiempo que se pueden ver en la tabla 3, se incluyeron en 10 estudios correspondientes al 47,62% del total. Esta característica es importante dado que, en la realidad, los trenes y los buques cuentan con unos itinerarios de salida y llegada, así como unas frecuencias de viajes.

En la tabla 4, se muestra que 11 documentos correspondientes al 52,38%, incluyeron las operaciones de transbordo. Estas son importantes porque generan costos adicionales en el proceso de exportación dado que se debe descargar la mercancía, movilizarla dentro de los terminales, en algunos casos almacenarla y finalmente pasar al nuevo modo de transporte seleccionado.

Entre los modos de transporte empleados que se encuentran en la tabla 5, tanto el terrestre como el ferroviario fueron tenidos en cuenta en 20 de los estudios (95,24% cada uno). Adicionalmente, en 16 estudios (76,19%) se consideró el transporte marítimo, y finalmente, 7 (33,33%) emplearon transporte aéreo. Este último no es tan relevante para este problema particular, dado que el café no se moviliza por aire por ser un modo de transporte extremadamente costoso.

Del total de documentos seleccionados, 11 estudios que corresponden al 52,38%, consideraron productos específicos al menos para la validación de los modelos como se muestra en la tabla 6. Sin embargo, en términos generales, en lo encontrado en la revisión de literatura, no es muy común encontrar aplicaciones a productos particulares.

Finalmente, como se observa en la tabla 7, 11 estudios (52,38%), especificaron la unidad de carga, sin embargo, no se evidenciaron estudios con cambios en la unidad a lo largo de la red de transporte.

2.3 CONCLUSIONES

La metodología de Revisión Sistemática de Literatura y su respectivo análisis, permitió identificar el ámbito en el que se han desarrollado los estudios de transporte multimodal, donde se consideran características generales para el desarrollo de modelos, que en algunos casos son validados en industrias o productos específicos.

Los artículos que han abordado casos generales y particulares han considerado diversos objetivos, pero sigue siendo de gran importancia el análisis de los costos y los tiempos en la red. También, a medida que aumentan los estudios en esta área se han incorporado más variables para tener una mayor representación de la realidad, y se ha evidenciado que, considerar productos particulares crea escenarios diferentes, haciendo que varíe también la forma de seleccionar transportistas, modos de transporte y rutas.

Cabe resaltar que los documentos hallados no se enfocan en el análisis de productos particulares para la construcción de un modelo, sino al contrario, donde consideran

características y variables generales concernientes al transporte multimodal, que en algunos casos, son evaluadas en productos.

Adicionalmente, no se encontraron estudios que incluyeran aspectos relacionados con la infraestructura multimodal colombiana y la exportación de café verde simultáneamente, y por ende, que a su vez incluyeran características relacionadas con costos logísticos y tiempos de transporte.

CAPITULO 3

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN: CONTEXTO, DELIMITACIÓN Y DEFINICIÓN

En ese capítulo se presenta el contexto del problema, donde se evidencian las dificultades halladas en la revisión de literatura en el campo del transporte multimodal y la exportación de café verde, considerando aspectos como el desempeño logístico y la posición de Colombia frente a otros países exportadores.

Con el fin de proponer una red que sea real y ejecutable con las tendencias y herramientas actuales en la industria cafetera se delimita el problema geográficamente, analizando las regiones en Colombia con mayores áreas cultivadas de acuerdo con su tamaño, ya que marcarían el punto de partida en la red de transporte que se pretende plantear. También se incluye la infraestructura de transporte para el movimiento del café verde que afecta los tiempos y los costos relacionados con la exportación, y se consideran los países que más importan café verde colombiano para establecer los puntos destino de la red.

Posteriormente, se presenta gráficamente la red de transporte multimodal para la exportación de café verde de acuerdo con la infraestructura y elementos hallados y se expresa el problema en una pregunta de investigación que se pretende resolver con el presente trabajo. Además, se justifica el problema a abordar considerando que la temática es relevante y aportará al sector cafetero y de transporte en Colombia, para finalizar con el establecimiento de los objetivos que guiarán la investigación y presentar el alcance.

3.1 CONTEXTO GENERAL DEL PROBLEMA

El uso del transporte multimodal posee altas exigencias logísticas que, para el caso de los países productores y exportadores de café, requiere atención. Brasil, Vietnam y Colombia se caracterizan por ser los principales productores de café a nivel mundial, sin embargo, de acuerdo con el Índice de Desempeño Logístico que se midió en el año 2018, no cuentan con una adecuada infraestructura, lo cual provocó que dentro de este Índice no hayan obtenido una posición favorable: Vietnam ocupó el lugar 39° con un puntaje de 3.27, Brasil el 56° con 2.99 y Colombia el 58° con 2.94, entre 160 países con una escala de 1 a 5 (The World Bank, 2018).

Producto de lo anterior, se precisan grandes esfuerzos para la movilización del café, lo cual conlleva, a incrementos en los costos logísticos y en los tiempos de exportación. Esto se suma a lo expresado por Almeida et al (2011), quienes manifiestan que, para el caso del transporte internacional del café verde, los costos son más elevados con respecto a otro tipo de productos, afectando la exportación de este.

Los sobrecostos en la exportación del café no es un problema reciente. Desde la Cumbre Cafetera del año 2017, se han puesto en evidencia los diversos retos a los que se ven sometidos los exportadores del café, donde uno de los mayores desafíos es la disminución de los costos de transporte de este producto, los cuales representan, aproximadamente, el 37% de los gastos logísticos de las exportaciones (Diaz, 2017). Así mismo, la Asociación Nacional de Exportadores de Café de Colombia -Asoexport-, manifestó en una entrevista con la revista Portafolio en el 2018, que el mayor cuello de botella para los exportadores de café del país son los altos costos logísticos desde las trilladoras, recalando la falta de exploración en el campo del multimodalismo. Finalmente, también para el año 2020, Asoexport manifestó en una entrevista con la revista La República, el surgimiento de nuevas contingencias en este sector, producto de la pandemia del SARS-Cov-2; sumado a la necesidad de poner en marcha el transporte multimodal, el cual, considera, significaría una reducción importante de los costos (Lopez, 2020).

3.2 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

En este caso además de hacer énfasis en la industria cafetera y particularmente en el café verde, la delimitación geográfica permite que el problema no quede abierto o generalizado, y se defina a nivel de países, regiones, ciudades que presentan unas características particulares para el problema abordar.

Para enmarcar el problema se tomaron 3 grandes eslabones. El primero se enfoca en las regiones más productoras de café que marcarán el o los puntos de partida iniciales de la red, el segundo orientado a caracterizar la infraestructura multimodal con la que se cuenta para la exportación desde Colombia que representarán los nodos intermedios de la red, y finalmente, el tercero que se concentra en los principales países exportadores para ubicar los puntos finales de la red.

3.2.1 DISTRIBUCIÓN DE CAFÉ POR DEPARTAMENTOS: IDENTIFICACIÓN DE ORÍGENES

En gran parte de los departamentos de Colombia se cultiva el café como se puede ver en la ilustración 3. Según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia -FNC- (2021), durante el año 2020, en el país se cultivaron un total de 844.744 hectáreas, de las cuales el 61,75% equivalente a 521.600 hectáreas, correspondieron a los departamentos de Huila, Antioquia, Tolima, Cauca y Caldas.

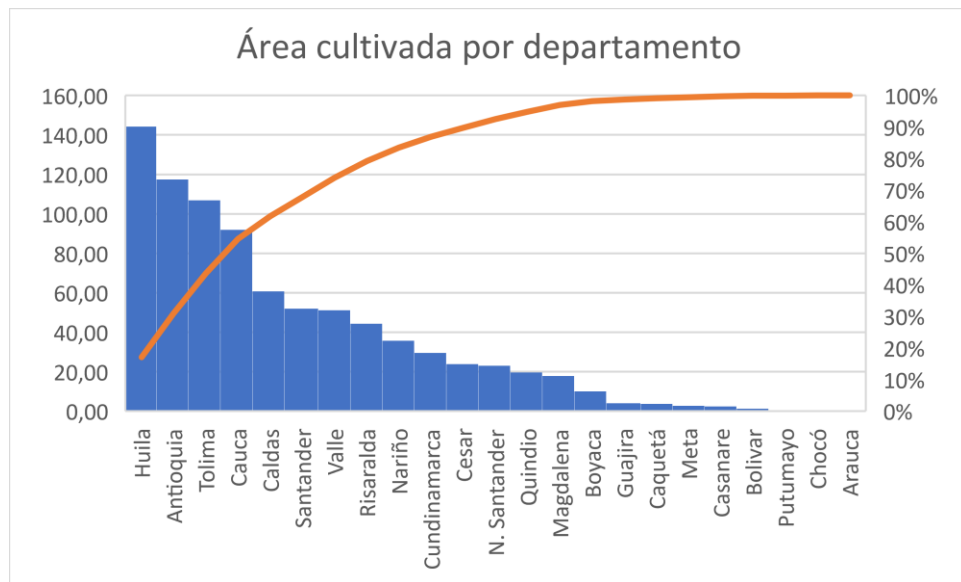


Ilustración 3: Miles de hectáreas cultivadas por departamento de Colombia

Dado que la densidad es una de las características productivas que ha contemplado la Federación Nacional de Cafeteros para medir la producción de los terrenos cultivados en los departamentos (FNC, 2013), para este caso particular, se hizo la relación entre el área cultivada y el tamaño del departamento en hectáreas. De esta manera, al tener en cuenta los 5 departamentos con mayor área cultivada, se evidenció que Huila, Tolima y Caldas, son los que cuentan con una mayor proporción de terreno cultivado en relación con su tamaño.

Departamento	Hectáreas cultivadas	Superficie (ha)	Relación área/superficie
Huila	144.895,62	1.989.000	7,255%
Antioquia	117.531,60	6.361.200	1,848%
Tolima	106.993,54	2.356.200	4,541%
Cauca	91.942,33	2.930.800	3,137%

Caldas	60.821,37	788.800	7,711%
---------------	-----------	---------	---------------

Tabla 8: Relación área cultivada-superficie en los departamentos del Huila, Tolima y Caldas año 2020. Estadísticas FNC

Según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia -FNC- (2021), para el año 2020, en relación con las hectáreas cultivadas, Huila contaba con un total de 144.895,62, Tolima con 106.993,54 y Caldas con 60.821,37. Así mismo, considerando las hectáreas totales de extensión de los departamentos, el 7,25% del Huila está ocupado con cultivos de café, el 4,54% en el Tolima y el 7,71% en Caldas.

Aunque estos tres departamentos son de gran importancia en la producción de café a nivel nacional, de acuerdo con El Departamento Nacional de Planeación -DNP- (2020) quién realizó la Encuesta Nacional Logística, se pudo identificar que en el ítem de costo logístico regional como porcentaje de las ventas en el sector Eje Cafetero donde se encuentra el departamento de Caldas, pasó de representar el 10% en el 2018 al 20,7% en el 2020. Por otra parte, los departamentos de Tolima y Huila pasaron de 13,9% en el 2018 a un 5,5% en el 2020.

También según la misma encuesta, los empresarios tienen la percepción de que los costos de los servicios logísticos en estos departamentos son altos. En el sector Eje Cafetero donde se encuentra el departamento de Caldas, tuvo una puntuación de 2,2 y los departamentos de Tolima y Huila 2,0 en una escala de 1 a 5, siendo 5 muy bajo, 4 bajo, 3 justo, 2 alto y 1 muy alto. De igual forma, estos territorios en la disponibilidad de vías respecto a tiempos de recorrido, velocidad y seguridad, entre otros, fueron catalogados entre regulares y buenos (DNP, 2020).

Para efectos de este trabajo, dentro de estos departamentos se tomarán como puntos de referencia las ciudades capitales siendo Neiva en el caso del Huila, Ibagué en el caso de Tolima y Manizales para Caldas.

3.2.2 INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE EN COLOMBIA: IDENTIFICACIÓN DE NODOS INTERMEDIOS

Teniendo en cuenta las estadísticas emitidas por The World Bank (2018), para el indicador calidad de la infraestructura relacionada con comercio y transporte, Colombia obtuvo un puntaje de 2,67 en una escala de 1 a 5, quedando en el puesto 7 de 15 en Latinoamérica, y en el 72 entre los 160 países evaluados.

Al comparar los resultados en los diferentes indicadores de Colombia frente a los de Brasil y Vietnam que son los principales productores de café verde, se evidencia que Colombia solo los supera levemente en el indicador de embarques internacionales que hace referencia a la facilidad de organizar los embarques. En indicadores como infraestructura, competencia y calidad de los servicios logísticos, seguimiento y rastreo, así como en puntualidad, Colombia se encuentra por debajo de Brasil y Vietnam, como se puede apreciar en la Ilustración 4.

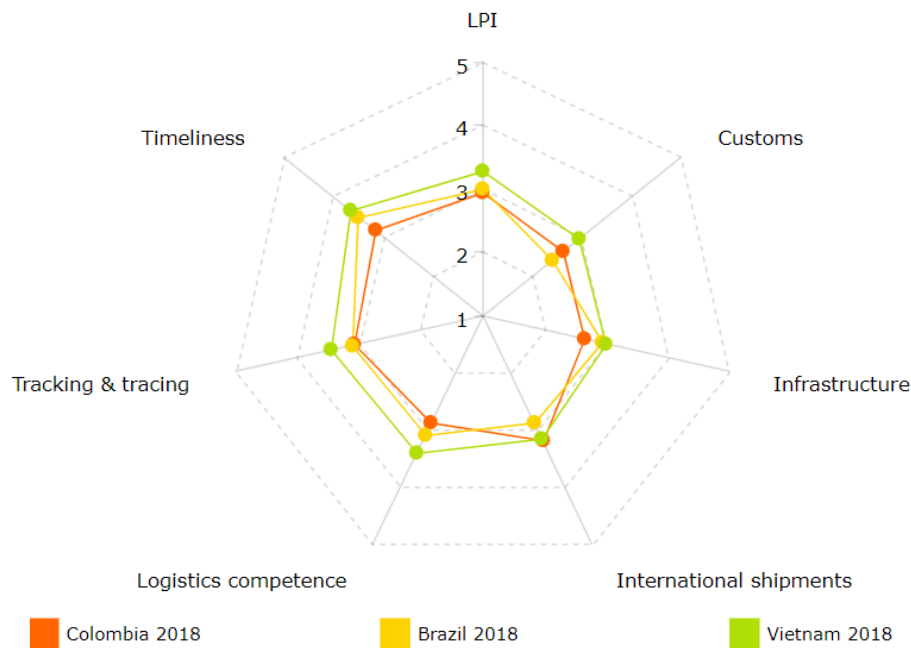


Ilustración 4: Radar Índice de Desempeño Logístico Colombia – Brasil – Vietnam. Tomado de Banco Mundial (2018).

Por otra parte, según la Encuesta Nacional Logística del DNP (2020), al evaluar la evolución de los factores logísticos relacionados con la infraestructura a nivel de puertos, aeropuertos, férrea, fluvial, acceso a las ciudades, intermodal, telecomunicaciones, entre otras consideraciones, se puede apreciar que a pesar de que la región del eje cafetero que contempla el departamento de Caldas tuvo el desempeño más sobresaliente entre las regiones evaluadas, 3,6 en una escala de 1 a 5, y por su parte, la región conformada por los departamentos de Tolima y Huila, tuvo una evaluación de 3,4 en la misma escala.

Sin embargo, los sobresalientes resultados de estas regiones frente a las otras evaluadas, no son lo suficientemente altos para decir que dichos departamentos cuentan con una infraestructura adecuada que facilita la movilización de los productos a lo largo del país.

Según las cifras del Ministerio de Transporte (2021), durante el año 2020 en Colombia se movilizaron 297,9 millones de toneladas, de las cuales el 84,4% se movilizó mediante transporte terrestre carretero, 11,9% mediante el modo férreo, 1,5% empleando el modo fluvial, 2,7% con cabotaje y el 0,04% con el modo aéreo.

De acuerdo con la Encuesta Nacional Logística del DNP (2020), se hizo un comparativo entre los años 2018 y 2020 de los costos de los diferentes modos de transporte en una escala donde 1 correspondía a alto y 5 a bajo. Por su parte las tarifas portuarias pasaron de 2,2 en 2018 a 2 en 2020. La tarifa de transporte por carretera pasó de 2,3 a 2,1. La tarifa de transporte férreo pasó de 2,7 a 2,2. Por último la de transporte fluvial pasó de de 2,5 a 2. Lo anterior pone en evidencia que los costos han ido aumentando en lo relacionado con los modos de transporte.

a) Infraestructura terrestre

De acuerdo con el Informe Nacional de Competitividad 2020-2021 (2021), el transporte por carretera se ha priorizado en términos de inversión, ya que se le ha destinado el 71% de los recursos dentro del sector transporte, frente a un 4% que se ha destinado a la modalidad férrea. Por lo anterior, se ha generado una dependencia al transporte por carretera, ya que por este modo se moviliza el 81 % de la carga que se genera en Colombia.

Según las estadísticas del Ministerio de Transporte (2021), la infraestructura vial no presentó variaciones entre los años 2017 y 2020, donde del total de vías en Colombia aproximadamente el 69% corresponde a vías terciarias, el 22% a vías secundarias y tan solo el 9% a vías primarias.

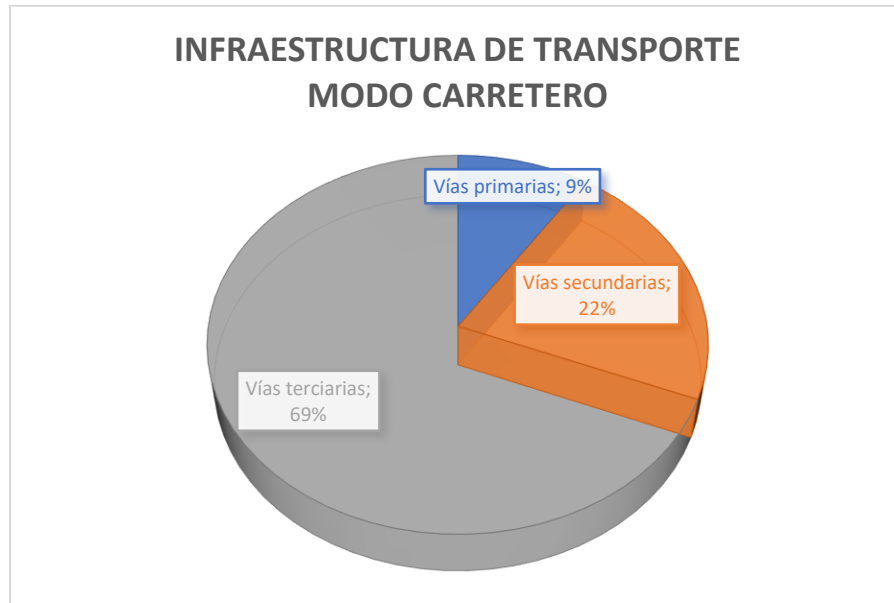


Ilustración 5: Infraestructura de transporte modo carretero. Fuente de información: Ministerio de Transporte

Con lo anterior, a pesar de que se le destine gran parte de los recursos e inversión a este modo de transporte, se evidencia la precariedad de las vías considerando que alrededor de un 91% corresponde a vías secundarias y terciarias principalmente.

En términos de eficiencia cabe resaltar que, según el Informe Nacional de Competitividad 2020-2021 (2021), al considerar una tonelada de carga y un litro de combustible, en el modo férreo se pueden recorrer 101 km, mientras que en el modo carretero se recorren 29 km.

b) Infraestructura portuaria

En el estudio de política portuaria elaborado por la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia – ANDI – (2019) se resalta que los puertos marítimos en Colombia son los nodos de comercio exterior más representativos, con una participación del 96,3% en la carga movilizada en el año 2017.

Según la ANDI, en Colombia existen 10 Zonas Portuarias que corresponden al espacio donde se localizan varias Sociedades Portuarias o Terminales Portuarios Marítimos y Fluviales.

- Zona Portuaria de Barranquilla
- Zona Portuaria de Buenaventura
- Zona Portuaria de Cartagena

- Zona Portuaria de Guajira: Puerto Bolívar, Dibulla, Uribia (Bahía Portete)
- Zona Portuaria de Morrosquillo: Coveñas, Tolú
- Zona Portuaria de San Andrés
- Zona Portuaria de Santa Marta y Ciénaga
- Zona Portuaria de Tumaco
- Zona Portuaria de Turbo: Urabá
- Zona Portuaria del Río Magdalena (Desde Puerto Salgar hasta el Puente Pumarejo)

De la totalidad de carga que se movilizó vía marítima en el año 2018, el carbón representó el 44%, seguido del granel líquido con el 25% y la carga contenerizada con el 21%.

Por otra parte, según el Boletín de Comercio Exterior año calendario 2019 emitido por Asoexport (2020), los principales puertos de embarque para la exportación de café verde fueron desde aquellos que se encuentran ubicados en las ciudades de Buenaventura, Cartagena y Santa Marta con unos porcentajes de 61%, 37% y 2% respectivamente.

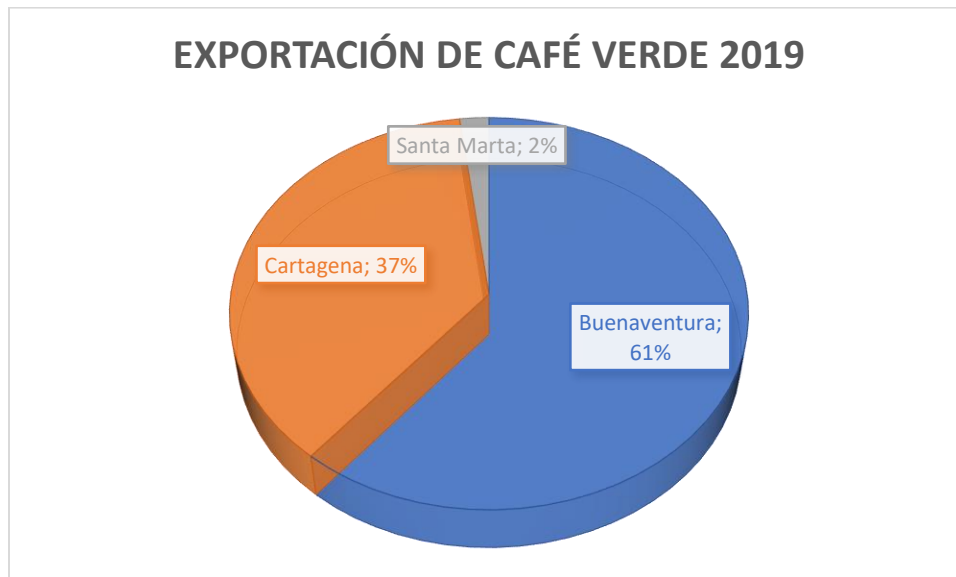


Ilustración 6: Porcentaje de exportación de café por ciudad año 2019

Con los cambios que acarreó la pandemia y los problemas de orden público presentados en el territorio colombiano bloqueando el paso hacia los puertos ubicados en la ciudad de Buenaventura durante el año 2021, la carga empezó a migrar hacia la costa Caribe por lo que la importancia y utilización de los puertos ubicados en las ciudades de Buenaventura, Cartagena y Santa Marta, pasaron a porcentajes de 59%, 34% y 7% respectivamente (Asoexport, 2021).

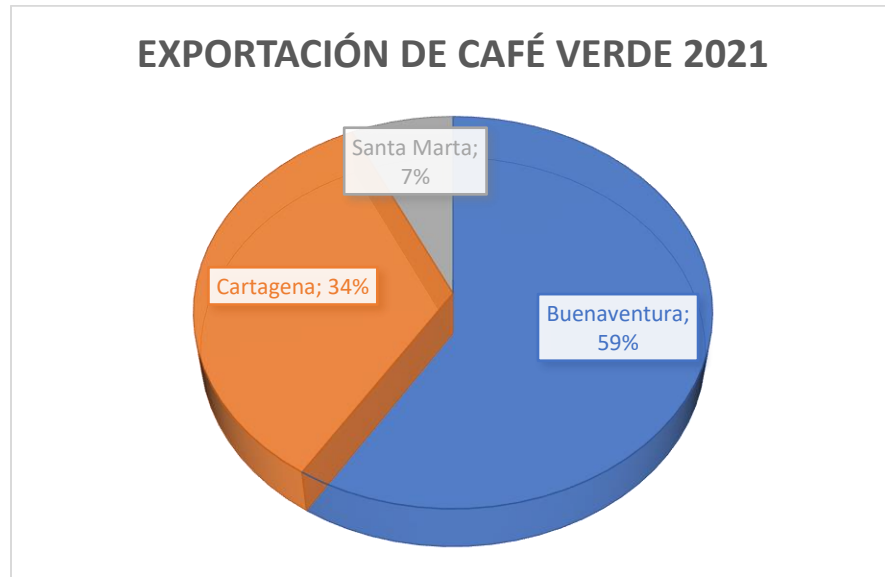


Ilustración 7: Porcentaje de exportación de café por ciudad año 2021

c) Infraestructura multimodal

En el Plan Maestro de Transporte Intermodal desarrollado para el periodo 2015-2035 en Colombia (2015), se resalta que una buena infraestructura multimodal que conecte el país a través de distintos modos de transporte trae beneficios económicos, sociales, políticos y culturales aportando al crecimiento de la nación.

o Red férrea

De acuerdo con el Ministerio de Transporte (2021), la red férrea del país tiene una longitud de 3.528 km de los cuales 1266 Km, correspondientes al 37%, se encuentran activos en operación, mientras que 2262 km, correspondientes al 63% están inactivos. La Red Férrea del Pacífico con tramos en los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle, consta de 498 km y se encuentran inactivos. Por su parte, los 1043 Km de La Red Férrea del Atlántico que se encuentran a cargo de la ANI están en operación comercial, y se conforma del corredor Chiriguana – Santa Marta con 245 km, 273 km del tramo Bogotá – Belencito y 525 km del corredor Dorada – Chiriguana, atravesando los departamentos del Cesar, Santander, Boyacá, Antioquia, Cundinamarca y Caldas. De los 1734 km restantes de la red férrea atlántica administrada por INVIAS, el 99,7% se encuentra inactiva.

Teniendo en cuenta lo anterior, para el caso del café verde que se exporta por los puertos marítimos de Buenaventura, Cartagena y Santa Marta, la red férrea en operación comercial

solo conecta con el puerto de Santa Marta por lo que solo podría ser usado en ese sentido desde el municipio de La Dorada (La Dorada – Chiriguana – Santa Marta).



Ilustración 8: Redes Férreas. Tomado de Ministerio de Transporte (2021)

○ Red fluvial

La red fluvial de Colombia consta de 24.725 km, de los cuales el 26% no es navegable y corresponde a 6.500 km. Por su parte, los 18.225 km navegables que equivalen al 74% permiten el flujo de embarcaciones menores, pero solo el 62% (11,273 km) de la red, permite el tránsito de embarcaciones mayores. Los ríos más importantes para el transporte de carga son el Magdalena y el Cauca, pero no son tan representativos como el transporte por carretera, donde el río Magdalena propiamente, cuenta con dos zonas portuarias fluviales que son la Zona portuaria de Barrancabermeja y la Zona portuaria Río Magdalena (Ministerio de Transporte, 2021).

Respecto a la red fluvial anteriormente mencionada, la Zona Portuaria de Barrancabermeja es la que se encuentra habilitada por la Federación Nacional de Cafeteros para la

exportación de café y cuentan con autoridades como DIAN, ICA, INVIMA, Policía Antinarcóticos, FNC (Impala Terminals, 2020).

Según la ANDI (2021), en Colombia la carga se transporta principalmente por carreteras lo que eleva los costos de transporte dado que no se cuenta con la infraestructura adecuada para el aprovechamiento del transporte férreo o fluvial.

3.2.3 PAISES Y REGIONES IMPORTADORAS DE CAFÉ COLOMBIANO: IDENTIFICACIÓN DE DESTINOS

Las exportaciones de café verde desde Colombia tienen unos destinos muy consolidados. Teniendo en cuenta las estadísticas de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC- (2022), los 5 principales países importadores de café verde colombiano representan cerca del 70% y se encuentran distribuidos así: el 41,68% de las exportaciones de café verde se hicieron hacia Estados Unidos, el 8,16% hacia Canadá, el 7,81% hacia Alemania, el 6,98% hacia Japón y el 4,30% hacia Corea del Sur como se puede ver en la Ilustración 4.

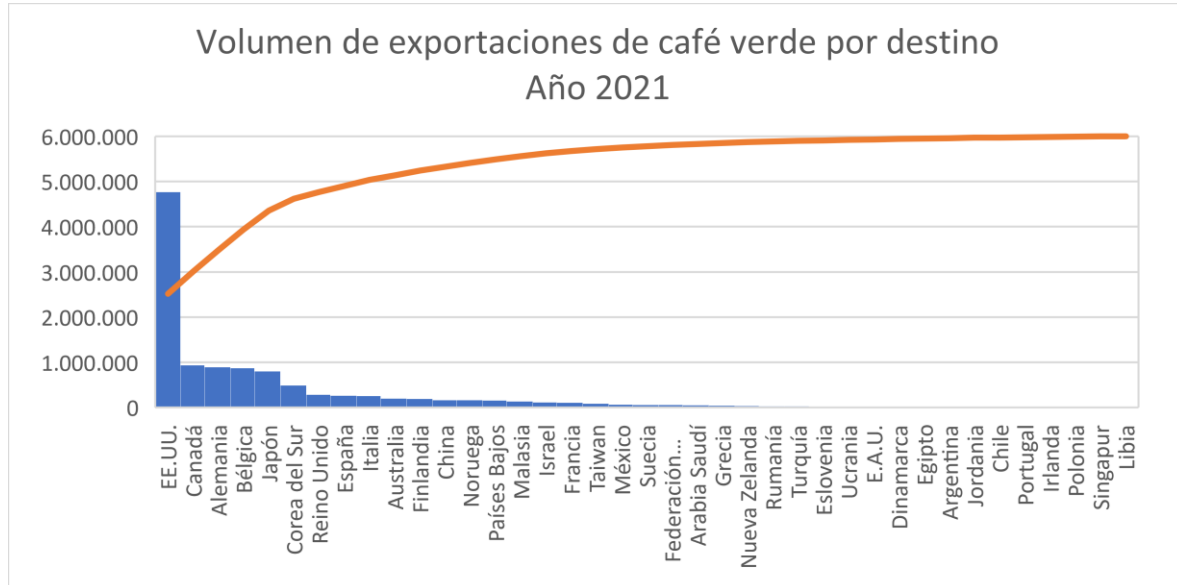


Ilustración 9: Sacos de café verde (60kg) exportados según destino

Adicionalmente, según la Organización Internacional de Café – ICO – por sus siglas en inglés (2021), Estados Unidos se ubica como el país que más importa café en el mundo, donde en el año cafetero 2020, comprendido entre los meses de octubre del 2019 y septiembre del 2020, importó un total de 28.360.868 sacos de café de 60 kg.

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos – USDA – por sus siglas en inglés, en el año 2017, los puertos de New York, Charleston y Oakland se encontraban dentro del top 20 de los puertos agrícolas del país (Taylor, et al 2019).

El puerto de New York fue el mayor importador de bienes agrícolas alcanzando 8.829.822 toneladas métricas -tm-, correspondientes a aproximadamente el 19% del total de productos agrícolas importados en Estados Unidos y el café ocupó el quinto lugar en relevancia. Del volumen total importado 435.1698 correspondieron a café verde.

De las importaciones que ingresaron a Charleston equivalentes a 528.892 tm, el café fue el producto más representativo en las importaciones agrícolas con 118.490 tm y además, fue el puerto en el que Colombia tuvo más representatividad como país origen de las importaciones de productos agrícolas con el 8%.

A su vez, el puerto de Oakland registró importaciones de productos agrícolas correspondientes a 2.026.823 tm (4,4%) del país, donde el café fue el segundo producto más importante correspondiente a 158.635 tm del total, y Colombia, fue origen del 3% de los bienes de esta categoría.

Otros puertos dentro del top 20 de los puertos agrícolas de Estados Unidos como en el caso de Los Angeles, Tacoma, Long Beach, Norfolk, Vancouver y Wilmington no tiene el café entre los productos principales de las importaciones, y otros como Houston, Savannah, Philadelphia y Baltimore no tienen a Colombia entre los principales países de los que provienen los productos. Por su parte, el puerto de New Orleans manejó alrededor del 81% de la carga a granel, que no serviría para este caso particular, y puertos como Kalama y Long View no importaron carga (Taylor, et al 2019)

3.3 RED DE TRANSPORTE MULTIMODAL: REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Considerando los apartados 3.1 y 3.2, la red de transporte multimodal para la exportación de café verde se abordará teniendo como puntos de partida u origen las capitales de los departamentos de Huila, Tolima y Caldas que son Neiva, Ibagué y Manizales respectivamente, y los destinos en Estados Unidos serán los puertos de New York, Charleston y Oakland. Así mismo, como puntos intermedios de la red se encuentra el tren con que va desde La Dorada hacia el puerto marítimo de Santa Marta y el puerto fluvial de Barrancabermeja que conecta con el puerto marítimo de Cartagena.

Con lo anterior, se construye la red en el mapa como se puede ver en la ilustración 8. Esta contiene a Colombia como país de origen, a Estados Unidos como país de destino y los países intermedios de Centroamérica que los separan.



Ilustración 10: Ubicación geográfica de nodos y arcos. Fuente: Elaboración propia.

La red de transporte multimodal está compuesta por nodos y arcos, donde según Resat, H & Turkey, M. (2015), los nodos corresponden a los puntos donde se almacena y/o traslada la mercancía por lo que incluye los puntos donde se hace el cambio de modo de transporte, incluyendo origen y destino, mientras que los arcos equivalen al transporte entre los nodos.

Tomando como base la red de distribución diseñada por Tang Liansheng & Huo Jiazhen (2011) donde se consideran las fábricas como punto de partida, los centros de distribución

como puntos intermedios y el distribuidor como eslabón final, se elabora la red de transporte multimodal para la exportación de café verde como se observa en la Ilustración 5.

Primero se consideran las trilladoras de café ubicadas en las ciudades de Neiva, Ibagué y Manizales, seguido se tienen los puertos multimodales férreo en La Dorada y fluvial en Barrancabermeja, posteriormente se incluyen los puertos del país de origen que son Buenaventura, Cartagena y Santa Marta, y finaliza la red con los puertos en el país de destino, siendo Nueva York, Charleston y Oakland los elegidos.

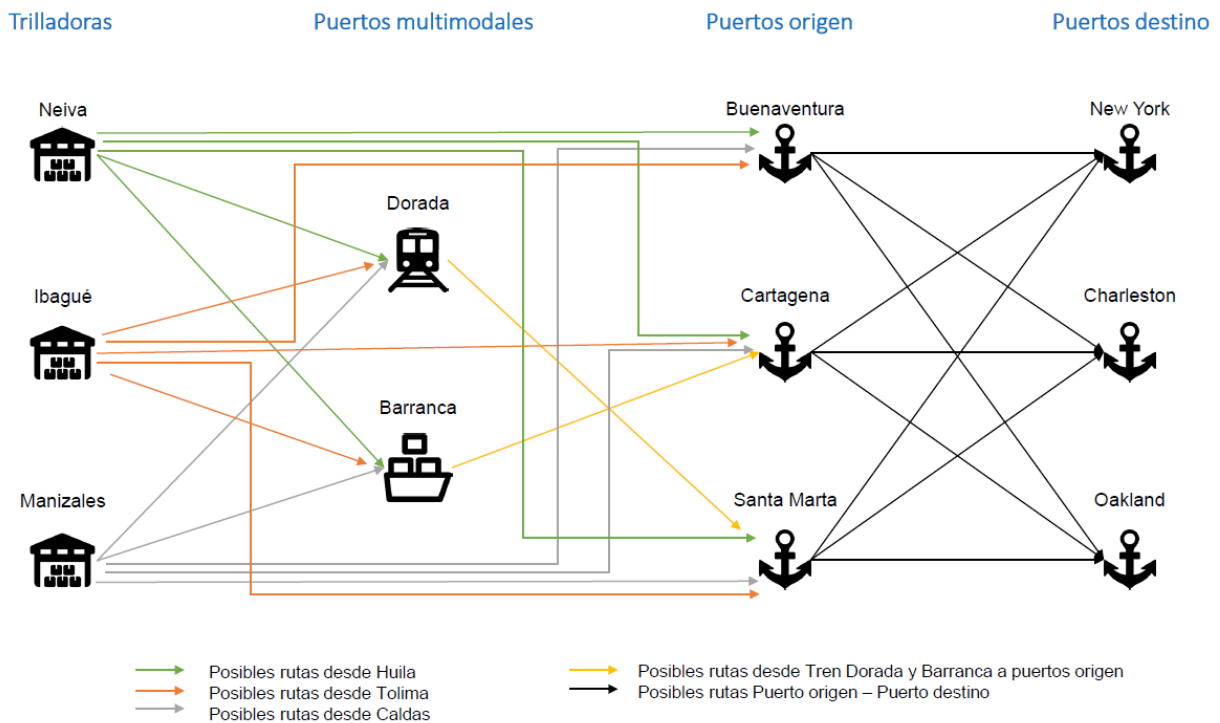


Ilustración 11: Red de transporte multimodal. Nodos y arcos.

3.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Con lo anterior, es posible evidenciar la importancia de la red de transporte multimodal y la necesidad de reducir los costos y tiempos asociados con la exportación del café verde en el territorio nacional y, específicamente, desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas.

Considerando la problemática y diagnóstico de la infraestructura actual para las exportaciones de café verde y con miras a contribuir a su solución, se propone la presente investigación que buscaría responder al interrogante:

¿Cuál es la red de transporte multimodal que se debe emplear para exportar el café verde de tal manera que se reduzcan los costos logísticos y los tiempos de exportación desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia Estados Unidos, teniendo en cuenta la infraestructura multimodal existente en Colombia?

3.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En este numeral se pretende mostrar la novedad del estudio, dado que no ha sido abordado bajo las características previamente mencionadas respecto a los aspectos geográficos, tipo de producto y modos de transporte a emplear. Adicionalmente se expone la relevancia de abordar la problemática, ya que, al resolverla, aporta beneficios a los sectores logístico y cafetero en Colombia.

El café es uno de los productos agrícolas más importantes en el comercio internacional, y de acuerdo con el Ministerio de Agricultura de Colombia (2020), dentro del sector agro, el café es el producto que más se exporta y, en el Producto Interno Bruto (PIB) agrícola, la caficultura representa el 15%. Adicionalmente, según las estadísticas de la Federación Nacional de Cafeteros (2022), en el 2021, aproximadamente el 85% de las exportaciones de este producto desde Colombia, correspondieron al formato *commodity* que es el café verde.

Dentro del panorama mundial, según el 89 Congreso Nacional de Cafeteros (2021), Colombia es el tercer país con mayor producción de café en el mundo después de Brasil y Vietnam. Adicionalmente, se prevé que para el año cafetero 2022 la producción mundial de café decrecerá a 161,2 millones de sacos de 60 kg, después de haber alcanzado 178 millones de sacos en el año cafetero 2021 debido a las fuertes variaciones climáticas y heladas en Brasil. También se espera que la demanda o consumo del producto se encuentre en 172,1 millones de sacos, registrando un déficit de 10,9 millones de sacos (Federación Nacional de Cafeteros, 2022).

En la revisión de literatura se encontraron un par de estudios realizados en Colombia relacionados con café, donde a través de técnicas multicriterio, se buscaba hacer una toma de decisiones más consciente y estructurada en un eslabón de la cadena de suministro. De

esta forma, Trujillo & Martínez (2015), se enfocaron en la selección del mejor transportista basados en las características de oportunidad, flexibilidad, costo, eficiencia, productividad y tecnología. Posteriormente, Trujillo (2017) amplió el estudio incluyendo la opción de consolidación de carga, teniendo en cuenta la necesidad de cambios en tipos o modos de transporte. Sin embargo, aún no se ha planteado una red de transporte multimodal para mejorar los costos logísticos y tiempos en la exportación de café verde desde los orígenes Huila, Tolima y Caldas hacia Estados Unidos.

Las investigaciones encontradas se han enfocado en estudiar problemas relacionados con la selección del modo de transporte y las rutas que mejoren los costos y/o los tiempos de transporte de redes generales que tienen el contenedor como unidad de medida a transportar en la red caso de los autores Wang Qingbin & Han Zengxia (2010), Yan Sun & Maoxiang Lang (2015), Ying Wang & Gi-Tae Yeo (2016), Yun Bai, et al (2017), entre otros. Por su parte, algunos estudios como Haiyan Luo, et al (2018), Yan Liu & Lingyun Wei (2018), Mnif & Bouamama (2019), Xiaozhen Mi, et al (2019), Apichit Maneengam (2020) incluyen los nodos de transbordo, sin embargo, no son específicos en el tipo de costos de transferencia que consideran ya sean, cargues, descargues, almacenamientos, llenados entre otros servicios, y no manipulan la mercancía en los nodos de transbordo por lo que no puede ser dividida como sucede con el café verde. También se evidencia que, se considera el contenedor como la unidad de carga que fluye a lo largo de la red, pero en el caso del café verde la unidad cambia. En los casos hallados en los que tienen en cuenta productos particulares, no se hacen validaciones con transporte de café verde ni en Colombia, ni en otro país.

De acuerdo con Lebedeva & Poltavskaya (2020), los costos logísticos pueden ser equivalentes a un porcentaje entre el 30% y el 50% del costo de producción, por lo que inducir una reducción en los costos de transporte puede traducirse en un aumento de las ganancias o beneficios percibidos por las empresas exportadoras, manteniendo su competitividad y la del sector agrícola.

Adicionalmente, con esta investigación se generan aportes al área de conocimiento en cuanto a la incorporación de las características como los costos y tiempos generados en las actividades de transbordo al cambiar de un modo de transporte a otro, ya que según SteadieSeifi et al (2014) y Sun & Lang (2015) son ignorados con frecuencia y han sido poco estudiados.

Por otro lado, dado que en este estudio se tiene en cuenta el café verde como producto específico clave en el desarrollo de la red de transporte multimodal, cabe resaltar lo expresado por SteadieSeifi et al (2014), donde manifiestan la necesidad de continuar explorando las aplicaciones a bienes particulares, como en el caso de los productos perecederos o materiales peligrosos, dado que estos pueden tener estructuras, restricciones, objetivos y variables sujetas a las características propias de estos.

Finalmente, es importante destacar que las investigaciones en redes de transporte multimodal han ido creciendo desde el año 2000 en las bases de datos que fueron tenidas en cuenta (*Scopus, Ieee Xplore, Science Direct, Web Of Science*) como se puede ver en la Ilustración 12, por lo que se confirma la relevancia y el creciente interés académico en esta temática particular.

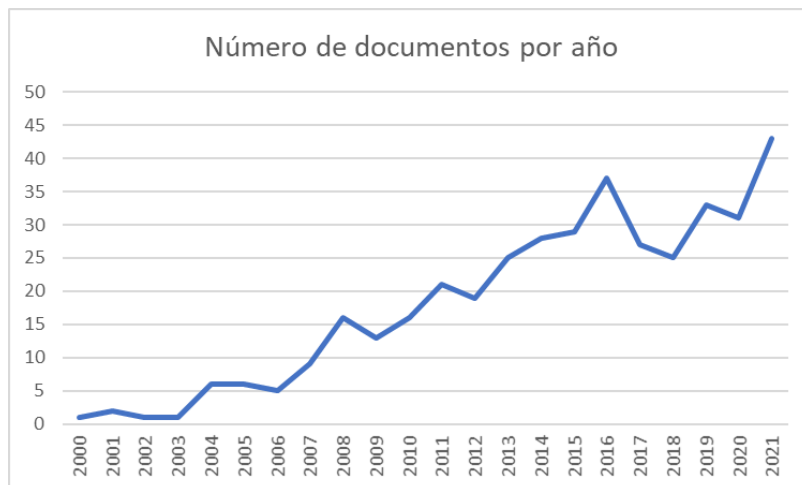


Ilustración 12: Número de documentos por año

Con lo mencionado anteriormente, se demuestra la importancia de la elaboración del presente trabajo, en términos de novedad, relevancia para el sector cafetero y de transporte en Colombia, y desde el aspecto académico por el creciente interés en la exploración y estudio de problemáticas en el transporte multimodal.

3.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos son la guía del estudio, pues a través de ellos se establece la finalidad de la investigación y dan la pauta para la solución del problema expuesto anteriormente.

3.5.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una red de transporte multimodal para reducir los costos logísticos y el tiempo de exportación de café verde desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos, teniendo en cuenta la infraestructura existente.

3.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Analizar el estado del arte de las redes de transporte multimodal y las aplicaciones a productos específicos.
- II. Definir los elementos que componen la red de transporte multimodal desde los departamentos de Huila, Tolima y Caldas hacia Estados Unidos, incluyendo nodos de origen, intermedios, destino y sus respectivos arcos.
- III. Determinar los parámetros, restricciones y variables que influyen en los costos logísticos y tiempos de exportación del café verde.
- IV. Seleccionar la técnica de solución más adecuada, que permita la construcción y validación del modelo, de acuerdo con los parámetros, variables y restricciones establecidas.
- V. Construir un modelo de red de transporte multimodal para la exportación de café verde desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos.
- VI. Validar el modelo de red de transporte multimodal, estableciendo las rutas que permitan disminuir los costos y el tiempo para la exportación de café verde desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos.

3.6 ALCANCE

De acuerdo con lo expuesto por Hernández, Fernández & Baptista (2014) una investigación puede tener 4 alcances: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. Para esta investigación particular el alcance es exploratorio dado que, a pesar de que previamente se ha estudiado la planeación de redes de transporte multimodal, no se ha hecho para café verde, ni con origen en Colombia por lo que los factores a considerar divergen de los establecidos en estudios anteriores.

Adicionalmente, Hernández, Fernández & Baptista (2014) manifiestan que las investigaciones pueden tener enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto. De esta manera, este trabajo se aborda desde un enfoque cuantitativo dado que, desde el punto de vista epistemológico, se desarrolla en un paradigma principalmente positivista y racionalista, ya que se pretenden establecer parámetros, variables y restricciones para construir un modelo, y posteriormente, validarlo para evidenciar su efectividad. Esto no quiere decir que no se requieran técnicas o herramientas de tipo cualitativo para la recolección de la información como encuestas o bases de información secundarias, pero como lo menciona Galeano, M. (2004) *“el uso de una técnica o instrumento no define el enfoque de la investigación”*.

De acuerdo con los autores M. SteadieSeifi et al (2014), Lebedeva, O. & Poltavskaya, J. (2020) y Anoop K P & Vinay V. Panicker (2020), los problemas de planeación asociados a la red de transporte multimodal se han analizado desde los horizontes de decisión estratégico, táctico y operativo. Con la planeación estratégica se abordan problemas relacionados con inversión de capital, toma de decisiones de ubicación de instalaciones e infraestructura de la red de transporte, entre otros. Con la planeación táctica se busca dar el mejor uso a la infraestructura existente, seleccionar proveedores de los servicios de transporte, así como los modos a emplear, la planificación de itinerarios y flujo de la carga entre otras actividades. Con la planeación operativa se abordan principalmente problemas de planificación en tiempo real de los pedidos y la reacción ante cualquier evento adverso, así como su inmediata reprogramación, enfocados en la operación diaria y ocupándose de la dinámica y la estocasticidad para mejorar la confiabilidad del sistema de transporte.

Con lo anterior, esta problemática se enmarca en el nivel táctico, dado que, se busca proponer una red y decidir sobre cuales arcos debe fluir la carga para llegar desde un punto de origen hasta un punto de destino, mejorando los costos logísticos y tiempos de exportación, seleccionando los modos de transporte a emplear y proveedores de servicios de transporte, y considerando los tiempos de entrega acordadas con el cliente.

Desde un punto de vista geográfico, este trabajo se encuentra primeramente delimitado con las ciudades capitales de los departamentos del Huila, Tolima y Caldas que son Neiva, Ibagué y Manizales respectivamente como orígenes del café verde, y con los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos como puertos de destino.

Adicionalmente, se limita a un producto específico que es el café verde, con unas particularidades concernientes al país como lo es su exportación en sacos de fique de 70

kg cuando en la mayoría de los países son sacos de 60 kg. También, al considerar la infraestructura multimodal actual en Colombia, se cuenta con el tren de la Dorada y el puerto de Barrancabermeja que transporta carga a través del río Magdalena.

Teniendo en cuenta que se aborda el proceso de exportación desde un punto origen donde se entrega el café verde como producto final y se entrega en un punto de destino ubicado en un puerto de Estados Unidos, ya sea Oakland, New York o Charleston, según International Chamber of Commerce -ICC-, cabe resaltar que se encuentra dentro por el incoterm CIF “Cost, Insurance and Freight”.

Con esta investigación se pretende encontrar la combinación de rutas que tenga el menor tiempo de exportación y costo logístico posible entre las múltiples opciones, dada una trilladora como punto de partida y un puerto de destino en Estados Unidos. Para ello, se requiere conocer origen, destino, fecha máxima de entrega del café, los costos y los tiempos en los que se pueden incurrir en toda la red de transporte multimodal, así como los itinerarios con los que cuentan los servicios de transporte férreo, fluvial y marítimo, y de esta manera, con el modelo propuesto, se podrá conocer la ruta que proporcione el mejor costo logístico y tiempo de exportación, considerando operaciones de transporte, cargue, descargue, almacenamiento, manipulación de la carga, entre otros.

3.7 CONCLUSIONES

En este capítulo se planteó la problemática relacionada con los altos costos logísticos y tiempos en los que se incurre al exportar café desde Colombia, que son expuestas en las evaluaciones de desempeño bajo indicadores y parámetros internacionales. Adicionalmente, se delimitó el alcance del estudio desde los ámbitos epistemológicos, geográficos, comerciales y desde los niveles de planeación y se establecieron los objetivos que guiarán el desarrollo del estudio.

Fue identificada la infraestructura colombiana tanto terrestre y portuaria, así como en las opciones de multimodalidad, para considerar los elementos con los que se cuenta actualmente en el país para exportar café verde.

También se reconoce la importancia de abordar este problema con miras no solo a mejorar las condiciones del sector cafetero en Colombia desde los aspectos logísticos, sino también desde la novedad y aporte al sector académico por el creciente interés en esta área.

CAPITULO 4

EXPORTACIÓN DEL CAFÉ VERDE: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO, ACTORES Y ELEMENTOS QUE COMPONEN LA RED.

En este capítulo se hará una revisión del proceso de exportación de café verde desde Colombia, por lo que se presentarán los actores que intervienen para que se pueda llevar a cabo el proceso logístico y sus respectivas responsabilidades y funciones.

Posteriormente se mostrará el detalle de las actividades relacionadas con la exportación y los encargados de cada una. Para ello, se tiene en cuenta la información suministrada por una empresa exportadora de café verde de la ciudad de Manizales y la información obtenida desde los agentes que participan en la red de transporte como las trilladoras de café, los transportistas, los puertos multimodales y marítimos y las navieras.

Adicionalmente se presentarán los elementos que componen la red de transporte multimodal relacionados con los nodos que han sido previamente identificados, los arcos que se forman entre ellos y su respectiva nomenclatura.

4.1 ACTORES DE LA RED DE TRANSPORTE

En la red de transporte multimodal para la exportación de café verde, intervienen diversos actores y cada uno cumple con unas funciones específicas y/o presta servicios que son esenciales para llevar la carga de un origen a un destino.

El ente regulador y controlador de la producción, calidad, transporte y exportación de café verde es la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, según el Capítulo XIII del Decreto 1165 de 2019.

En el proceso logístico se encuentran varios actores como los son las trilladoras de café que se encargan de entregar el producto terminado que es el café verde en este caso, las empresas exportadoras de café verde encargadas de comercializar el producto, las empresas transportadoras que movilizan la carga en el modo carretero, los puertos o nodos multimodales donde se transfiere la carga a un nuevo modo de transporte ya sea el férreo o fluvial, los puertos marítimos desde donde se exporta el producto en origen y los puertos a los que se llega en destino.

Adicionalmente, en los puertos se encuentran otros entes como las empresas operadoras encargadas de las actividades que se ejecuten previo al llenado de los contenedores, las agencias de aduana que reciben los requerimientos de los exportadores y canalizan la información entre las navieras, los puertos y las empresas operadoras, y las líneas navieras que prestan los servicios de transporte marítimo.

4.1.1 FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

La Federación Nacional de Cafeteros representa los intereses de los caficultores colombianos y cumple diversas funciones dentro de la producción, comercio, logística y exportación del café en general, y por ende del café verde, como producto seleccionado para este trabajo.

De acuerdo con el Capítulo XIII del Decreto 1165 de 2019, entre las funciones de la Federación se encuentran:

- Garantizar la compra del café a los caficultores
- Evaluar la calidad del café verde en las exportaciones y garantizar su procedencia de Colombia
- Establecer los parámetros de calidad necesarios para las exportaciones
- Registrar las trilladoras como productores de café verde
- Registrar tostadoras y procesadoras de café
- Registrar las empresas exportadoras de café
- Controlar las exportaciones a través de los anuncios y pagos de contribuciones cafeteras
- Controlar el transporte de café en las vías nacionales a través de las guías de tránsito
- Regular los diseños de los sacos de exportación

4.1.2 EMPRESAS EXPORTADORAS DE CAFÉ VERDE

Las empresas que exportan café en cualquiera de sus formatos deben estar certificadas y registradas ante FNC para la comercialización de café colombiano.

A la fecha, son 630 las empresas exportadoras de café verde registradas que garantizan que el producto que exportan es 100% Café de Colombia según la Federación Nacional de Cafeteros (2021).

De acuerdo con la información suministrada por una empresa exportadora de café verde, entre sus funciones se encuentra la compra de café verde en el territorio nacional, así como su respectiva venta en el mercado internacional.

Adicionalmente se encargan de la planeación y ejecución de la logística desde el lugar en el proveedor entrega el producto, hasta que se le entrega al cliente de acuerdo con los términos de negociación establecidos, conocidos como Incoterms.

4.1.3 TRILLADORAS COMO PUNTO ORIGEN

Según la Resolución 01 de 2002 del Comité Nacional de Cafeteros, una trilladora es *“un establecimiento industrial apto para la trilla de café pergamino, cuyo producto es café verde, con destino a la exportación o para ser utilizado como materia prima para la industria tostadora o fábricas de café soluble”*.

Para este trabajo particular, como ya se mencionó anteriormente, se trabajará con tres trilladoras ubicadas en los departamentos de Huila, Ibagué y Caldas.

- Trilladora Neiva, Huila
- Trilladora Ibagué, Tolima
- Trilladora Manizales, Caldas

4.1.4 TRANSPORTISTAS TERRESTRES

Las empresas de transporte son las encargadas de movilizar la carga desde las trilladoras hacia los puertos directamente, o hacia el nodo férreo de Dorada o hacia el terminal fluvial de Barrancabermeja. Según el Registro Nacional Despacho de Carga RNDC, se encuentran 3679 empresas de transporte terrestre de carga activas.

Según el Decreto número 2228 de 2013 del Ministerio de Transporte de la República de Colombia, el sistema de información SICE-TAC será el parámetro de referencia para establecer fletes en el transporte de carga terrestre y no pueden estar por debajo de esta referencia.

4.1.5 PUERTOS MULTIMODALES

Teniendo en cuenta que el café verde en este caso está destinado para la exportación, los modos de transporte diferentes al terrestre que conectan el interior del país con los puertos marítimos desde donde se exporta el producto son el tren de la Dorada que se conecta con el puerto de Santa Marta, y a través del río Magdalena, con el terminal fluvial de Barrancabermeja que se conecta con el puerto de Cartagena.

- **Red férrea La Dorada – Puerto Santa Marta:** Se reactivó en enero del 2022 y es administrado por Elogia Soluciones Logísticas. De acuerdo con el Ministerio de Transporte (2022), estima una frecuencia de 2 trenes semanales en la ruta Santa Marta – La Dorada y viceversa, movilizandocarga contenerizada. Se resaltó que se busca promover la intermodalidad del modo férreo, ya que reduce los costos de operación entre el 10% y el 15%, posee una mayor capacidad y disminuye la contaminación.
- **Terminal fluvial interno Barrancabermeja:** Es parte de una red de logística de Impala Terminals que, entre otras cosas, busca conectar el interior del país con los puertos de Cartagena y Barranquilla para el comercio internacional, a través del Río Magdalena. En la logística multimodal resaltan que el uso de la barcaza o ferrocarril para el transporte de carga es más eficiente y rentable que el transporte por carretera. Ofrece un servicio con conexiones semanales entre Cartagena, Barranquilla y Barrancabermeja (Impala Terminals Barrancabermeja, 2020).

4.1.6 PUERTOS MARÍTIMOS

En el estudio de política portuaria elaborado por la ANDI (2019), el puerto es un espacio frente a la costa donde se tienen unas instalaciones y se prestan unos servicios que permiten realizar operaciones de cargue y descargue de barcos, así como el intercambio de mercancías entre modos de transporte terrestre, marítimo y/o fluvial.

En Colombia como país de origen, se tendrán en cuenta los siguientes puertos dado que son los principales en la exportación de café verde, como se mencionó previamente.

- Puerto de Cartagena
- Puerto de Santa Marta
- Puerto de Buenaventura

En Estados Unidos como país de destino, se consideran los puertos más importantes en importación de bienes agrícolas desde Colombia y café verde.

- Puerto de New York
- Puerto de Charleston
- Puerto de Oakland

4.1.7 OPERADOR PORTUARIO PARA CAFÉ VERDE

Compañía Operadora Portuaria Cafetera SA -COPC- se encarga del manejo logístico del café para exportación en los puertos de Buenaventura, Cartagena y Santa Marta.

La empresa presta los siguientes servicios:

- Recepción y descargue de café verde
- Toma de muestras
- Repesaje de café en el momento del descargue
- Almacenaje, vigilancia y seguridad
- Fumigación del café
- Cambios de empaque y embalaje del café
- Manejo de averías e imprevistos operativos en el manejo del café
- Repaso de café: sectorización y calidad

4.1.8 AGENCIA DE ADUANAS

Almacenes Generales de Depósito de Café S.A. -Almacafé- es una empresa de la Federación Nacional de Cafeteros que dentro de los diversos servicios que ofrece a los comercializadores y exportadores de café, así como a las empresas generadoras de carga en general, se encarga del agenciamiento aduanero en operaciones de exportación e importación.

La agencia de aduanas se encarga de gestionar los procesos logísticos y servicios que las empresas exportadoras requieren en los puertos, y adicionalmente, tramitan los documentos requeridos por la DIAN para autorizar y radicar la exportación (DIAN, 2021)

4.1.9 NAVIERAS

Las líneas navieras son las encargadas de presentar el servicio de transporte marítimo a las empresas exportadoras o generadoras de carga, que con frecuencia ingresan a los puertos a través de otro modo de transporte.

Según la plataforma de comercio exterior SICEX (2018), del total de carga movilizada por los puertos de Barranquilla, Buenaventura, Cartagena y Santa Marta, la línea naviera Hamburg Sud, tuvo el 21,15% de la participación, seguida de Hapag Lloyd quién aportó al 19,75% del total. En el tercer, cuarto y quinto lugar quedaron las líneas navieras Mediterranean Shipping Company (MSC), Maersk Line y CMA CGM S.A con una participación del 9,94%, 9,44% y 8,52% del total.

Considerando lo anterior, las principales navieras empleadas para la exportación en Colombia y las más representativas son:

- Hamburg Sud

- Hapag Lloyd

4.2 EXPORTACIÓN DEL CAFÉ VERDE

El proceso de exportación de un producto puede tener diversos puntos de inicio o de finalización, de acuerdo con el tipo de negociación que se tenga con el cliente final. Dicha negociación se define con base en un Incoterm, que según la institución International Chamber of Commerce – ICC – (2020), se encarga de definir donde empieza y termina la responsabilidad del vendedor y comprador de un producto en términos logísticos, así como las actividades de las que se debe encargar cada parte.

La red de transporte considerada en este trabajo particular corresponde a un término de negociación CIF, dado que el proceso logístico de la empresa comercializadora y exportadora de café verde empieza en la trilladora donde ingresa la materia prima que en este caso es café pergamino y se produce el café verde que debe cumplir con unos estándares de calidad previamente negociados, y finaliza con el producto entregado en un lugar convenido con el cliente, en este caso en el puerto de destino (International Chamber of Commerce, 2020).

Dentro de estos nodos que marcan el inicio y fin del proceso, se llevan a cabo unas actividades de transporte, almacenamiento, transferencia o transbordo, inspección, consolidación y desconsolidación, generando unos costos logísticos y unos tiempos que pueden alargar o acortar el proceso de exportación y entrega del producto al cliente.

4.2.1 INCOTERM: COST AND FREIGHT (CIF)

Para este trabajo particular, el incoterm empleado será Cost, Insurance and Freight – CIF –, dado que la empresa vendedora y exportadora se debe encargar del proceso logístico en el país de origen, asegurándose de embarcar el café, así como de pagar el flete y el seguro marítimo.

Según la institución International Chamber of Commerce – ICC – (2010), el Incoterm CIF indica que el vendedor hace entrega el producto a bordo del buque por lo que debe contratar y pagar los costos y fletes necesarios para llevar la mercancía al puerto de destino convenido, y adicionalmente debe tener un seguro que cubra el transporte marítimo.

El riesgo de pérdida o daño de la mercancía corresponde al comprador desde el momento que su proveedor entregue el producto embarcado, por lo que debe planear las actividades

posteriores de manejo y recogida en puerto de destino como se puede ver en la ilustración 9.

Rules for sea and inland waterway transport

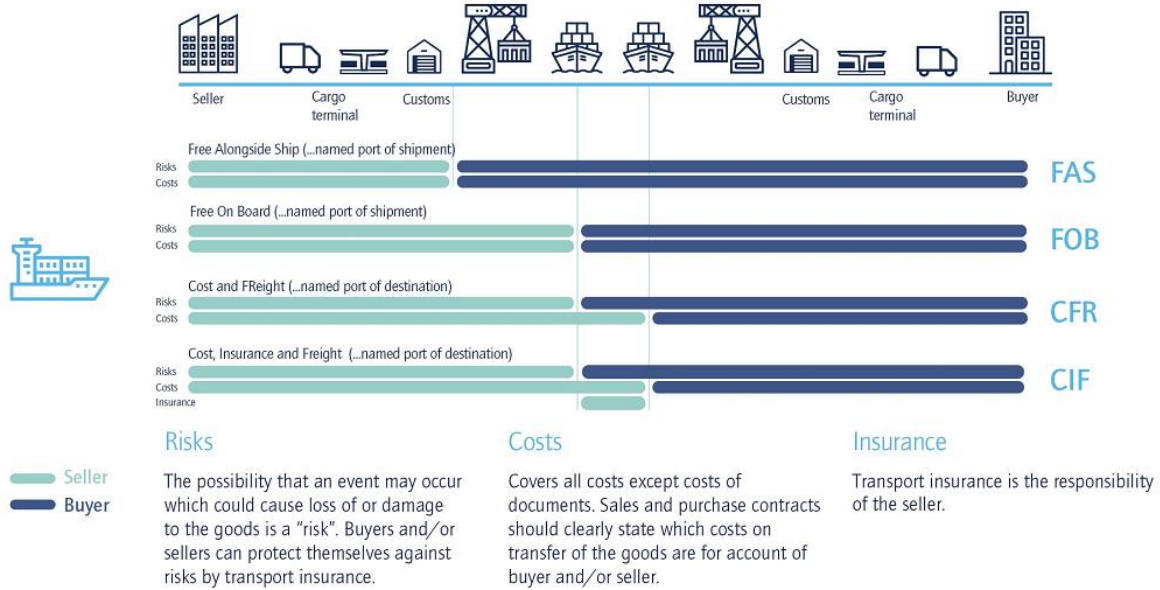


Ilustración 13: Incoterms. Tomado de Kuehne Nagel
<https://co.kuehne-nagel.com/-/informacion/incoterms>

4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXPORTACIÓN

El proceso empieza con la entrega del producto de exportación correspondiente al café verde en una trilladora. El café debe ser entregado bajo unos parámetros de calidad previamente definidos que incluyen las exigencias del cliente y de la Federación Nacional de Cafeteros como ente regulador en Colombia para la exportación de café.

Posteriormente, conociendo la trilladora que corresponde al lugar de entrega del producto por parte del proveedor y considerando el destino acordado con el cliente, la empresa exportadora debe planear y ejecutar la logística para llevar el café verde desde la trilladora hasta el puerto marítimo de destino. Para ello, debe tomar decisiones respecto a la selección del puerto marítimo en origen y la naviera a emplear para la exportación, pero también debe seleccionar los modos de transporte para llegar a dicho puerto marítimo.

La selección de los modos de transporte, puertos marítimos para exportar y navieras depende de la fecha de entrega acordada con el cliente, pues a pesar de que se busca optimizar los costos logísticos, cuando se debe cumplir con una fecha estipulada de entrega

en destino se debe revisar si lo que se quiere es acelerar el proceso de tal manera que el café llegue cuanto antes, o de lo contrario, si la trilladora entrega con mucha antelación el producto, se busca planear una logística que vaya con un flujo más lento.

Con la selección del puerto marítimo desde el que se hará la exportación y los modos de transporte a emplear, se procede a hacer una solicitud de servicio para la movilización del café verde según el transporte requerido, y así tener una confirmación de espacio en un camión, un tren, una barcaza o un barco dependiendo de la planeación y selección realizada por la empresa exportadora.

En caso de que se emplee un servicio multimodal se debe enviar la documentación al terminal o agencia de carga responsable de suministrar la información al terminal multimodal, relacionando el vehículo en el que llegará la mercancía, la cantidad, el destino y todas las particularidades necesarias para prestar el servicio.

Para ingresar a los puertos marítimos en origen, contando con una previa confirmación de la prestación del servicio por parte de los transportistas terrestres, de los puertos multimodales y las navieras, la empresa exportadora envía la documentación a la agencia de aduana donde relaciona el tipo de transporte en el que llegará la mercancía al puerto, los servicios adicionales o insumos que desee incluir en el llenado de contenedor y los certificados requeridos.

A su vez, la empresa exportadora debe suministrar la confirmación de la naviera donde se indique el barco y la fecha de zarpe a la agencia de aduanas, para que esta a su vez inicie el proceso documental con el puerto y con la naviera para programar el llenado del contenedor y dar a conocer el tipo de información que se debe incluir en el documento de transporte llamado Bill of Lading.

Según el Glosario del Banco Mundial (1996) el Bill of Lading o Conocimiento de Embarque es un contrato para el envío de productos a un comprador, que representa un título de propiedad de la mercancía embarcada y también un comprobante de que la naviera ha recibido el producto y se encarga del transporte de mismo.

La Compañía Operadora Portuaria Cafetera es la empresa que descarga la mercancía del modo de transporte en el que llegue a puerto, lo pesa y lo lleva a las instalaciones de almacenamiento de café, mientras que la Federación Nacional de Cafeteros hace el análisis y emite el certificado de calidad y repesos indispensables para la exportación del café.

Después de tener una aprobación de calidad y repesos emitidos por la Federación Nacional de Cafeteros, la agencia de aduanas debe programar y coordinar con terceros para la prestación de los servicios solicitados por el exportador ya sea empresa de fumigación, presencia del ICA para emisión de certificados fitosanitarios entre otros servicios que pueden ser ofrecidos para las exportaciones.

De esta manera, se procede a solicitar al puerto la programación para el llenado de los contenedores y este se encarga de hacer las movilizaciones de contenedores vacíos y llenos para exportación. Cuando se hace el llenado de los contenedores con el café, este pasa de estar almacenado en sacos en una bodega a estar en un contenedor en un patio, donde el puerto se encarga de los movimientos dentro de sus instalaciones.

Finalmente, con el zarpe del barco llega el Bill of Lading y los documentos solicitados inicialmente a la agencia de aduana para su trámite.

En la ilustración 9, se muestra el diagrama de flujo con las actividades necesarias para llevar a cabo el proceso de exportación y los responsables:

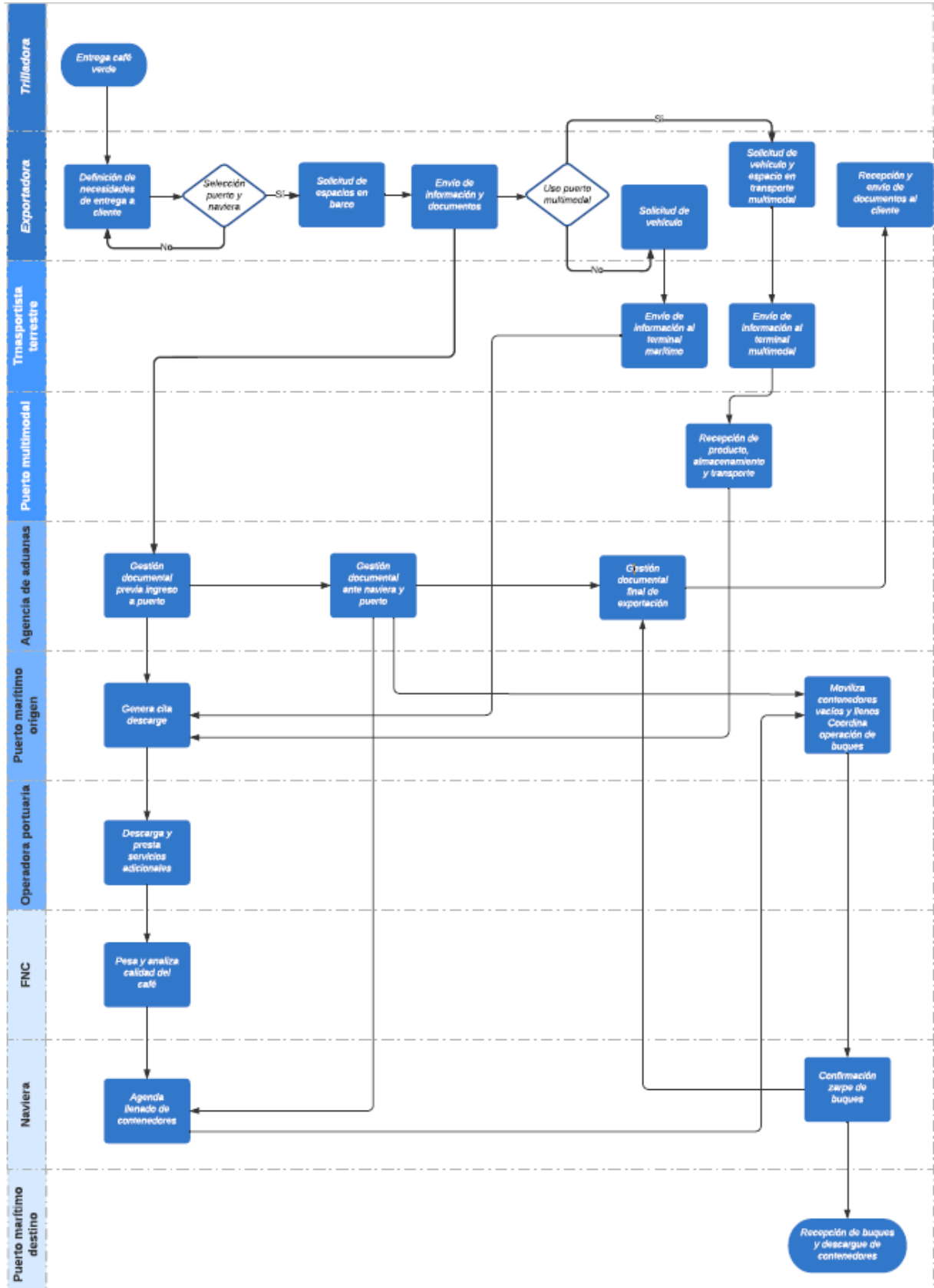


Ilustración 14: Diagrama de flujo

4.2.3 COSTOS ASOCIADOS AL PROCESO

Teniendo en cuenta la descripción del proceso expuesto anteriormente, los costos asociados a la exportación de café verde son los siguientes:

- Cargue en trilladoras
- Transporte terrestre a puertos multimodales o marítimos
- Transporte multimodal (si aplica)
- Descargue en puertos
- Servicios de puerto (movilización de contenedores, llenado, pesaje, etc)
- Servicios de Agenciamiento Aduanero (incluye certificados y documentos)
- Almacenamiento en puerto
- Transporte marítimo
- Seguro marítimo

4.2.4 TIEMPOS ASOCIADOS AL PROCESO

Por su parte, los tiempos en los que se incurren durante el proceso de exportación del café verde son:

- Cargue en trilladoras
- Transporte terrestre a puertos multimodales o marítimos
- Almacenamiento en puerto multimodal (si aplica)
- Transporte multimodal (si aplica)
- Descargue en puerto
- Almacenamiento en puerto marítimo
- Transporte marítimo

4.3 ELEMENTOS DE LA RED

Considerando lo abordado en la problemática de investigación en el capítulo 3, los departamentos relevantes en esta investigación por su densidad de cultivos de café son Huila, Tolima y Caldas, y sus respectivas capitales Neiva, Ibagué y Manizales son considerados los nodos de origen.

De acuerdo con la infraestructura multimodal activa con la que se cuenta en el país para transporte de carga y de café verde como producto particular, se puede incluir la Red Férrea de la Dorada y el Puerto Fluvial de Barrancabermeja como nodos multimodales.

Los principales puertos marítimos empleados en Colombia para la exportación de café son Buenaventura, Cartagena y Santa Marta cumpliendo su función de nodos marítimos en origen.

Así mismo, en Estados Unidos los puertos marítimos de Charleston, Oakland y New York por su relevante participación en la importación de productos agrícolas, particularmente el café y/o productos de origen colombiano, corresponden a los nodos marítimos en destino.

Por lo anterior, para esta investigación particular se consideran 11 nodos que representan las trilladoras, los puertos multimodales, puertos marítimos de origen y puertos marítimos de destino, y 35 arcos que representan las posibles conexiones entre dichos nodos.

4.3.1 NODOS

Como se mencionó anteriormente, los nodos corresponden a los puntos donde se almacena y/o traslada la mercancía por lo que incluye los puntos donde se hace el cambio de modo de transporte, incluyendo origen y destino (Resat, H & Turkay, M., 2015)

Los nodos de origen representan a las trilladoras donde se entrega el café verde como producto final a transportar en la red, y para este trabajo, se identificarán de la siguiente manera:

ABREVIATURA	TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
NO1	Nodo origen 1	Trilladora Neiva
NO2	Nodo origen 2	Trilladora Ibagué
NO3	Nodo origen 3	Trilladora Manizales

Tabla 9: Nodos de origen - Trilladoras

Los nodos multimodales corresponden a los puntos donde se hace la transición de transporte terrestre a transporte férreo o fluvial, y se nombran así:

ABREVIATURA	TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
NM1	Nodo multimodal 1	Puerto férreo Dorada
NM2	Nodo multimodal 2	Terminal fluvial Barrancabermeja

Tabla 10: Nodos multimodales – Férreo o Fluvial

Los nodos equivalentes a los puertos marítimos en Colombia como país de origen se definen de la siguiente manera:

ABREVIATURA	TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
NMO1	Nodo marítimo origen 1	Puerto marítimo Buenaventura
NMO2	Nodo marítimo origen 2	Puerto marítimo Cartagena
NMO3	Nodo marítimo origen 3	Puerto marítimo Santa Marta

Tabla 11: Nodos marítimos en país de origen

Los nodos finales o de destino en la red, son los puertos en Estados Unidos donde finalmente llegará el café y son los que se relacionan a continuación:

ABREVIATURA	TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
NMD1	Nodo marítimo destino 1	Puerto marítimo New York
NMD2	Nodo marítimo destino 2	Puerto marítimo Charleston
NMD3	Nodo marítimo destino 3	Puerto marítimo Oakland

Tabla 12: Nodos marítimos en país de destino

4.3.2 ARCOS

Por su parte los arcos corresponden a las opciones de transporte disponibles entre los nodos anteriormente presentados (Resat, H & Turkay, M., 2015).

Desde los orígenes donde se encuentran las trilladoras, se pueden formar 15 arcos. Algunos conectan los nodos de origen con los puertos multimodales, mientras que otros se conectan directamente con los puertos marítimos en origen, como se muestra a continuación:

ABREVIATURA	TÉRMINO	NODO INICIAL	UBICACIÓN INICIAL	NODO FINAL	UBICACIÓN FINAL
AO1	Arco origen 1	NO1	Neiva	NM1	Dorada
AO2	Arco origen 2	NO1	Neiva	NM2	Barrancabermeja
AO3	Arco origen 3	NO1	Neiva	NMO1	Buenaventura
AO4	Arco origen 4	NO1	Neiva	NMO2	Cartagena
AO5	Arco origen 5	NO1	Neiva	NMO3	Santa Marta
AO6	Arco origen 6	NO2	Ibagué	NM1	Dorada
AO7	Arco origen 7	NO2	Ibagué	NM2	Barrancabermeja
AO8	Arco origen 8	NO2	Ibagué	NMO1	Buenaventura
AO9	Arco origen 9	NO2	Ibagué	NMO2	Cartagena
AO10	Arco origen 10	NO2	Ibagué	NMO3	Santa Marta
AO11	Arco origen 11	NO3	Manizales	NM1	Dorada
AO12	Arco origen 12	NO3	Manizales	NM2	Barrancabermeja
AO13	Arco origen 13	NO3	Manizales	NMO1	Buenaventura
AO14	Arco origen 14	NO3	Manizales	NMO2	Cartagena
AO15	Arco origen 15	NO3	Manizales	NMO3	Santa Marta

Tabla 13: Posibles arcos o transportes desde nodos de origen - Trilladoras

Los arcos que se generan desde los nodos multimodales, considerando el modo férreo y fluvial son 2 como se muestra a continuación:

ABREVIATURA	TÉRMINO	NODO INICIAL	UBICACIÓN INICIAL	NODO FINAL	UBICACIÓN FINAL
AM1	Arco multimodal 1	NM1	Dorada	NMO3	Santa Marta
AM2	Arco multimodal 2	NM2	Barrancabermeja	NMO2	Cartagena

Tabla 14: Posibles arcos o transporte desde los nodos multimodales – Férreo o Fluvial.

Finalmente, considerando que se tienen tres puertos marítimos en origen y tres puertos marítimos en destino y que además se pueden emplear distintas navieras que presentan diferencias en el costo del transporte y tiempo de tránsito, son consideradas Hamburg Sud (HS) y Hapag Lloyd (HL) por ser las más representativas según la plataforma de comercio exterior SICEX (2018). Por lo anterior, se tienen en cuenta 2 arcos por cada par origen-destino que conectan los nodos de puertos marítimos en origen con los nodos de puertos marítimos en destino, para un total de 18 arcos en este último segmento.

ABREVIATURA	TÉRMINO	NODO INICIAL	UBICACIÓN INICIAL	NODO FINAL	UBICACIÓN FINAL
AP1	Arco puerto 1	NMO1	Buenaventura HS	NMD1	New York
AP2	Arco puerto 2	NMO1	Buenaventura HL	NMD1	New York
AP3	Arco puerto 3	NMO1	Buenaventura HS	NMD2	Charleston
AP4	Arco puerto 4	NMO1	Buenaventura HL	NMD2	Charleston
AP5	Arco puerto 5	NMO1	Buenaventura HS	NMD3	Oakland
AP6	Arco puerto 6	NMO1	Buenaventura HL	NMD3	Oakland
AP7	Arco puerto 7	NMO2	Cartagena HS	NMD1	New York
AP8	Arco puerto 8	NMO2	Cartagena HL	NMD1	New York
AP9	Arco puerto 9	NMO2	Cartagena HS	NMD2	Charleston
AP10	Arco puerto 10	NMO2	Cartagena HL	NMD2	Charleston
AP11	Arco puerto 11	NMO2	Cartagena HS	NMD3	Oakland
AP12	Arco puerto 12	NMO2	Cartagena HL	NMD3	Oakland
AP13	Arco puerto 13	NMO3	Santa Marta HS	NMD1	New York
AP14	Arco puerto 14	NMO3	Santa Marta HL	NMD1	New York
AP15	Arco puerto 15	NMO3	Santa Marta HS	NMD2	Charleston
AP16	Arco puerto 16	NMO3	Santa Marta HL	NMD2	Charleston
AP17	Arco puerto 17	NMO3	Santa Marta HS	NMD3	Oakland
AP18	Arco puerto 18	NMO3	Santa Marta HL	NMD3	Oakland

Tabla 15: Posibles arcos o transporte desde los nodos marítimos en origen hasta los nodos marítimos en destino.

4.3.3 GRÁFICA RED NODOS-ARCOS

Después de definir en los 2 puntos anteriores los nodos y arcos para este trabajo con sus respectivos puntos de inicio y finalización, se elabora la red incluyendo la nomenclatura de cada uno de los elementos como se puede ver en la ilustración 11.

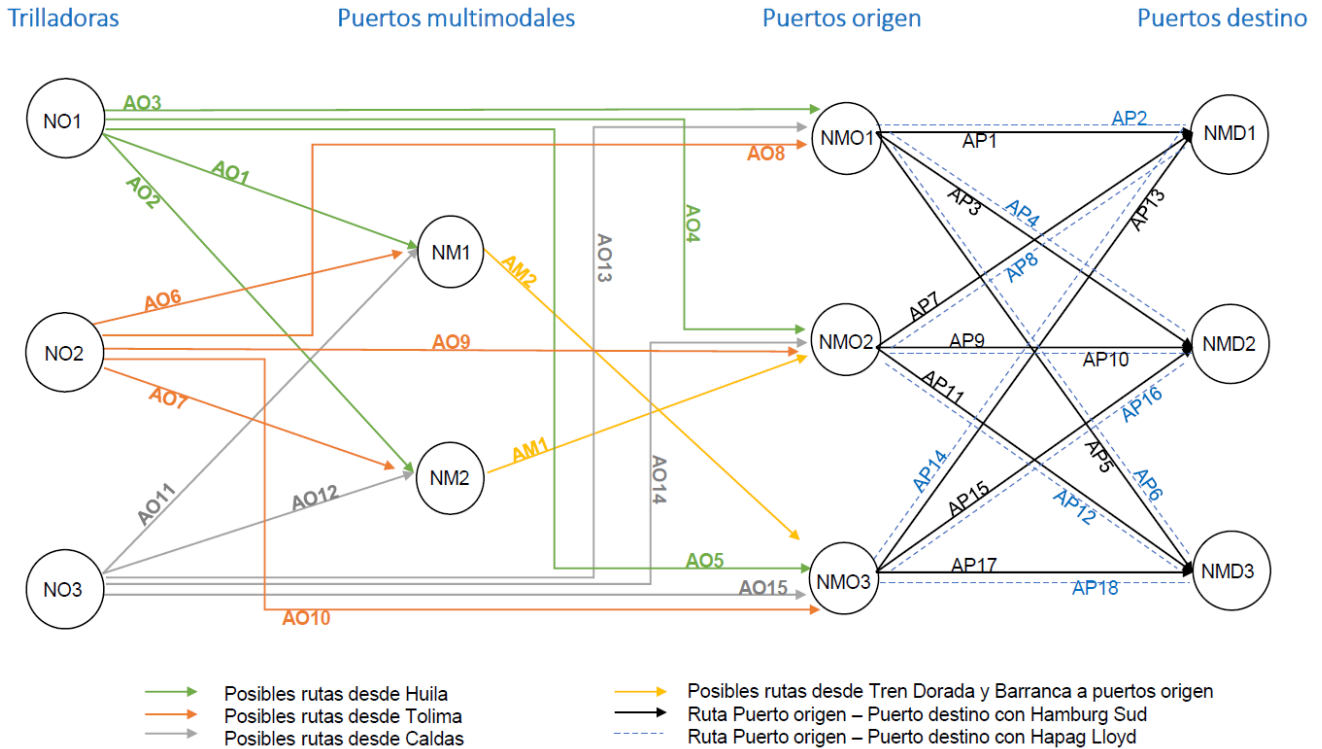


Ilustración 15: Red de nodos y arcos con su respectiva nomenclatura.

4.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentaron los actores que intervienen en la exportación de café verde desde Colombia que incluyen a la Federación Nacional de Cafeteros, transportistas, exportadores y entidades que prestan servicios especializados y son indispensables en algún proceso dentro la red.

Se realizó una descripción detallada del proceso de exportación del café verde, teniendo en cuenta los actores involucrados en las actividades, los servicios que prestan, los costos y tiempos que se generan en cada punto de la red.

Se definieron los elementos de la red donde los nodos corresponden a puntos fijos en la geografía colombiana y estadounidense, y se encuentran los puntos de origen, destino y nodos intermedios donde se transfiere la carga de un modo de transporte a otro, y se presentaron los arcos que corresponden al transporte entre nodos, asignándoles una nomenclatura para posteriormente representarlo gráficamente.

Al identificar claramente todos los elementos que hacen parte tanto de la red física, como los servicios que son prestados por los diferentes entes partícipes en el proceso e

involucrados en la toma de decisiones, se abre paso para hacer una recolección de información de la red.

CAPITULO 5

RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

En este capítulo se realizará una recopilación de la información relacionada con parámetros conocidos como los costos y tiempos que se generan en los nodos y arcos de la red, considerando restricciones de producción, cargue y capacidad, así como las variables que intervienen en el proceso para poder construir una red que represente la realidad en términos logísticos. Todos estos elementos serán base para la construcción del modelo de red de transporte multimodal y su posterior evaluación en los siguientes capítulos.

La información relacionada con el proceso de exportación fue obtenida de diversas fuentes, siendo la principal, una empresa exportadora de café verde de Manizales. Adicionalmente, a través de esta misma empresa se pudo obtener gran parte de la información de las trilladoras, así como del transporte terrestre, multimodal y marítimo.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta información del Ministerio de Transporte (2021) a través de la plataforma SICETAC para obtener cotizaciones de los fletes de transporte terrestre y de las páginas web de las navieras para los fletes de transporte marítimo.

Cabe resaltar que los costos serán llevados a peso colombiano (COP) por saco para tener una misma unidad de medida y facilitar el registro de cada una de las actividades que se llevan a cabo.

5.1 NODOS ORIGEN: TRILLADORAS

Las trilladoras ubicadas en Neiva, Ibagué y Manizales son los primeros nodos de la red de transporte, también llamados nodos de origen.

La información fue suministrada por una empresa exportadora de café ubicada en la ciudad de Manizales a través de un archivo en Excel donde consignan toda la información relacionada con los históricos de exportaciones, la programación actual de exportaciones pendientes y los proveedores.

De cada nodo se registrará la capacidad de producción diaria que está relacionada con la cantidad de sacos de café verde que pueden entregar por día cada trilladora, el costo de cargue por saco, el tiempo promedio de cargue de un tractocamión, así como su desviación y el número de días a la semana que laboran en las trilladoras.

Ítem	Trilladora Neiva	Trilladora Ibagué	Trilladora Manizales	Clasificación
Capacidad de producción diaria	1800 sacos	1100 sacos	1650 sacos	Restricción
Costo cargue por saco	\$490	\$599	\$536	Parámetro
Tiempo promedio cargue tractocamión	2h	2h	2h	Variable
Desviación tiempo cargue tractocamión	±20 min	±20 min	±20 min	
Días de trabajo a la semana	5	5	5	Parámetro

Tabla 16: Información nodos origen / trilladoras

5.2 ARCOS TRANSPORTE TERRESTRE

Los arcos de transporte terrestre corresponden a las posibles rutas que existen entre los nodos de origen o trilladoras y los nodos multimodales ya sea férreo o fluvial, así como con los nodos marítimos en origen correspondientes a los puertos marítimos de origen Buenaventura, Cartagena y Santa Marta.

Los tipos de vehículos que suministran los proveedores de transporte se relacionan en la tabla 16, con sus respectivas restricciones de capacidad y disponibilidad considerada en una escala de bajo, medio y alto. Esta información fue suministrada por la empresa exportadora de café y validada con la transportadora Maestri on Track, ubicada en la misma ciudad.

Tipo	Capacidad (ton)	Disponibilidad
Turbo	4	Baja
Camión	9	Media
Doble troque	12	Baja
Patineta	16	Baja
Tractocamión	34	Alta

Tabla 17: Información tipos de vehículos

Teniendo en cuenta la baja disponibilidad de los vehículos tipo turbo, doble troque y patineta, la disponibilidad media de los camiones y la información suministrada por la empresa exportadora donde más del 90% del café es movilizadado en tractocamión, se considera este tipo de vehículo para este trabajo.

El tractocamión tiene una capacidad de 34 toneladas que equivalen 500 sacos de café verde. Adicionalmente, según la Asociación Nacional de Instituciones Financieras – ANIF – (2014), los vehículos de carga se movilizan a una velocidad de 50 km/h, por lo que se considerará esta velocidad.

Así mismo, al presentarse esperas para el ingreso a puerto ya sea por problemas del sistema o por poca disponibilidad de citas, los vehículos cobran un ítem adicional llamado stand by. Los costos asociados a dicha espera se relacionan en la tabla 17 a partir de la matriz de costos que maneja la empresa exportadora.

Tipo	Capacidad (ton)	Capacidad (sacos)	Velocidad promedio	Stand by (saco, hora)
Mula	34	500	50 km/h	\$42
Clasificación	Restricción		Parámetro	Parámetro

Tabla 18: Tipos de vehículos a considerar

El parámetro del costo de los fletes asociados al transporte terrestre fue obtenido a través de la plataforma SICETAC que es construida por el Ministerio de Transporte (2021), que permite calcular los costos mínimos de la operación de transporte de acuerdo con las características de cada viaje como el tipo de vehículo y de carga, origen y destino, horas estimadas de espera de cargue y descargue, entre otras. Cabe resaltar que, a un vehículo se le debe pagar la totalidad de la capacidad independiente de la cantidad que se desee movilizar.

En la plataforma SICETAC los fletes fueron consultados considerando 3 horas de cargue y 3 de descargue, así como 1 hora de espera previa al cargue y 1 hora de espera previa al descargue.

Para establecer los tiempos de cargue, descargue y esperas, se consideró la información registrada en el archivo de la empresa exportadora de café. Adicionalmente, los parámetros relacionados con las distancias de los arcos, así como las horas de tránsito fueron halladas empleando la herramienta Google Maps.

Origen	Destino	Flete Mula		Distancia	
		Completa	Saco	km	horas
Manizales	Buenaventura	\$2.249.140	\$4.498	304	5,5
Manizales	Cartagena	\$4.987.585	\$9.975	839	17
Manizales	Santa Marta	\$5.040.987	\$10.082	952	17
Ibagué	Buenaventura	\$2.314.033	\$4.628	307	6,4
Ibagué	Cartagena	\$5.442.308	\$10.885	1045	18,2
Ibagué	Santa Marta	\$4.936.034	\$9.872	960	16
Neiva	Buenaventura	\$3.574.308	\$7.149	513	9,4
Neiva	Cartagena	\$6.483.059	\$12.966	1200	19,8
Neiva	Santa Marta	\$5.911.471	\$11.823	1115	17,6
Manizales	Dorada	\$1.416.210	\$2.832	171	4,2

Manizales	Barrancabermeja	\$2.780.204	\$5.560	427	8,2
Ibagué	Dorada	\$1.315.213	\$2.630	218	3,3
Ibagué	Barrancabermeja	\$2.406.062	\$4.812	435	7,3
Neiva	Dorada	\$2.445.710	\$4.891	334	4,9
Neiva	Barrancabermeja	\$3.542.253	\$7.085	590	9

Tabla 19: Información arcos transporte terrestre

5.3 NODOS MULTIMODALES: TERMINALES FÉRREO Y FLUVIAL

Los terminales férreo y fluvial corresponden a nodos multimodales o de transbordo, pues la carga llega a estos puertos internos por medio de transporte terrestre, se almacenan los sacos y posteriormente son cargados en contenedores para ser llevados a los puertos marítimos en origen.

La información que se relaciona en la tabla 18 en lo concerniente al terminal férreo fue suministrada por una empresa exportadora de café ubicada en la ciudad de Manizales a través de un archivo en Excel donde consignan toda la información relacionada con los históricos de exportaciones, la programación actual de exportaciones pendientes y los proveedores.

Por otra parte, los costos asociados al terminal fluvial fueron tomados de la Superintendencia de Transporte (2022) que se encarga de regular las tarifas de Sociedades Portuarias y Fluviales. Dichos costos están asociados con almacenamiento dentro del terminal y operaciones de llenado de contenedores.

De cada nodo se registrará el costo de descargue por saco y el costo de almacenamiento por saco. Así mismo se tendrán en cuenta los días promedio que el café está almacenado en el terminal, la desviación en días del café almacenado, el costo de llenado del contenedor y la cantidad de sacos que van en cada contenedor.

Cabe resaltar que el terminal férreo ofrece una tarifa integral que incluye todos los movimientos que se hagan en dicho nodo.

Ítem	Terminal férreo	Terminal fluvial	Clasificación
Costo descargue por saco	NA	\$600	Parámetro
Costo almacenamiento (saco, hora)	NA	\$18,75	Parámetro
Días promedio almacenamiento	5	5	Variable
Desviación días almacenamiento	±2	±2	

Días libres almacenamiento	NA	5	Parámetro
Costo de llenado contenedor por saco	NA	\$1783	Parámetro
Número de sacos por contenedor	275	275	Restricción

Tabla 20: Información nodos multimodales

5.4 ARCOS MULTIMODALES: TERMINALES FÉRREO Y FLUVIAL

Los nodos multimodales solo tienen un arco de salida, pues el tren conecta con el puerto de Santa Marta y la barcaza que sale del terminal fluvial de Barrancabermeja conecta con el puerto de Cartagena. De esta manera, se tendrían solamente 2 arcos.

La información del costo de transporte por saco, el número de sacos por contenedor, la capacidad de transporte semanal y la distancia fue suministrada por la empresa exportadora de café, de acuerdo con la promesa de servicio que han hecho los proveedores.

Según la Asociación Nacional de Instituciones Financieras – ANIF – (2014) el tren se moviliza a una velocidad de 25 km/h y la barcaza a 14 km/h.

Adicionalmente se considera el porcentaje de cumplimiento del itinerario de acuerdo con las estadísticas internas que suministró cada terminal multimodal a la empresa exportadora empleada para este estudio.

Ítem	Terminal férreo	Terminal fluvial	Clasificación
Costo transporte por saco	\$8.000	\$5.278	Parámetro
Número de sacos por contenedor	275	275	Restricción
Capacidad transporte semanal	15 contenedores	18 contenedores	Restricción
Distancia en KM	780	670	Parámetro
Distancia en horas	32	48	Parámetro
Velocidad promedio	25 km/h	14 km/h	Parámetro
% Cumplimiento itinerario	99%	98%	Parámetro
% Retraso	1%	2%	Parámetro

Tabla 21: Información arcos multimodales

5.5 NODOS PUERTOS MARÍTIMOS ORIGEN

Los nodos que corresponden a los puertos marítimos en origen son Buenaventura, Cartagena y Santa Marta. De acuerdo con las tarifas establecidas por la Compañía Operadora Portuaria Cafetera – COPC –, se conocen los costos relacionados con el cargue

y descargue de sacos en los puertos a través de la información recopilada por la empresa exportadora de café.

Por su parte, el puerto tiene unas tarifas establecidas por el uso de las instalaciones y el almacenamiento. Dichos costos son socializados por la Superintendencia de Transporte (2022) que se encarga de regular las tarifas de Sociedades Portuarias y Fluviales.

Adicionalmente, los exportadores pueden hacer acuerdos con los puertos para tener algunos días libres de almacenamiento, sin embargo, esto puede variar dependiendo de los volúmenes que exporten por cada terminal marítimo.

Ítem	Puerto Buenaventura	Puerto Cartagena	Puerto Santa Marta	Clasificación
Costo descargue por saco	\$683	\$683	\$737	Parámetro
Uso instalaciones por saco	\$108	\$90	\$98	Parámetro
Costo almacenamiento por saco	\$458	\$409	NA	Parámetro
Días libres almacenamiento	4	5	NA	Parámetro
Tiempo espera promedio ingreso	1	2	0	Variable
Desviación tiempo espera ingreso	±1	±1	0	

Tabla 22: Información nodos puertos marítimos de origen

Las agencias de aduanas también manejan unas tarifas para los servicios que prestan en los puertos para las exportaciones. Dichos costos se relacionan en la tabla 22, de acuerdo con la información suministrada por la empresa exportadora.

Ítem	Costo saco	Clasificación
Agenciamiento aduanero	\$1.898	Parámetro
Certificado fitosanitario	\$400	Parámetro
Certificado de origen	\$108	Parámetro
TOTAL	\$2.406	Parámetro

Tabla 23: Información de servicios agencia de aduanas

5.6 ARCOS TRANSPORTE MARÍTIMO

Los arcos relacionados con el transporte marítimo corresponden a todas las rutas existentes entre los puertos en origen de Buenaventura, Cartagena y Santa Marta con los puertos en destino New York, Charleston y Oakland.

Los servicios de transporte marítimo son suministrados por las líneas navieras, donde según lo establecido en el numeral 2.2.9, las más importantes en la movilización de carga en Colombia corresponden a Hamburg Sud y Hapag Lloyd principalmente.

Teniendo en cuenta los registros llevados por la empresa exportadora de café, se evidencia un % de cumplimiento de itinerario del 98% para Hamburg Sud y un 97% para Hapag Lloyd de acuerdo con los servicios que tomaron durante el año 2021. El detalle del cumplimiento de las navieras se muestra en la tabla 22.

Ítem	Hamburg Sud	Hapag Lloyd	Clasificación
% Cumplimiento itinerario	98	97	Parámetro
Variación itineraria días por ruta	±1	±2	Variable
Velocidad	35 km/h		Parámetro

Tabla 24: Cumplimiento de itinerarios

Las navieras en sus respectivas páginas online cuentan con herramientas para hacer cotizaciones de los fletes marítimos, así como la frecuencia del servicio y los días de tránsito (Hamburg Sud, s.f.) (Hapag Lloyd, s.f.).

Dado que el Incoterm empleado en este trabajo para la exportación de café verde es CIF como se mencionó en un capítulo anterior e incluye el seguro marítimo, según información suministrada por la empresa exportadora de café el costo de este seguro es de 0,182% sobre el valor comercial del café, incluyendo el flete marítimo.

De esta manera, teniendo en cuenta que el precio del café es cambiante y asumiendo un costo por saco de excelso de \$1.600.000 de acuerdo con información de noviembre del 2022 compartida por la empresa exportadora de café, un contenedor tendría un valor comercial de \$440.000.000.

Considerando el valor comercial de un contenedor de café verde y los fletes marítimos que se relacionan en la tabla 23, se procede a calcular el seguro marítimo por contenedor:

$$\text{Seguro} = (\text{Valor comercial café} + \text{flete marítimo}) \times 0,182\%$$

Ecuación 1: Cálculo del seguro marítimo. Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Seguro} = (\$440.000.000 + \text{flete}) \times 0,182\%$$

Las rutas para las que no fue posible obtener el flete a través de la herramienta de cotización, así como la capacidad del servicio fueron suministrada por la empresa exportadora de café, ya que cuentan con contratos abiertos para la mayoría de los destinos en Estados Unidos y Europa.

Naviera	Origen	Destino	Flete por saco	Seguro por saco	Flete + seguro por saco	Frecuencia servicio	Capacidad servicio (contenedores)	Días promedio tránsito
Hamburg Sud	Buenaventura	New York	\$ 57.273	\$ 3.016	\$ 60.289	1 sem	100	17
	Buenaventura	Charleston	\$ 56.455	\$ 3.015	\$ 59.469	1 sem	100	18
	Buenaventura	Oakland	\$ 50.727	\$ 3.004	\$ 53.732	1 sem	100	20
	Cartagena	New York	\$ 50.433	\$ 3.004	\$ 53.437	1 sem	100	10
	Cartagena	Charleston	\$ 50.433	\$ 3.004	\$ 53.437	1 sem	100	8
	Cartagena	Oakland	\$ 52.364	\$ 3.007	\$ 55.371	1 sem	100	27
	Santa Marta	New York	\$ 57.273	\$ 3.016	\$ 60.289	1 sem	100	15
	Santa Marta	Charleston	\$ 56.945	\$ 3.016	\$ 59.961	1 sem	100	18
	Santa Marta	Oakland	\$ 58.909	\$ 3.019	\$ 61.928	1 sem	100	27
Hapag Lloyd	Buenaventura	New York	\$ 49.909	\$ 3.003	\$ 52.912	1 sem	50	19
	Buenaventura	Charleston	\$ 48.273	\$ 3.000	\$ 51.273	1 sem	50	24
	Buenaventura	Oakland	\$ 45.000	\$ 2.994	\$ 47.994	1 sem	50	33
	Cartagena	New York	\$ 45.000	\$ 2.994	\$ 47.994	1 sem	50	8
	Cartagena	Charleston	\$ 45.000	\$ 2.994	\$ 47.994	1 sem	50	13
	Cartagena	Oakland	\$ 42.055	\$ 2.989	\$ 45.043	1 sem	50	14
	Santa Marta	New York	\$ 52.364	\$ 3.007	\$ 55.371	1 sem	50	14
	Santa Marta	Charleston	\$ 51.480	\$ 3.006	\$ 54.486	1 sem	50	18
	Santa Marta	Oakland	\$ 52.364	\$ 3.007	\$ 55.371	1 sem	50	28
Clasificación			Parámetro	Parámetro	Parámetro	Parámetro	Restricción	Parámetro

Tabla 25: Información de los arcos de transporte marítimo.

5.7 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los registros que posee la empresa exportadora de café, las páginas web de las navieras Hamburg Sud y Hapag Lloyd, el Ministerio de Transporte, la Superintendencia de Transporte, la empresa transportadora Maestri On Track y la Asociación Nacional de Instituciones Financieras, se obtuvo la información relacionada con los costos logísticos, los tiempos de exportación y las restricciones que existen alrededor del proceso.

La información recolectada en este capítulo es la base para hallar los valores finales de las variables de costo logístico y tiempo total de exportación, en capítulos posteriores.

Se obtuvieron los costos logísticos que incluyen cargues, fletes terrestres en tractocamión, descargues, esperas o demoras, almacenamiento, llenado de contenedores, fletes de transporte multimodal, actividades portuarias y de agenciamiento aduanero, fletes marítimos y seguro en el transporte marítimo.

Los tiempos asociados al proceso de exportación obtenidos fueron tiempos promedios de cargues, almacenamiento, esperas y tránsito marítimo, con sus respectivas desviaciones, así como tiempos relacionados con el tránsito terrestre y multimodal.

También se identificaron las restricciones relacionadas con la capacidad de producción de las trilladoras en sacos por día, de los medios de transporte en sacos por tipo de vehículo o por contenedor y capacidad general de los servicios que prestan en contenedores semanales a recibir.

La mayoría de los datos fueron obtenidos a través de la empresa exportadora de café, dado que esta recopila la información de las trilladoras, los proveedores de transporte, los terminales multimodales y puertos marítimos, así como sus operadores para hacer la planeación de las exportaciones.

CAPITULO 6

TÉCNICAS PARA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE TRANSPORTE MULTIMODAL

El capítulo 6 está enfocado en conocer los problemas de redes de transporte multimodal desde los aspectos de planeación y toma de decisiones, así como en identificar los métodos y las técnicas específicas que se han desarrollado y empleado comúnmente en su solución.

Adicionalmente, se expondrán las generalidades de las técnicas halladas más relevantes para posteriormente realizar la evaluación y selección de la que mejor se ajuste a las necesidades y particularidades del problema de red de transporte multimodal.

Por último, se abordará la técnica seleccionada para la solución del problema de red de transporte multimodal en la exportación de café verde desde los aspectos particulares y se presentará el software con el que se modelará y buscará una solución al problema expuesto.

6.1 PROBLEMAS DE REDES DE TRANSPORTE MULTIMODAL

La planificación de rutas es un problema asociado al uso eficiente de los recursos con los que se cuenta en la red de transporte, buscando seleccionar rutas para distribuir el flujo de mercancías desde el exportador hasta el destinatario, en función del costo, la estabilidad, la regularidad, entre otros factores (Lebedeva, O. & Poltavskaya, J., 2020).

Por su parte, como se mencionó anteriormente, en el transporte multimodal, se utilizan combinaciones de varios modos de transporte como el férreo, carretero, marítimo, fluvial y aéreo para enviar mercancía desde un punto de origen hasta uno de destino.

Según Lebedeva, O. & Poltavskaya, J. (2020), al integrar diferentes modos de transporte para los movimientos de mercancías puede ser más eficiente en términos de costos o ecología, sin embargo, al involucrar el componente de planificación de las rutas en la red de transporte hace que sea un ejercicio más complicado.

De acuerdo con los autores M. SteadieSeifi et al (2014), Lebedeva, O. & Poltavskaya, J. (2020), los problemas de planeación asociados a la red de transporte multimodal se han analizado desde los horizontes de decisión estratégico, táctico y operativo. Sin embargo,

como se mencionó anteriormente en el alcance de este trabajo, el problema no está enfocado en la planeación estratégica dado que no se busca soportar decisiones que requieren la inversión de capital, de ubicación de instalaciones e infraestructura de la red de producción, almacenamiento y/o transporte. Tampoco se encuentra en el segmento de la planeación operativa que se enfoca en lo micro, la planeación inmediata o diaria, dado que no se pretende planificar en tiempo real la producción, envío de los pedidos o responder de forma inmediata a eventos inesperados que lleven a la gestión de recursos como asignación o almacenamiento, o a la replanificación de itinerarios de operaciones por situaciones adversas que impidan el flujo normal.

Sin embargo, con la planeación táctica se pretende dar un mejor uso a la infraestructura existente, seleccionar los proveedores de los servicios de transporte y los modos de transporte a emplear, así como la planificación de itinerarios y flujo de la carga entre otras actividades. Las decisiones que se tomen en torno a estos objetivos de la planeación táctica implican cambios en los costos asociados al sistema, los tiempos de operación y la estructura de la red a emplear de acuerdo con los requisitos del cliente (M. SteadieSeifi et al, 2014).

Según estos mismos autores, M. SteadieSeifi et al (2014), existen dos tipos de modelos, uno llamado Planificación de Flujo de Red con las siglas en inglés – NFP – donde se encuentran las decisiones relacionadas con la planificación movimientos de los productos a través de la red dada; y otro modelo llamado Diseño de Redes de Servicios con las siglas en inglés – SND – que abarca las decisiones relacionadas con la selección de los proveedores y modos de transporte a emplear en la red.

Desde este trabajo se involucran ambos modelos dado que se enfoca en la toma de decisiones que involucran los modos de transporte, selección de proveedor de servicios marítimos y la ruta por la que fluye la carga a través de la red sin enfocarse en el detalle de la programación y reprogramación diaria, de acuerdo con las prioridades que se tengan.

6.2 TÉCNICAS PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE REDES DE TRANSPORTE MULTIMODAL

Los problemas de planeación de redes de transporte multimodal han sido abordados empleando distintas técnicas ya sean existentes o desarrolladas para problemas

particulares como lo expresan M. SteadieSeifi et al (2014), Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018) y Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020). Estos mismos autores recalcan que con el uso, mejora y/o implementación de las diversas técnicas, se han encontrado soluciones a problemas relacionados con los sistemas de transporte como: atascos, contaminación, retrasos, programación, selección de proveedores, de rutas, de modos de transporte entre otros.

M. SteadieSeifi et al (2014), presentan los métodos de solución para problemas de planeación táctica en redes de transporte multimodal que incluyen técnicas exactas, de aproximación como las heurísticas y metaheurísticas, heurísticas híbridas y otras técnicas que incluyen la simulación.

En la revisión de literatura elaborada por Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018), se describen algunas técnicas para resolver problemas de redes de transporte multimodal, considerando enfoques clásicos e innovadores. En los métodos clásicos incluyen los basados en teoría de grafos, en técnicas de optimización, hipergrafos, sistemas de información geográfica y programación dinámica. En los métodos innovadores se encuentran las metaheurísticas, los difusos y los híbridos.

Por su parte, Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020), presentan los enfoques de solución basados en simulación, métodos exactos, metaheurísticas y matheurísticas.

Considerando la información de las revisiones de literatura realizadas por M. SteadieSeifi et al (2014), Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018) y Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020), se presenta un resumen de las técnicas de solución en la tabla 25.

ENFOQUES DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE PLANEACIÓN TÁCTICA EN REDES DE TRANSPORTE MULTIMODAL		
MÉTODOS	TÉCNICAS	GENERALIDADES
EXACTOS	Programación dinámica Programación entera mixta Relajación y descomposición	Los métodos exactos se enfocan encontrar la solución óptima y el ámbito de aplicación se limita a tamaños de red muy pequeños por los grandes esfuerzos computacionales que se requieren (Müller, J., Rentschler, J. 2020).

HEURÍSTICAS	Algoritmos de decisión Heurística Greedy Búsqueda local	Son métodos de aproximación que encuentran soluciones aceptables que se acercan al óptimo en tiempos computacionales razonables (M. SteadieSeifi et al. 2014) (Müller, J., Rentschler, J. 2020).
METAHEURÍSTICAS E HÍBRIDOS	Búsqueda Tabú Búsqueda aleatoria de vecindarios Algoritmo genético	
SIMULACIÓN		Permite conocer el impacto de los cambios en los procesos sin hacerlos en el sistema real. Puede permitir obtener el mejor escenario, pero no es una herramienta de optimización (Garcia, H., et al. 2013).

Tabla 26: Resumen de técnicas de solución presentadas por M. SteadieSeifi et al (2014) y Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018) y Müller, J., Rentschler, J. (2020).

Los métodos de solución empleados se han enfocado principalmente en la optimización a través de técnicas exactas que buscan el mejor escenario en términos de costos, tiempos, medio ambiente, ya sea uno o varios de estos objetivos, y en las técnicas que incluyen algoritmos heurísticos de acuerdo con Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020).

Sin embargo, más allá de buscar un óptimo, dado que los intereses de una empresa pueden cambiar al querer la ruta más larga o corta dependiendo de la velocidad con la que se dese llegar al destino, así mismo dependerá el costo logístico de la ruta escogida. De esta manera, al tener la información completa de las posibilidades existentes, se pueden plantear diversos escenarios para dar paso a una toma de decisiones consciente en situaciones con características particulares dadas.

Adicionalmente, las técnicas de simulación no se han empleado con frecuencia para abordar problemas de planeación táctica por lo que se propone como un campo pendiente de exploración (Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. 2020).

6.3 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA

Teniendo en cuenta las técnicas de solución mencionadas anteriormente, las generalidades y los problemas que se han abordado desde cada perspectiva, se seleccionará la que más se ajuste a la solución del problema identificado de la red de transporte multimodal para la exportación de café verde, que se ha venido desarrollando a lo largo de este trabajo.

Para ello, se empleará el Método de la Suma Ponderada con sus siglas en inglés –WSM–, que es una herramienta para la toma de decisiones valoración de criterios y selección entre múltiples alternativas (Aznar, J. & Guijarro, F.2012).

6.3.1 METODOLOGÍA

Para la aplicación del Método de la Suma Ponderada, es necesario tener establecidas las alternativas a evaluar, los criterios de selección de la técnica y la valoración de los criterios dentro de cada una de las alternativas. Adicionalmente los criterios deben tener una ponderación de acuerdo con la importancia que tenga cada uno de ellos en la alternativa seleccionada (Aznar, J. & Guijarro, F.2012).

De esta manera, Aznar, J. & Guijarro, F. (2012), presentan un Método de Ordenación Simple para establecer la importancia o ponderación de los criterios. Esta consiste en ordenar los criterios de mayor a menor importancia y posteriormente valorarlos asignando el mayor valor al más importante y el menor al último.

Teniendo la importancia de los criterios previamente establecidos, se emplea el Método de la Suma Ponderada para realizar la selección de la técnica. Esta consiste en el producto del peso asignado a cada criterio por el valor que toma para esa alternativa y sumando el resultado final (Aznar, J. & Guijarro, F.2012).

Según Aznar, J. & Guijarro, F. (2012), la ponderación de cada alternativa o técnica a evaluar se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$W_i = \sum_{j=1}^n (w_j \times x_{ij})$$

Ecuación 2: Ponderación de alternativas. Tomado de: Aznar, J. & Guijarro, F. (2012)

Donde:

W_i = Ponderación final obtenida para cada alternativa.

w_j = Peso de cada criterio obtenido por uno de los métodos de ponderación simple

x_{ij} = Valor de cada criterio para cada alternativa

Considerando lo anterior, se procede a aplicar la metodología para seleccionar la técnica de solución del problema siguiendo los pasos expuestos en la ilustración 16.

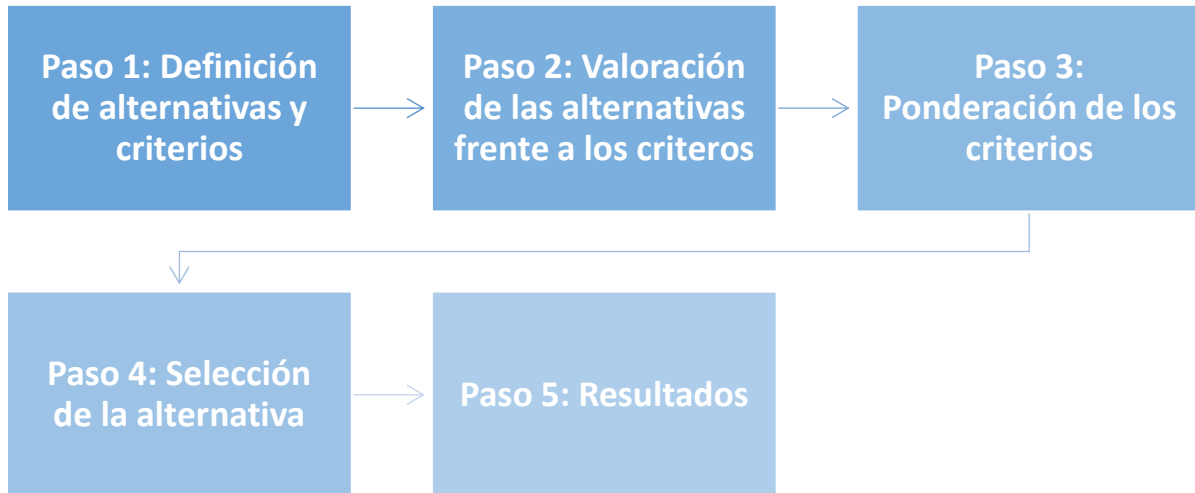


Ilustración 16: Pasos para la selección de la técnica de solución. Elaboración propia. Fuente: Aznar, J. & Guijarro, F. (2012)

PASO 1: Definición de alternativas y criterios

Con base en los enfoques de solución hallados en las revisiones de literatura de M. SteadieSeifi et al (2014), Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018) y Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020) resumidas en la tabla 25, se establecen las siguientes alternativas:

- **Alternativa 1:** Exacto
- **Alternativa 2:** Heurística
- **Alternativa 3:** Metaheurística e híbridos
- **Alternativa 4:** Simulación

Para evaluar las alternativas que corresponden a las técnicas antes mencionadas, se establecen los siguientes criterios:

- **Criterio A:** Obtención del mejor escenario en costo y tiempo
- **Criterio B:** Novedad de la técnica en el área específica
- **Criterio C:** Amplitud de los resultados para flexibilidad en toma de decisiones

Teniendo en cuenta el objetivo principal de este trabajo donde se establece que se busca obtener el mejor escenario en términos de costos y tiempos. Adicionalmente, es importante

la novedad de la técnica de solución para el campo de los problemas de transporte multimodal dado que como lo mencionan Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020), algunas técnicas se han usado con mucha frecuencia y otras han sido poco exploradas. Finalmente, la amplitud de los resultados permite la evaluación de diversos escenarios en la toma de decisiones que pueden llevar a seleccionar una u otra alternativa entre las existentes.

PASO 2: Valoración de las alternativas frente a los criterios

La escala de valoración establecida para dar una calificación a cada una de las alternativas frente a los criterios establecidos consta de 3 dimensiones donde si no cumple con el criterio se le dará una valoración de 1, si cumple parcialmente se le dará una valoración de 3 y si cumple con el criterio se le dará una valoración de 5 como se muestra a continuación:

Valoración	Cumple
1	No
3	Parcialmente
5	Si

Tabla 27: Escala de valoración de alternativas frente a criterios

La alternativa 1 correspondiente a las técnicas de solución exactas se le asignó una valoración de 5 en el criterio A y 1 en los criterios B y C. Dicha valoración se debe a que los métodos de solución exactos podrían darnos la respuesta del mejor costo y tiempo, sin embargo, sería necesaria una simplificación del problema porque solo procesa redes pequeñas. Adicionalmente, es una herramienta que ha sido muy utilizada en este y otros campos y no es amplia en los resultados que da puesto que está enfocado en los óptimos (Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. 2020).

La alternativa 2 donde se encuentran las heurísticas, se valoró con 3 en los criterios A, B y C. Respecto al criterio A, este tipo de herramientas no buscan el óptimo sino opciones cercanas dado que contempla redes de mayor tamaño y complejidad y busca la solución en tiempos computacionales que no sean tan extensos. Las heurísticas han sido empleadas en muchos estudios, sin embargo, siguen desarrollando nuevas o algunas variantes de las existentes que hacen que sea aun parcialmente novedosa, y la amplitud de los resultados están sujetos a la técnica específica o a los desarrollos que se ejecuten para tener información adicional que presente un panorama más amplio (M. SteadieSeifi et al. 2014) (Müller, J., Rentschler, J. 2020).

La alternativa 3 de metaheurísticas e híbridos fue valorada con 3 en los criterios A y C, y con 5 en el criterio B. Frente al criterio A, este tipo de herramientas no buscan el óptimo sino opciones cercanas al igual que las heurísticas, dado que abordan redes de mayor tamaño y complejidad, en tiempos computacionales aceptables. Estos métodos han sido empleados en algunos estudios, sin embargo, por ser frecuentemente combinaciones de algunas técnicas ya conocidas y/o nuevas, le dan la característica de novedad que requiere desarrollos enfocados en la mismas y que además de ellos depende la amplitud de los resultados para la toma de decisiones (M. SteadieSeifi et al. 2014) (Müller, J., Rentschler, J. 2020).

La alternativa 4 de técnicas de simulación tuvo una valoración de 3 en el criterio A y de 5 en los criterios B y C. Para el primer criterio, a pesar de que no es una herramienta empleada en la optimización, a través de ella es posible obtener el mejor resultado entre toda la información que puede arrojar un modelo. Adicionalmente en el segundo criterio, como lo menciona Müller, J., Rentschler, J. (2020), es una técnica novedosa para abordar problemas de tipo táctico en las redes de transporte multimodal dado que se ha empleado muy poco y finalmente respecto al último criterio, es una herramienta que permite tener mucha información respecto a las variables que sean formuladas y desempeños del sistema donde se encuentran los óptimos, pero también es posible tener los demás escenarios.

El resumen de las valoraciones de las alternativas se encuentra en la tabla 28.

Alternativa	Criterio A	Criterio B	Criterio C
1	5	1	1
2	3	3	3
3	3	5	3
4	3	5	5

Tabla 28: Valoración de alternativas 1, 2, 3, 4 frente a criterios A, B, C

PASO 3: Ponderación de los criterios. Método de la Ordenación Simple.

Para establecer la ponderación de los criterios se emplea el Método de Ordenación Simple donde se ordenan los criterios de mayor a menor importancia. En caso de que dos tengan la misma importancia se ordenan con el mismo número. Posteriormente, se valoran asignando el mayor valor al más importante y el menor al último. En caso de que dos tengan la misma importancia se les asigna el promedio de ambas valoraciones (Aznar, J. & Guijarro, F.2012).

Teniendo en cuenta los tres criterios establecidos, se les asigna el orden, ya sea 1, 2 o 3, considerando la importancia de cada uno de ellos respecto a la relevancia frente al objetivo general de este trabajo, a la novedad propiamente para un trabajo de investigación y a la cantidad y calidad de resultados que pueden obtenerse para permitir su amplio análisis. Dado que los criterios 2 y 3 tienen la misma importancia, ambos quedarán con el número 2 en la ordenación.

Adicionalmente, para la valoración, considerando que se debe valorar en la misma escala 1, 2 o 3, al criterio más importante que es el A se le asigna el mayor valor que es 3, y como los otros dos criterios tienen la misma importancia se promedian los dos números restantes que serían 1 y 2, quedando con una valoración de 1,5.

Criterio	Orden	Valor	Ponderación
A	1	3	0,5
B	2	1,5	0,25
C	2	1,5	0,25
Total		6	

Tabla 29: Importancia de los criterios establecidos.

PASO 4: Selección de la alternativa. Método de la Suma Ponderada

Considerando la valoración de cada técnica frente a cada criterio y la ponderación para definir la importancia de los criterios realizada en el paso 3, se procede a aplicar el Método de la Suma Ponderada para la selección de la técnica.

Primero se calcula el producto del peso asignado a cada criterio por el valor que toma para esa alternativa:

Alternativa	Criterio A	Criterio B	Criterio C
1	5 x 0,5	1 x 0,25	1 x 0,25
2	3 x 0,5	3 x 0,25	3 x 0,25
3	3 x 0,5	5 x 0,25	3 x 0,25
4	3 x 0,5	5 x 0,25	5 x 0,25

Tabla 30: Producto del peso de cada criterio por el valor de la alternativa

Posteriormente se suma el resultado final así:

Alternativa	Criterio A	Criterio B	Criterio C	Sumatoria	Selección
1	2,5	0,25	0,25	3	No
2	1,5	0,75	0,75	3	No
3	1,5	1,25	0,75	3,5	No
4	1,5	1,25	1,25	4	<u>Si</u>

Tabla 31: Sumatoria de los productos

PASO 5: Resultados

En una escala final del 1 a 5, la alternativa 1 correspondiente a técnicas exactas tuvo una calificación general de 3/5, cumpliendo en un 60% con los criterios establecidos al igual que la alternativa 2 de las heurísticas. Por su parte la alternativa 3 de métodos metaheurísticos e híbridos tuvo una calificación general de 3,5/5 cumpliendo en un 70% con los criterios establecidos. Finalmente, la alternativa 4 donde se encontraba la simulación, tuvo una calificación general de 4/5, cumpliendo en un 80% con los criterios establecidos y es la herramienta seleccionada para la solución de este problema.

La técnica de solución seleccionada es la simulación, pues como se mencionó anteriormente, aunque no es una herramienta de optimización ella permite obtener el mejor escenario de acuerdo con los objetivos que se formulen, y permite la toma de decisiones al conocer resultados de otras alternativas que, aunque presenten un desempeño en costos y/ o tiempos que no sea el mejor, dependiendo de las necesidades de la empresa exportadora y del cliente, en determinadas situaciones se pueden tener prioridades diferentes.

6.3.2 SIMULACIÓN

La simulación es una técnica que permite realizar estudios experimentales o pruebas piloto, para analizar diversos escenarios y tomar decisiones de manera rápida y a bajo costo en ámbitos de administración de inventarios, cadena de suministro, desempeño en sistemas de manufactura, entre otros. A través de esta técnica se puede representar o abstraer el comportamiento real de los sistemas o redes para su comprensión, análisis y toma de decisiones (García, H., et al. 2013).

Se tienen distintos modelos de simulación para para representar situaciones reales, sin embargo, este trabajo se encuentra dentro de la simulación discreta que corresponde a modelos matemáticos discretos, dinámicos y que pueden incluir variables determinísticas y probabilísticas (García, H., et al. 2013).

Según García, H., et al. (2013) los elementos que se requieren principalmente para la construcción de un modelo de simulación y su ejecución son las entidades, el estado del sistema, los eventos actuales y futuros, las locaciones o localizaciones, los recursos, los atributos, las variables y el reloj de la simulación que se definen a continuación:

Entidad: Es todo aquello que se procesa en un sistema o los objetos sobre los que se ejecutan las acciones. Representa los flujos de entrada y salida de un sistema.

Estado del sistema: representa lo que está pasando en el sistema en un momento determinado.

Eventos actuales y futuros: Son las actividades que hacen que cambie el estado del sistema como es la entrada o salida de una entidad, la interrupción o terminación de un proceso, donde el evento actual es lo que está sucediendo o el proceso que se está ejecutando a una entidad en un momento determinado y el evento futuro son las actividades posteriores a ese procesamiento de la entidad.

Locaciones o localizaciones: Herramientas o módulos fijos en el sistema que permiten procesar las entidades.

Recursos: Son los elementos adicionales necesarios para llevar a cabo un proceso o transformación y es empleado o trasladado de acuerdo con los requerimientos. No se encuentran fijos.

Atributos: Son las características que se desean capturar de las entidades.

Variables: Son unidades de almacenamiento cuyos valores se crean o modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas.

Reloj de simulación: es el contador de tiempo de la simulación y a través de él se puede configurar la cantidad de horas, días, meses o años futuros que queremos ver.

Réplica: Número de ejecuciones o corridas experimentales del modelo de simulación sin cambiar su configuración.

Estado transitorio: Se da al inicio de la simulación donde en muchas de las locaciones no se está ejecutando ningún proceso, pues las entidades apenas están ingresando al sistema y empezando a recorrer la red. Existe mucha variación por lo que no se pueden tomar decisiones o formular conclusiones en este punto.

Estado estable: Se da cuando las variables de decisión presentan cambios poco significativos, por lo que es posible sacar conclusiones y tomar decisiones de manera más confiable.

Arribo: Son las entidades que entra al modelo y se les define dónde, cuándo, cuánto, con qué frecuencia y desde dónde llegan.

Procesamiento: Ejecutar una operación con una secuencia lógica del flujo de entidades en el modelo.

Redes de trabajo: Permiten transportar entidades entre locaciones.

6.3.3 SOFTWARE PROMODEL

PROMODEL es el software de simulación que se empleó para modelar y evaluar la red de transporte multimodal para la exportación de café verde, facilitando la previsión de diferentes situaciones que pueden darse y la toma de decisiones sin afectar el funcionamiento del sistema real.

Este software se acoge a la simulación de eventos discretos y según PROMODEL (s.f.) sirve para planificar, diseñar y mejorar la fabricación, la logística y otros sistemas operativos nuevos o existentes. También permite modelar con precisión los sistemas y procesos del mundo real incluyendo su variabilidad, para realizar análisis anticipados sobre cambios que quieran realizarse y facilitar la toma de decisiones.

La versión para estudiantes de ProModel con la que se construyó el modelo de simulación, cuenta con las siguientes restricciones en la cantidad de elementos a crear:

Cantidad	Elemento
20	Locaciones
8	Entidades
8	Recursos
5	Atributos
15	Parámetros RTI

Tabla 32: Cantidad de elementos que se pueden crear con la versión estudiantil de ProModel

6.4 CONCLUSIONES

Se abordaron los problemas de planeación de la red de transporte multimodal desde un enfoque táctico para identificar las técnicas de solución empleadas.

A partir de la revisión de técnicas de solución, se resumieron con sus generalidades para dar paso a la selección a través del Método de la Suma Ponderada donde primero se definieron las alternativas y los criterios, se realizó una valoración de las alternativas frente a cada criterio, se ponderaron los criterios para establecer su peso o nivel de importancia y finalmente se aplicó el método de selección de la técnica.

La simulación fue la técnica seleccionada para la construcción del modelo y su posterior validación, ya que cumple con el objetivo principal de este trabajo enfocado en mejorar los tiempos y costos de la red de transporte, pero además permite obtener información adicional para un análisis más amplio que soportó la toma de decisiones.

Se identificaron los elementos que se requieren para la construcción modelo de simulación y se presentó el software de simulación PROMODEL con el que se realizará la modelación y respectiva validación.

CAPITULO 7

ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA RED DE TRANSPORTE MULTIMODAL

Este capítulo se enfocará en la construcción del modelo de simulación del problema de red de transporte multimodal para la exportación de café verde. Para ello es necesario identificar en la red propia los elementos que son necesarios para la simulación y que fueron definidos en el capítulo anterior.

También se deben tener en cuenta los datos recolectados en el capítulo 5 en los que se incluyeron las restricciones de producción en las trilladoras, las capacidades de los vehículos ya sean tractocamiones o contenedores para el tren o la barcaza en los transportes multimodales y para el barco en el transporte marítimo, los tiempos de transporte y espera, así como los costos logísticos asociados a todos los movimientos, servicios y almacenamientos en la red.

Finalmente, considerando las limitaciones de la versión estudiantil, se presentan las simulaciones creadas en el software ProModel para la red de transporte, que contienen tres modelos donde cada uno corresponde a una subred por origen con las rutas generadas desde la trilladora hasta el puerto de destino, y adicionalmente por cada origen se tienen dos escenarios que corresponden a las líneas navieras a emplear Hamburg Sud y Hapag Loyd para un total de 6 simulaciones.

7.1 ELEMENTOS PARA CONTRUIR EL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación consta de unas herramientas para su construcción que fueron definidas en el capítulo anterior como son las locaciones, las entidades, los arribos, las redes de trabajo, los recursos, los atributos, los constructos de modelamiento y las variables que deseamos conocer del sistema.

En los siguientes 11 numerales se presentarán los elementos claves en la construcción y posteriormente en la ejecución del modelo.

7.1.1 LOCACIONES

En la tabla 33 se muestran las locaciones que fueron creadas para la red de transporte donde se relaciona el nombre, el gráfico, la capacidad, la cantidad y su respectiva descripción. Para cada uno de los modelos se emplearon 16 locaciones.

No.	Nombre	Gráfico	Capacidad	Unidades	Descripción
1	Trilladora_Neiva Trilladora_Ibagué Trilladora_Manizales		inf	1	Lugar donde se produce el café
2	Estación_Dorada_Entrada		inf	1	Lugar donde se descarga el café en Dorada
3	Estación_Dorada_Salida		inf	1	Lugar donde se almacena y carga el café en Dorada
4	Estación_Barranca_Entrada		inf	1	Lugar donde se descarga el café en Barranca
5	Estación_Barranca_Salida		inf	1	Lugar donde se almacena y carga el café en Barranca
6	Buenaventura_Entrada		inf	1	Lugar donde se descarga el café en Buenaventura
7	Buenaventura_Salida		inf	1	Lugar donde se almacena y carga el café en Buenaventura
8	Cartagena_Entrada		inf	1	Lugar donde se descarga el café en Cartagena









9	Cartagena_Salida		inf	1	Lugar donde se almacena y carga el café en Cartagena
10	Santa_Marta_Entrada		inf	1	Lugar donde se descarga el café en Santa Marta
11	Santa_Marta_Salida		inf	1	Lugar donde se almacena y carga el café en Santa Marta
12	New_York		inf	1	Lugar al que llega el café en New York
13	Charleston		inf	1	Lugar al que llega el café en Charleston
14	Oakland		inf	1	Lugar al que llega el café en Oakland
15	Salida_Mula		inf	1	Lugar en el que se carga el café al tractocamión
16	Acum_Mula		inf	1	Lugar desde el que sale el tractocamión

Tabla 33: Locaciones creadas en ProModel

7.1.2 ENTIDADES

En la tabla 34 se muestran las entidades que fueron creadas para la red de transporte donde se relaciona el nombre, el gráfico, la velocidad de desplazamiento que para todos los casos es cero porque son transportadas en vehículos y su respectiva descripción. Para cada uno de los modelos se emplearon 7 entidades.









No.	Nombre	Gráfico	Velocidad desplazamiento	Descripción
1	Cafe		0	Café que es producido en la trilladora
2	CafeBuenaventura		0	Café que se carga en trilladora al tractocamión con dirección a Buenaventura
3	CafeCartagena		0	Café que se carga en trilladora al tractocamión con dirección a Cartagena
4	CafeSantamarta		0	Café que se carga en trilladora al tractocamión con dirección a Santa Marta
5	CafeDorada		0	Café que se carga en trilladora al tractocamión con dirección a Dorada
6	CafeBarranca		0	Café que se carga en trilladora al tractocamión con dirección a Barranca
7	ContenedorN1		0	Contenedores en los que se realiza la exportación y salen de los puertos marítimos en origen

Tabla 34: Entidades creadas en ProModel

7.1.3 RECURSOS

En la tabla 35 se muestran los recursos que fueron creados para la red de transporte donde se relaciona el nombre, el gráfico, la velocidad, la cantidad y su respectiva descripción. Para cada uno de los modelos se emplearon 6 recursos.

No.	Nombre	Gráfico	Velocidad mpm	Cantidad	Descripción
1	Tractocamión		833,33	80	Vehículos encargados de llevar los sacos desde la trilladora hasta los puertos






					multimodales o marítimos en origen
2	Tren		416,66	8	Vehículos encargados de llevar los sacos desde Dorada hasta el puerto de Santa Marta
3	Barcaza		233,33	10	Vehículos encargados de llevar los sacos desde Barranca hasta Cartagena
4	BuqueBuenaventura		583,33	200	Vehículos encargados de llevar los contenedores con sacos desde el puerto de Buenaventura hasta el puerto de destino
5	BuqueCartagena			200	Vehículos encargados de llevar los contenedores con sacos desde el puerto de Cartagena hasta el puerto de destino
6	BuqueSantamarta			200	Vehículos encargados de llevar los contenedores con sacos desde el puerto de Santa Marta hasta el puerto de destino

Tabla 35: Recursos creados en ProModel

7.1.4 ARRIBOS

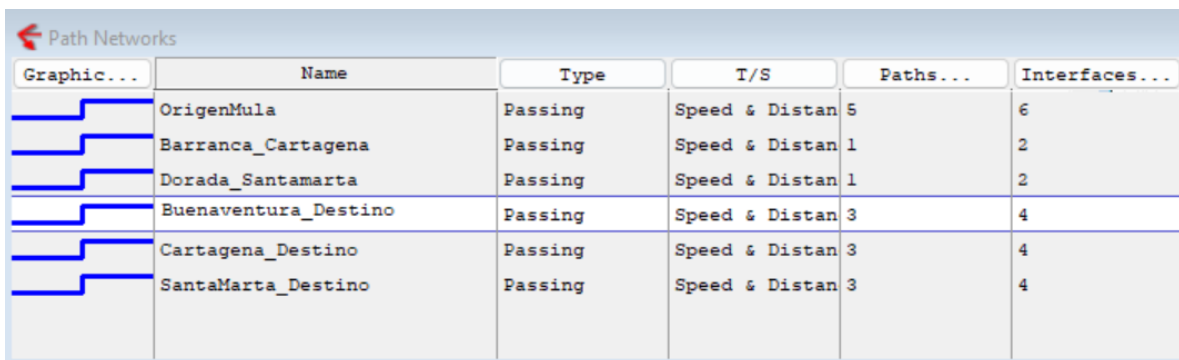
En la tabla 36 se muestran los arribos de las entidades a las locaciones que fueron creados para la red de transporte donde se relaciona qué entidad arriba, a qué locación llega, la cantidad, el momento en el que empieza a llegar, las veces que llega durante el periodo de simulación y la frecuencia con la que llega. En total se emplearon tres operaciones de arribo, una para cada origen o modelo.

¿Qué?	¿Dónde?	Cantidad	Primera vez	Ocurrencia	Frecuencia
Cafe	Trilladora_Neiva	1800	0	360	24
Cafe	Trilladora_Ibague	1100	0	360	24
Cafe	Trilladora_Manizales	1650	0	360	24

Tabla 36: Arribos creados en Promodel

7.1.5 REDES DE TRABAJO

En la ilustración 17 se muestran las redes de trabajo que fueron donde se relacionan las conexiones entre todos los nodos de donde salen entidades. Para cada uno de los modelos se emplearon 6 redes donde en la primera red donde se encuentra el nodo de origen que es la trilladora se generan 5 arcos que conectan 6 nodos, en la segunda red que parte del nodo de Barranca se genera un arcos que conecta 2 nodos, en la tercera red que empieza en el nodo de Dorada se genera un arcos que conecta 2 nodos, en la cuarta red que inicia en Buenaventura se generan 3 arcos que conectan 4 nodos, en la quinta red que sale desde Cartagena se generan 3 arcos que unen 4 nodos y, finalmente, en la sexta red que parte desde el nodo de Santa Marta se generan 3 arcos que unen 4 nodos.



Graphic...	Name	Type	T/S	Paths...	Interfaces...
	OrigenMula	Passing	Speed & Distan	5	6
	Barranca_Cartagena	Passing	Speed & Distan	1	2
	Dorada_Santamarta	Passing	Speed & Distan	1	2
	Buenaventura_Destino	Passing	Speed & Distan	3	4
	Cartagena_Destino	Passing	Speed & Distan	3	4
	SantaMarta_Destino	Passing	Speed & Distan	3	4

Ilustración 17: Redes de trabajo

De esta manera, en la primera red o nodo de origen están las conexiones de la trilladora con Buenaventura, Cartagena, Santa Marta, Dorada y Barranca como se puede ver en la Ilustración 18.

From	To	BI	Distance
N1	N2	Bi	vMt_Trilla_Buenaventura
N1	N3	Bi	vMt_Trilla_Cartagena
N1	N4	Bi	vMt_Trilla_Santamarta
N1	N5	Bi	vMt_Trilla_Dorada
N1	N6	Bi	vMt_Trilla_Barranca

Ilustración 18: Red de trabajo 1

En la segunda red o nodo multimodal está la conexión de Barranca con Cartagena como se puede ver en la Ilustración 19.

From	To	BI	Distance
N1	N2	Bi	670000

Ilustración 19: Red de trabajo 2

En la tercera red o nodo multimodal está la conexión de Dorada con Santa Marta como se puede ver en la Ilustración 20.

From	To	BI	Distance
N1	N2	Bi	787000

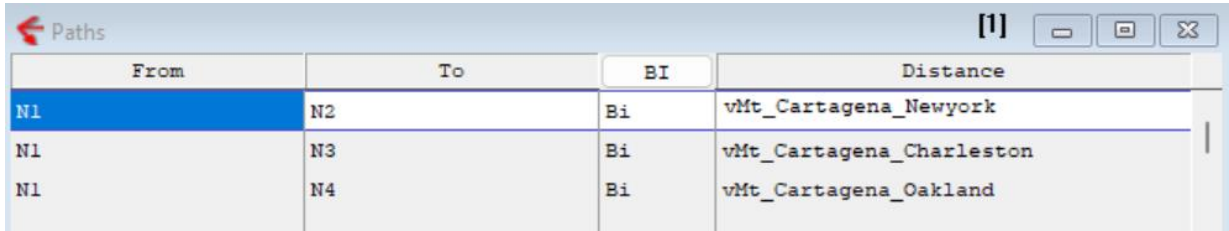
Ilustración 20: Red de trabajo 3

En la cuarta red o nodo marítimo en origen están las conexiones de Buenaventura con los puertos marítimos en destino de New York, Charleston y Oakland como se puede ver en la Ilustración 21.

From	To	BI	Distance
N1	N2	Bi	vMt_Buenaventura_Newyork
N1	N3	Bi	vMt_Buenaventura_Charleston
N1	N4	Bi	vMt_Buenaventura_Oakland

Ilustración 21: Red de trabajo 4

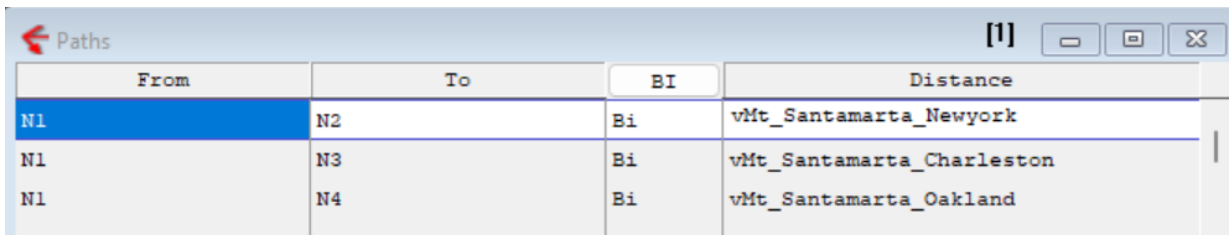
En la quinta red o nodo marítimo en origen están las conexiones de Cartagena con los puertos marítimos en destino de New York, Charleston y Oakland como se puede ver en la Ilustración 22.



From	To	BI	Distance
N1	N2	Bi	vMt_Cartagena_Newyork
N1	N3	Bi	vMt_Cartagena_Charleston
N1	N4	Bi	vMt_Cartagena_Oakland

Ilustración 22: Red de trabajo 5

En la sexta red o nodo marítimo en origen están las conexiones de Santa Marta con los puertos marítimos en destino de New York, Charleston y Oakland como se puede ver en la Ilustración 23.



From	To	BI	Distance
N1	N2	Bi	vMt_Santamarta_Newyork
N1	N3	Bi	vMt_Santamarta_Charleston
N1	N4	Bi	vMt_Santamarta_Oakland

Ilustración 23: Red de trabajo 6

7.1.6 ATRIBUTOS

En la tabla 37 se muestran los atributos que fueron creados para la red de transporte donde se relaciona el nombre, el tipo y su respectiva descripción. Para cada uno de los modelos se emplearon 5 atributos.

No.	Nombre	Tipo	Descripción
1	A_Tiempo_Salida_Trilla	Real	Momento de entrada de la entidad café al sistema
2	A_Tiempo_puerto_a_puerto1	Entero	Momento en el que la entidad es descargada en el puerto marítimo de origen
4	A_Tiempo_Puerto_Espera1	Entero	Momento que define el periodo de espera del tractocamión para entrar a puerto
5	A_Tiempo_Puerto_Espera2	Entero	Calcula el costo de acuerdo a la espera del tractocamión

Tabla 37: Atributos creados en ProModel

7.1.7 VARIABLES:

En esta categoría se incluyeron las variables asociadas a la información que se desea obtener a partir de los modelos de simulación como se relaciona en la tabla 38, pero dadas las restricciones del software en la versión estudiantil para la creación de locaciones y atributos, se incluyeron unos parámetros o constantes que no cambian dentro de este ítem discriminados en la tabla 39.

En la tabla 38 se muestran las variables que fueron creadas para la red de transporte donde se relaciona el nombre, el tipo y su respectiva descripción. Para cada uno de los modelos se emplearon 41 variables.

No.	Nombre	Tipo	Descripción
1	vMulas_Buenaventura	Real	Cantidad de tractocamiones que salen de trilladora hacia Buenaventura
2	vMulas_Cartagena	Real	Cantidad de tractocamiones que salen de trilladora hacia Cartagena
3	vMulas_Santamarta	Real	Cantidad de tractocamiones que salen de trilladora hacia Santa Marta
4	vMulas_Dorada	Real	Cantidad de tractocamiones que salen de trilladora hacia Dorada
5	vMulas_Barranca	Real	Cantidad de tractocamiones que salen de trilladora hacia Barranca
6	vTiempo_Cafe_M_Buenaventura	Real	Horas transcurridas desde el cargue del tractocamión en trilladora hasta el descargue en Buenaventura
7	vTiempo_Cafe_M_Cartagena	Real	Horas transcurridas desde el cargue del tractocamión en trilladora hasta el descargue en Cartagena
8	vTiempo_Cafe_M_Santamarta	Real	Horas transcurridas desde el cargue del tractocamión en trilladora hasta el descargue en Santa Marta
9	vTiempo_Cafe_M_Dorada	Real	Horas transcurridas desde el cargue del tractocamión en trilladora hasta el descargue en Dorada

10	vTiempo_Cafe_M_Barranca	Real	Horas transcurridas desde el cargue del tractocamión en trilladora hasta el descargue en Barranca
11	VTiempo_Cafe_Barranca_Cartagena	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en Barranca y en la barcaza hasta el descargue en Cartagena
12	VTiempo_Cafe_Dorada_Santamarta	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en Dorada y en el tren hasta el descargue en Santa Marta
13	v_Tiempo_cafe_Buenaventura_Newyork	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Buenaventura y en el buque hasta New York
14	v_Tiempo_cafe_Buenaventura_Charleston	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Buenaventura y en el buque hasta Charleston
15	v_Tiempo_cafe_Buenaventura_Oakland	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Buenaventura y en el buque hasta Oakland
16	v_Tiempo_cafe_Cartagena_Newyork	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Cartagena y en el buque hasta New York
17	v_Tiempo_cafe_Cartagena_Charleston	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Cartagena y en el buque hasta Charleston
18	v_Tiempo_cafe_Cartagena_Oakland	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Cartagena y en el buque hasta Oakland
19	v_Tiempo_cafe_Santamarta_Newyork	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Santa Marta y en el buque hasta New York
20	v_Tiempo_cafe_Santamarta_Charleston	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Santa Marta y en el buque hasta Charleston

21	v_Tiempo_cafe_Santamarta_Oakland	Real	Horas transcurridas en almacenamiento en puerto de Santa Marta y en el buque hasta Oakland
22	v_Sacos_Tri_Santamarta_a_destino	Real	Cantidad de sacos que llegan a Santa Marta en tractocamión
23	v_Sacos_Tri_Dorada_Santamarta_destino	Real	Cantidad de sacos que llegan a Santa Marta a través de Dorada
24	v_Sacos_Tri_Cartagena_a_destino	Real	Cantidad de sacos que llegan a Cartagena en tractocamión
25	v_Sacos_Tri_Barranca_Cartagena_destino	Real	Cantidad de sacos que llegan a Cartagena a través de Barranca
26	v_Sacos_Tri_a_Buenaventura	Real	Cantidad de sacos que llegan a Buenaventura en tractocamión
27	v_Costo_Sacos_M_Buenaventura	Real	Costo por saco desde el cargue en tractocamión en trilladora hasta el descargue en Buenaventura
28	v_Costo_Sacos_M_Cartagena	Real	Costo por saco desde el cargue en tractocamión en trilladora hasta el descargue en Cartagena
29	v_Costo_Sacos_M_Santamarta	Real	Costo por saco desde el cargue en tractocamión en trilladora hasta el descargue en Santa Marta
30	v_Costo_Sacos_M_Dorada_Santamarta	Real	Costo por saco desde el cargue en tractocamión en trilladora hasta el descargue en Santa Marta a través de Dorada
31	v_Costo_Sacos_M_Barranca_Cartagena	Real	Costo por saco desde el cargue en tractocamión en trilladora hasta el descargue en Santa Marta a través de Barranca
32	v_Tiempo_Variable_Naviera	Real	Horas que varía el tránsito marítimo

33	v_Costo_Saco_Buenaventura_Ne wyork	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Buenaventura hasta llegada a New York
34	v_Costo_Saco_Buenaventura_Ch arleston	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Buenaventura hasta llegada a Charleston
35	v_Costo_Saco_Buenaventura_Oa kland	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Buenaventura hasta llegada a Oakland
36	v_Costo_Saco_Cartagena_Newyo rk	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Cartagena hasta llegada a New York
37	v_Costo_Saco_Cartagena_Charle ston	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Cartagena hasta llegada a Charleston
38	v_Costo_Saco_Cartagena_Oaklan d	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Cartagena hasta llegada a Oakland
39	v_Costo_Saco_Santamarta_Newy ork	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Santa Marta hasta llegada a New York
40	v_Costo_Saco_Santamarta_Charl eston	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Santa Marta hasta llegada a Charleston
41	v_Costo_Saco_Santamarta_Oakla nd	Real	Costo por saco desde el almacenamiento y servicios en puerto Santa Marta hasta llegada a Oakland

Tabla 38: Variables creadas en ProModel

Adicionalmente, como se mencionó anteriormente, fueron incluidas unas constantes por las limitaciones en creación de entidades y locaciones. Sin embargo, no afecta el modelo porque se le definieron valores iniciales fijos que no cambian y hacen parte de las fórmulas en el procesamiento.

En la tabla 39 se muestran las constantes o parámetros que fueron creados en la categoría de variables donde se relaciona el nombre, el tipo y su respectiva descripción. Para cada uno de los modelos se emplearon 47 y se registraron principalmente las distancias y los costos de la red.

No.	Nombre	Tipo	Descripción
1	vMt_Trilla_Buenaventura	Real	Constante distancia en metros de trilladora a Buenaventura
2	vMt_Trilla_Cartagena	Real	Constante distancia en metros de trilladora a Cartagena
3	vMt_Trilla_Santamarta	Real	Constante distancia en metros de trilladora a Santa Marta
4	vMt_Trilla_Dorada	Real	Constante distancia en metros de trilladora a Dorada
5	vMt_Trilla_Barranca	Real	Constante distancia en metros de trilladora a Barranca
6	vMt_Buenaventura_Newyork	Real	Constante distancia en metros de Buenaventura a New York
7	vMt_Buenaventura_Charleston	Real	Constante distancia en metros de Buenaventura a Charleston
8	vMt_Buenaventura_Oakland	Real	Constante distancia en metros de Buenaventura a Oakland
9	vMt_Cartagena_Newyork	Real	Constante distancia en metros de Cartagena a New York
10	vMt_Cartagena_Charleston	Real	Constante distancia en metros de Cartagena a Charleston
11	vMt_Cartagena_Oakland	Real	Constante distancia en metros de Cartagena a Oakland
12	vMt_Santamarta_Newyork	Real	Constante distancia en metros de Santa Marta a New York
13	vMt_Santamarta_Charleston	Real	Constante distancia en metros de Santa Marta a Charleston

14	vMt_Santamarta_Oakland	Real	Constante distancia en metros de Santa Marta a Oakland
15	v_Cargue_saco_trilla	Real	Constante costo de cargue por saco
16	v_Flete_saco_Trilla_m_Buenaventura	Real	Constante flete terrestre tractocamión de trilladora a Buenaventura
17	v_Flete_saco_Trilla_m_Cartagena	Real	Constante flete terrestre tractocamión de trilladora a Cartagena
18	v_Flete_saco_Trilla_m_Santamarta	Real	Constante flete terrestre tractocamión de trilladora a Santa Marta
19	v_Flete_saco_Trilla_m_Dorada	Real	Constante flete terrestre tractocamión de trilladora a Dorada
20	v_Flete_saco_Trilla_m_Barranca	Real	Constante flete terrestre tractocamión de trilladora a Barranca
21	v_Transporte_saco_Dorada_Santamarta	Real	Constante flete tren de Dorada a Santa Marta
22	v_Transporte_saco_Barranca_Cartagena	Real	Constante flete barcaza de Barranca a Cartagena
23	v_Costo_cargadescargue_Saco_Buenaventura	Real	Constante costo descargue saco Buenaventura
24	v_Costo_cargadescargue_Saco_Cartagena	Real	Constante costo descargue saco Cartagena
25	v_Costo_cargadescargue_Saco_Santamarta	Real	Constante costo descargue saco Santa Marta
26	v_Costo_cargadescargue_Saco_Barranca	Real	Constante costo descargue saco Barranca
27	v_Costo_Almacenamiento_Buenaventura_hora	Real	Constante costo almacenamiento saco por hora en Buenaventura
28	v_Costo_Almacenamiento_Cartagena_hora	Real	Constante costo almacenamiento saco por hora en Cartagena
29	v_Costo_Almacenamiento_Santamarta_hora	Real	Constante costo almacenamiento saco por hora en Santa Marta
30	v_Costo_Almacenamiento_Dorada_hora	Real	Constante costo almacenamiento saco por hora en Dorada

31	v_Costo_Almacenamiento_Barranca_hora	Real	Constante costo almacenamiento saco por hora en Barranca
32	v_Costo_T_espera_por_saco_P_Buenaventura	Real	Constante costo tiempo de espera por saco en Buenaventura
33	v_Costo_T_espera_por_saco_P_Cartagena	Real	Constante costo tiempo de espera por saco en Cartagena
34	v_Costo_T_espera_por_saco_P_Santamarta	Real	Constante costo tiempo de espera por saco en Santa Marta
35	v_Costo_uso_por_saco_Buenaventura	Real	Constante costo uso de puerto Buenaventura por saco
36	v_Costo_uso_por_saco_Cartagena	Real	Constante costo uso de puerto Cartagena por saco
37	v_Costo_uso_por_saco_Santamarta	Real	Constante costo uso de puerto Santa Marta por saco
38	v_Costo_servicios_de_aduanas	Real	Constante costo servicio de aduanas en puertos por saco
39	v_Costo_flete_seguro_Buenaventura_Newyork	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Buenaventura a New York
40	v_Costo_flete_seguro_Buenaventura_Charleston	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Buenaventura a Charleston
41	v_Costo_flete_seguro_Buenaventura_Oakland	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Buenaventura a Oakland
42	v_Costo_flete_seguro_Cartagena_Newyork	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Cartagena a New York
43	v_Costo_flete_seguro_Cartagena_Charleston	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Cartagena a Charleston
44	v_Costo_flete_seguro_Cartagena_Oakland	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Cartagena a Oakland
45	v_Costo_flete_seguro_Santamarta_Newyork	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Santa Marta a New York

46	v_Costo_flete_seguro_ Santamarta_Charleston	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Santa Marta a Charleston
47	v_Costo_flete_seguro_ Santamarta_Oakland	Real	Constante costo del flete + seguro por saco desde Santa Marta a Oakland

Tabla 39: Constantes o parámetros creados en la categoría de variables

7.1.8 CONSTRUCTOS DE MODELAMIENTO:

Para el modelamiento y procesamiento del sistema, se emplearon las siguientes funciones:

Inc: Incrementa el contador de una variable.

Clock: Captura el momento temporal en que un ingresa una entidad a una locación.

Wait <tiempo>: Detiene el flujo de una entidad en una locación hasta que se cumpla el tiempo indicado.

Accum <cantidad>: Retrasa el proceso de las entidades hasta que cierta cantidad del mismo tipo se haya acumulado en un lugar del modelo.

Group <cantidad>: Realiza una unión temporal de entidades de un mismo tipo y permanecen en ese estado hasta encontrar la instrucción Ungroup.

Ungroup: Separa las entidades agrupadas previamente con la instrucción Group.

Combine <cantidad>: Realiza una unión definitiva de entidades de un mismo tipo.

Move with <recurso> for <tiempo> then free: Indica el recurso con el que se debe mover una entidad a una locación por un tiempo determinado y finalmente da la instrucción de liberar el recurso.

If <condición>then <acción1> else <acción2>: Ordena ejecutar la acción 1 si la condición indicada es verdadera y la acción 2 si es falsa.

7.1.9 LIBRERÍA GRÁFICA:

Para la representación de las locaciones y las entidades del modelo, el demo utiliza una librería gráfica predeterminada por ProModel llamada PROMODEL.GLB. A esta librería se

7.1.11 RELOJ DE SIMULACIÓN Y RÉPLICAS

El reloj de simulación que nos indica el tiempo que va a estar operando la red de transporte desde la producción en trilladora hasta las entregas en el puerto de destino, fue configurado para modelar 1 año, dado que, los periodos cafeteros llevan este ciclo, empezando en octubre y terminando en septiembre.

Adicionalmente se establecen 10 corridas por cada simulación para trabajar con unos datos promedio que sean más confiables teniendo en cuenta que cada que se ejecuta el modelo los resultados cambian por la variabilidad en los tiempos y costos asociados a estos tiempos.

7.2 MODELOS DE SIMULACIÓN

La red general fue segmentada en tres subredes, una por cada nodo de origen dadas las restricciones en herramienta de modelación y teniendo en cuenta que dichos nodos no interactúan entre sí, por lo que ni sus componentes ni la red de transporte general se ve afectada, asegurando que las salidas del modelo generen una interpretación cercana a la realidad.

Así también, todos los nodos de origen pasan por los 2 nodos multimodales, los 3 nodos marítimos en origen y llegan a los 3 nodos marítimos en destino por lo que se seguirá conservando su evaluación de costos y tiempos por todas las rutas posibles que se pueden generar.

Adicionalmente por cada subred generada se plantean dos escenarios donde cada uno de ellos corresponde a una naviera para de esta manera incluir la opción la selección del transportista en el último eslabón de la red. Los escenarios número 1 fueron asignados a las exportaciones realizadas con Hamburg Sud y los escenarios número 2 fueron asignados a la naviera Hapag Lloyd.

7.2.1 SUBRED 1 / ESCENARIO 1: ORIGEN NEIVA CON HAMBURG SUD

La primera subred corresponde al origen Neiva como se puede ver en la Ilustración 25. En este escenario el nodo de origen cuenta con las dos conexiones con los nodos multimodales, las tres conexiones con los nodos marítimos en origen y para llevar los

contenedores desde los tres puertos de origen hacia los tres puertos de destino se emplea la naviera Hamburg Sud.

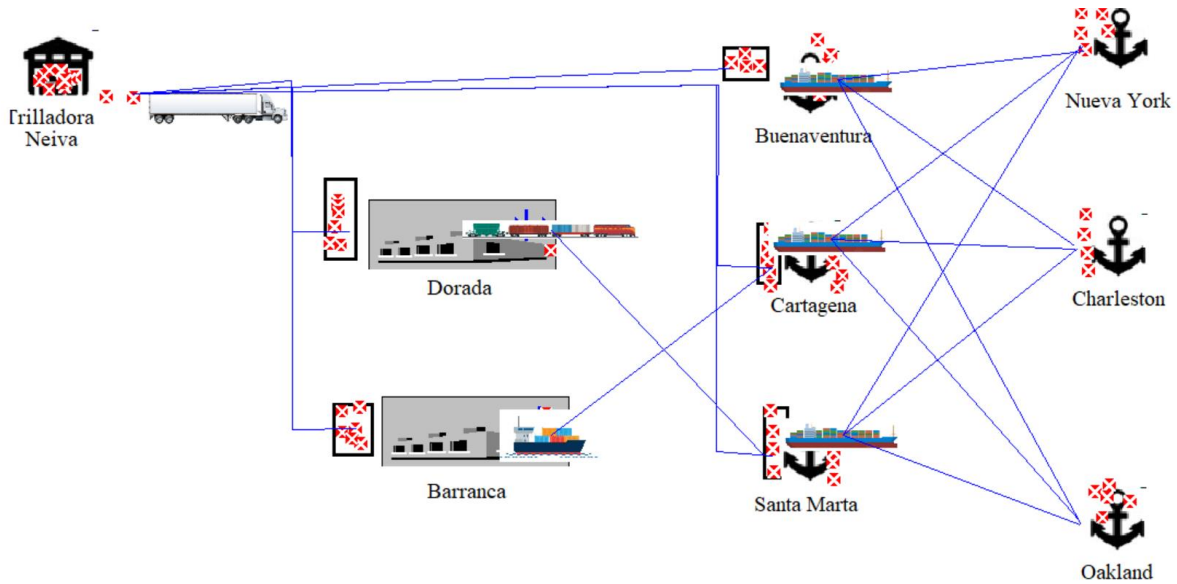


Ilustración 25: Subred 1 / Escenario 1

7.2.2 SUBRED 1 / ESCENARIO 2: ORIGEN NEIVA CON HAPAG LLOYD

La segunda subred corresponde al origen Neiva como se puede ver en la Ilustración 26. En este escenario el nodo de origen cuenta con las dos conexiones con los nodos multimodales, las tres conexiones con los nodos marítimos en origen y para llevar los contenedores desde los tres puertos de origen hacia los tres puertos de destino se emplea la naviera Hapag Lloyd.

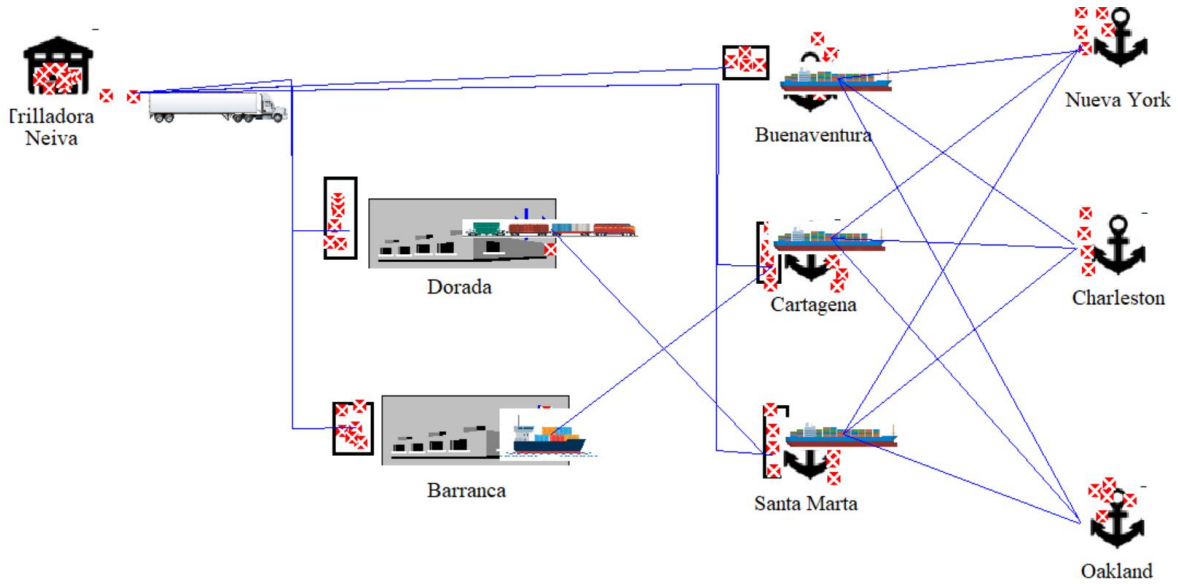


Ilustración 26: Subred 1 / Escenario 2

7.2.3 SUBRED 2 / ESCENARIO 1: ORIGEN IBAGUÉ CON HAMBURG SUD

La tercera subred corresponde al origen Ibagué como se puede ver en la Ilustración 27. En este escenario el nodo de origen cuenta con las dos conexiones con los nodos multimodales, las tres conexiones con los nodos marítimos en origen y para llevar los contenedores desde los tres puertos de origen hacia los tres puertos de destino se emplea la naviera Hamburg Sud.

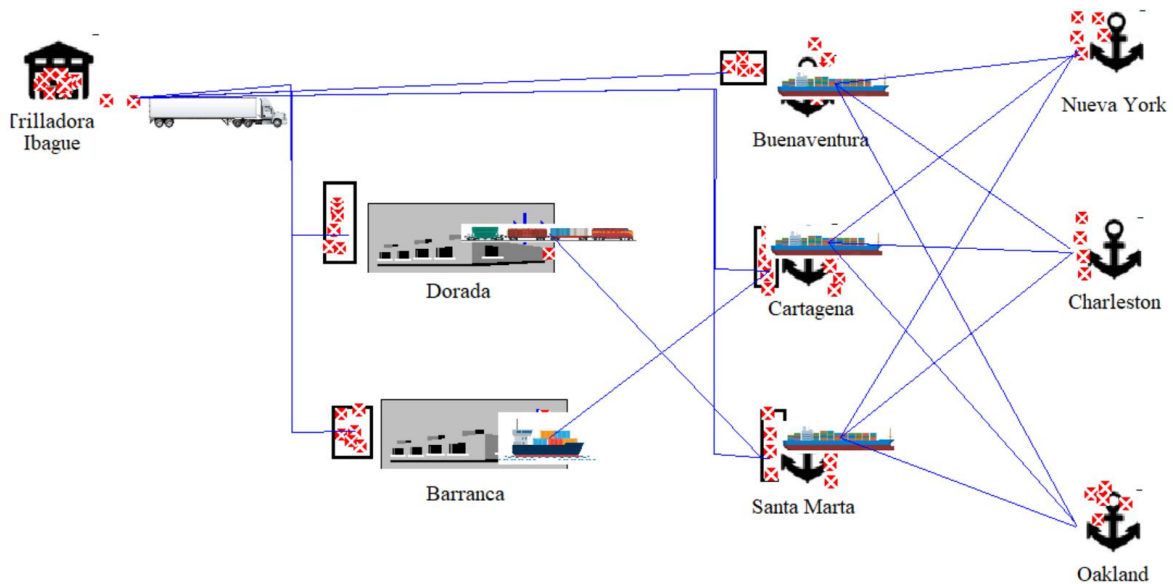


Ilustración 27: Subred 2 / Escenario 1

7.2.4 SUBRED 2 / ESCENARIO 2: ORIGEN IBAGUÉ CON HAPAG LLOYD

La cuarta subred corresponde al origen Ibagué como se puede ver en la Ilustración 28. En este escenario el nodo de origen cuenta con las dos conexiones con los nodos multimodales, las tres conexiones con los nodos marítimos en origen y para llevar los contenedores desde los tres puertos de origen hacia los tres puertos de destino se emplea la naviera Hapag Lloyd.

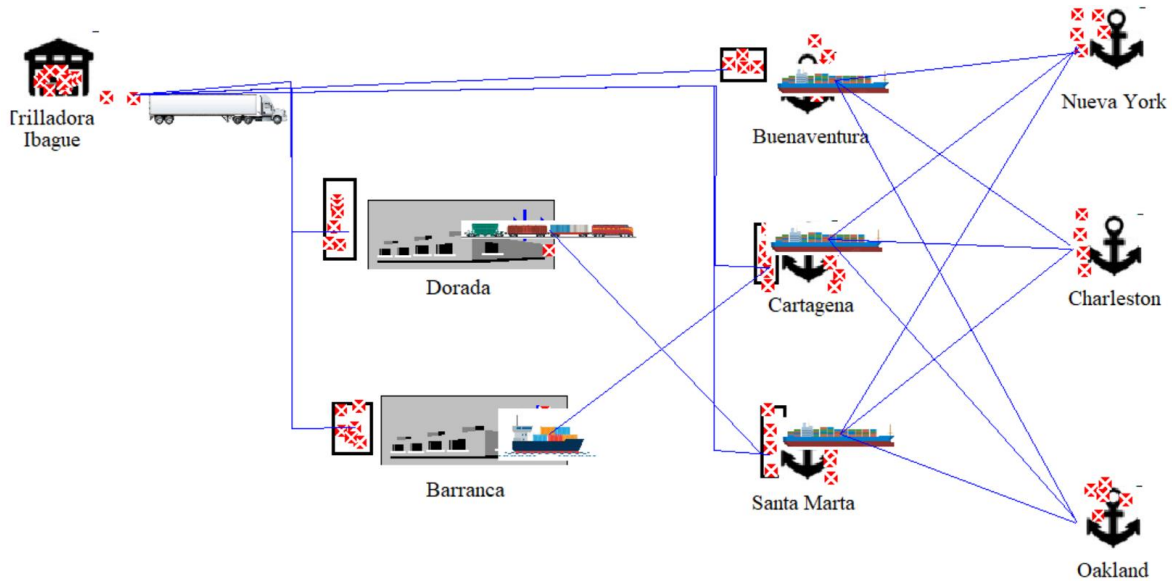


Ilustración 28: Subred 2 / Escenario 2

7.2.5 SUBRED 3 / ESCENARIO 1: ORIGEN MANIZALES CON HAMBURG SUD

La quinta subred corresponde al origen Manizales como se puede ver en la Ilustración 29. En este escenario el nodo de origen cuenta con las dos conexiones con los nodos multimodales, las tres conexiones con los nodos marítimos en origen y para llevar los contenedores desde los tres puertos de origen hacia los tres puertos de destino se emplea la naviera Hamburg Sud.

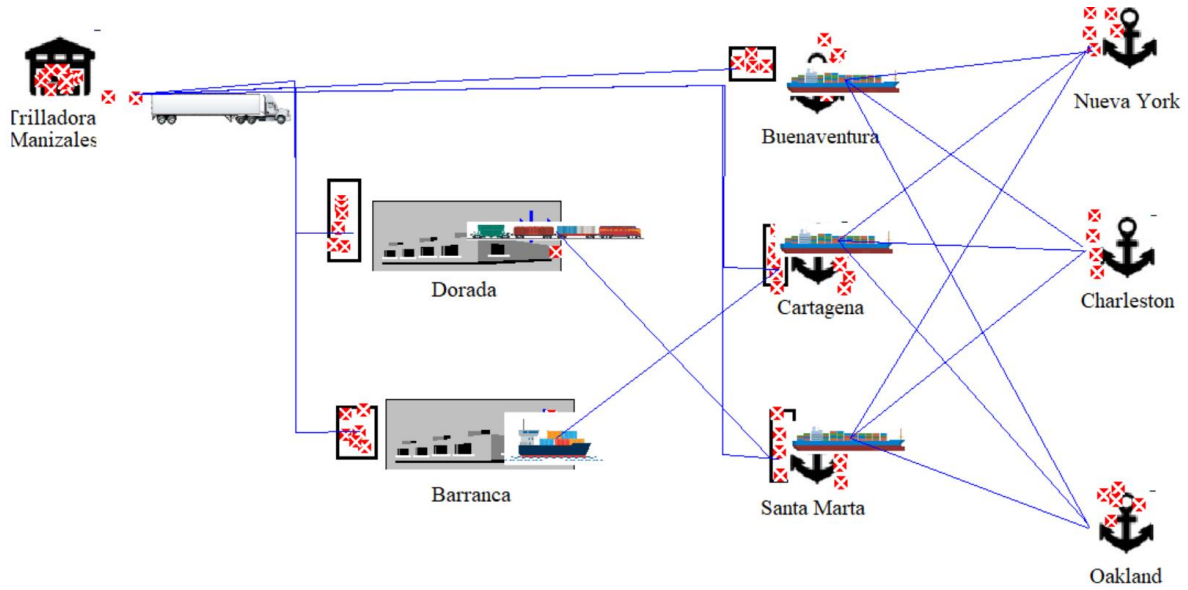


Ilustración 29: Subred 3 / Escenario 1

7.2.6 SUBRED 3 / ESCENARIO 2: ORIGEN MANIZALES CON HAPAG LLOYD

La sexta subred corresponde al origen Manizales como se puede ver en la Ilustración 30. En este escenario el nodo de origen cuenta con las dos conexiones con los nodos multimodales, las tres conexiones con los nodos marítimos en origen y para llevar los contenedores desde los tres puertos de origen hacia los tres puertos de destino se emplea la naviera Hapag Lloyd.

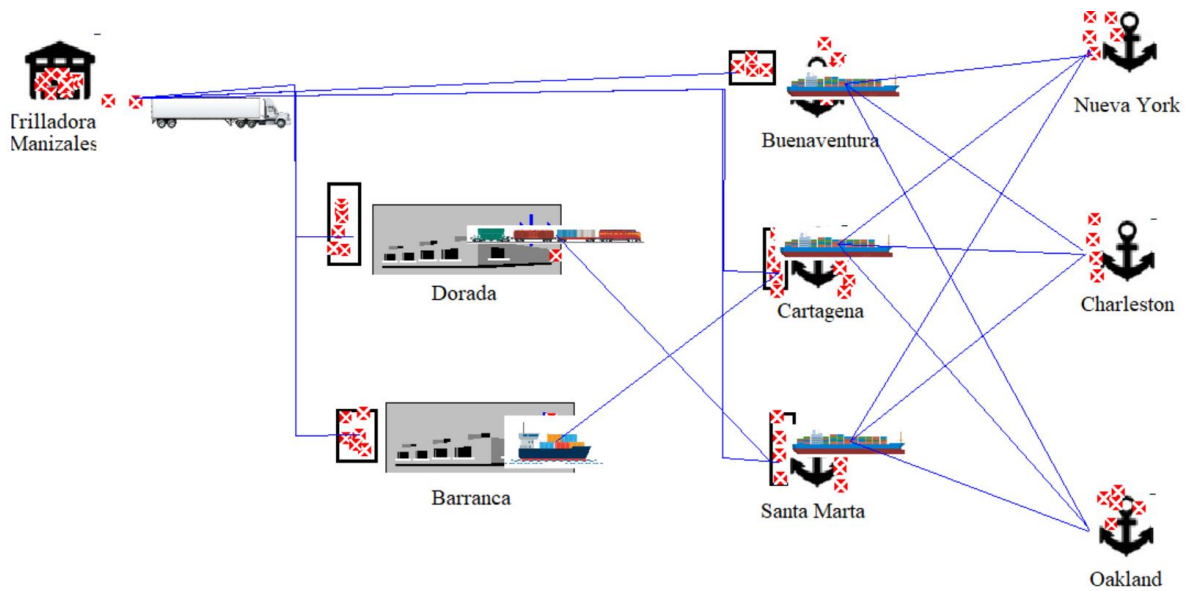


Ilustración 30: Subred 3 / Escenario 2

7.3 CONCLUSIONES

Se identificaron y definieron los elementos necesarios para construir el modelo de simulación de la red de transporte multimodal incluyendo los gráficos, los nombres que les fueron asignados, sus características principales y la descripción de lo que representan dentro del modelo.

Se realizó la construcción de los modelos de simulación en el software ProModel y la red fue segmentada en tres subredes teniendo en cuenta que no se alteraba el funcionamiento e interacción de los elementos del modelo, y considerando las restricciones de la herramienta en su versión estudiantil.

Finalmente, como se tenían dos proveedores de transporte marítimo importantes en la exportación de café desde Colombia que son las navieras Hamburg Sud y Hapag Lloyd, se plantearon dos escenarios para cada subred de tal modo que se pudieran realizar los modelos con dos navieras e incluir la selección del transportista considerando que ambas cuentan con costos y tiempos de tránsito distintos para cada destino.

CAPITULO 8

VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo 8 se presentarán los resultados finales obtenidos a partir de los seis modelos simulados en Promodel.

La primera parte estará enfocada en los resultados generales que incluyen la red completa en términos de costos y tiempos, considerando los tres nodos de inicio que son las trilladoras en Neiva, Ibagué y Manizales, así como los tres nodos finales que son los puertos de New York, Charleston y Oakland con todas sus posibles combinaciones.

De esta manera, se realizará un análisis de los óptimos encontrados en las variables costo y tiempo totales de manera independiente, para posteriormente consolidarlos y así, buscar los óptimos que sean posibles considerando ambas variables o presentar las opciones finales entre las que se debería tomar una decisión en un momento dado pero que llevan a sacrificar una de las dos variables ya sea el costo o el tiempo. También se hará un análisis adicional enfocado en ver los resultados de forma general, para revisar el comportamiento de los nodos multimodales que no son usados con frecuencia en Colombia y que otras tendencias son notorias.

En la segunda parte se presentará los resultados obtenidos de fracciones de la red como el costo y tiempo asociado al transporte desde las trilladoras hasta los puertos de origen para ver el desempeño en Colombia de forma separada, así como el costo y tiempo asociado al transporte marítimo desde cada uno de los puertos de origen hasta los puertos de destino para ver el desempeño de las navieras de forma aislada.

8.1 RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS

Considerando los tres nodos de origen Neiva, Ibagué y Manizales, los dos nodos multimodales Dorada y Barranca, los tres nodos marítimos en origen Buenaventura, Cartagena y Santa Marta, los tres nodos marítimos en destino New York, Charleston y Oakland y las dos opciones de navieras disponibles Hamburg Sud y Hapag Lloyd, los resultados finales obtenidos incluyen 90 rutas posibles por lo que se obtienen 90 costos y 90 tiempos asociados a cada una de las posibilidades.

En la tabla 40 se relacionan los resultados de costo por saco para cada combinación de origen – destino.

RESULTADOS RED COMPLETA - VARIABLE COSTO (POR SACO)	Neiva - Naviera 1	Neiva - Naviera 2	Ibague - Naviera 1	Ibague - Naviera 2	Manizales - Naviera 1	Manizales - Naviera 2
TRILLADORA - BUENAVENTURA - NEW YORK	104.611,03	93.107,75	97.711,24	91.025,83	99.876,85	94.135,81
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	71.119,57	65.615,39	68.785,88	63.457,92	67.993,05	62.569,81
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - NEW YORK	71.212,94	65.964,72	64.409,69	59.157,80	69.491,28	64.292,41
TRILLADORA - SANTA MARTA - NEW YORK	76.667,16	71.647,22	73.792,17	69.259,88	74.949,56	70.059,90
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - NEW YORK	78.622,79	73.614,65	75.754,80	70.883,91	76.936,77	71.758,86
TRILLADORA - BUENAVENTURA - CHARLESTON	101.813,75	91.860,81	98.360,08	88.840,31	99.412,08	88.921,93
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	71.119,57	65.451,87	68.901,80	63.177,47	68.224,71	62.381,62
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - CHARLESTON	71.212,94	65.801,20	64.525,61	58.877,34	69.722,94	64.104,22
TRILLADORA - SANTA MARTA - CHARLESTON	75.666,73	70.534,98	73.534,91	67.693,33	73.763,91	68.885,50
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - CHARLESTON	77.622,36	72.502,40	75.497,55	69.317,36	75.751,12	70.584,47
TRILLADORA - BUENAVENTURA - OAKLAND	95.423,65	86.827,94	92.311,68	83.406,68	90.799,70	85.414,13
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	71.652,94	62.469,97	68.530,54	60.264,89	68.563,97	59.457,80
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - OAKLAND	71.746,30	62.819,29	64.154,35	55.964,77	70.062,20	61.180,40
TRILLADORA - SANTA MARTA - OAKLAND	76.308,38	70.082,13	73.480,90	66.945,16	74.798,58	68.140,41
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - OAKLAND	78.264,01	72.049,56	75.443,54	68.569,19	76.785,78	69.839,37

Tabla 40: Resultados de costos por saco en la red completa

En la tabla 41 se relacionan los resultados de tiempo en días para cada combinación de origen – destino.

RESULTADOS RED COMPLETA - VARIABLE TIEMPO (DÍAS)	Neiva - Naviera 1	Neiva - Naviera 2	Ibague - Naviera 1	Ibague - Naviera 2	Manizales - Naviera 1	Manizales - Naviera 2
TRILLADORA - BUENAVENTURA - NEW YORK	24,1	25,8	23,4	25,5	23,8	25,8
TRILLADORA - SANTA MARTA - NEW YORK	30,8	29,6	24,8	23,9	30,0	28,7
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - NEW YORK	35,9	34,8	29,6	28,9	34,9	33,8
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	22,6	21,1	19,3	17,5	21,4	20,1
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - NEW YORK	28,2	27,0	24,5	23,1	27,1	26,1
TRILLADORA - BUENAVENTURA - CHARLESTON	25,0	30,7	24,6	30,5	24,8	30,5
TRILLADORA - SANTA MARTA - CHARLESTON	33,1	33,0	28,2	27,9	32,3	32,2
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - CHARLESTON	38,2	38,2	33,0	32,9	37,2	37,4
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	20,3	26,1	17,2	22,2	19,6	24,6
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - CHARLESTON	26,0	31,9	22,4	27,8	25,3	30,6
TRILLADORA - BUENAVENTURA - OAKLAND	26,9	38,7	26,6	38,3	26,7	38,7
TRILLADORA - SANTA MARTA - OAKLAND	41,0	41,7	35,9	36,4	40,5	41,0
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - OAKLAND	46,1	46,9	40,7	41,5	45,4	46,2
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	38,0	26,8	34,8	22,8	37,3	25,7
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - OAKLAND	43,6	32,6	40,0	28,5	43,0	31,6

Tabla 41: Resultados de tiempos en días en la red completa

8.1.1 ANÁLISIS: MENORES COSTOS Y TIEMPOS

Este análisis se realizará en tres fases. La primera se enfocará en los menores costos obtenidos para cada ruta, la segunda presentará los menores tiempos y la tercera

consolidará ambos resultados y presentará los óptimos en los casos en los que sea posible o las alternativas en caso de que no exista un óptimo.

8.1.1.1 MENOR COSTO

Los menores costos obtenidos en la red de transporte multimodal se relacionan en la tabla 42.

RESULTADOS RED COMPLETA - VARIABLE COSTO (POR SACO)	Neiva - Naviera 2	Ibague - Naviera 2	Manizales - Naviera 2
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	65.615,39	-	62.569,81
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - NEW YORK	-	59.157,80	-
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	65.451,87	-	62.381,62
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - CHARLESTON	-	58.877,34	-
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	62.469,97	-	59.457,80
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - OAKLAND	-	55.964,77	-

Tabla 42: Resultados menores costos por ruta en la red completa

Las rutas a las que corresponden los menores costos, todas involucran a Cartagena ya sea llegando a dicho puerto directamente o a través del puerto multimodal de Barranca. Adicionalmente, para todos los casos las rutas que presentaron los menores costos involucraban la naviera Hapag Lloyd.

Para el origen Neiva y las posibles rutas a cada uno de los destinos New York, Charleston y Oakland los menores costos fueron de \$65.615, \$65.452 y \$62.470 por saco para cada destino respectivamente y se presentaron a través del mismo puerto de origen Cartagena y con la misma naviera Hapag Lloyd.

Para el origen Ibagué y las posibles rutas a cada uno de los destinos New York, Charleston y Oakland los menores costos fueron de \$59.158, \$58.877 y \$55.965 por saco para cada destino respectivamente y se presentaron a través del mismo puerto multimodal Barranca, el mismo puerto de origen Cartagena y con la misma naviera Hapag Lloyd.

Para el origen Manizales y las posibles rutas a cada uno de los destinos New York, Charleston y Oakland los menores costos fueron de \$62.570, \$62.381 y \$59.458 por saco para cada destino respectivamente y se presentaron a través del mismo puerto de origen Cartagena y con la misma naviera Hapag Lloyd.

Lo anterior evidencia que las rutas que salen desde el nodo de origen Ibagué hacia los tres puertos de destino tienen el menor costo.

8.1.1.2 MENOR TIEMPO

Los menores tiempos obtenidos en la red de transporte multimodal se relacionan en la tabla 43.

RESULTADOS RED COMPLETA - VARIABLE TIEMPO (DÍAS)	Neiva - Naviera 1	Neiva - Naviera 2	Ibague - Naviera 1	Ibague - Naviera 2	Manizales - Naviera 1	Manizales - Naviera 2
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	-	21,1	-	17,5	-	20,1
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	20,3	-	17,2	-	19,6	-
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	-	26,8	-	22,8	-	25,7

Tabla 43: Resultados menores tiempos por ruta en la red completa

Para todas las rutas generadas entre los orígenes Neiva, Ibagué y Manizales y los dos destinos New York y Oakland, el puerto empleado fue Cartagena con la naviera Hapag Lloyd. Con los tres orígenes existentes, la ruta hacia Charleston involucró igualmente el puerto de Cartagena, pero con la naviera Hamburg Sud.

Para el origen Neiva y las posibles rutas a cada uno de los destinos New York, Charleston y Oakland los menores tiempos fueron de 21,1, 20,3 y 26,8 días para cada destino respectivamente.

Para el origen Ibagué y las posibles rutas a cada uno de los destinos New York, Charleston y Oakland los menores tiempos fueron de 17,5, 17,2 y 22,8 días para cada destino respectivamente.

Para el origen Manizales y las posibles rutas a cada uno de los destinos New York, Charleston y Oakland los menores tiempos fueron de 20,1, 19,6 y 25,7 días para cada destino respectivamente.

Lo anterior evidencia que las rutas más cortas corresponden a aquellas que tienen a Ibagué como nodo de origen.

8.1.1.3 MENOR COSTO Y TIEMPO SIMULTÁNEAMENTE

Para hacer un análisis de costo y tiempo simultáneamente, se segmentan los resultados por nodos de origen.

ORIGEN NEIVA

Para el origen Neiva, los resultados de menores costos y tiempos se resumen en la tabla 44.

De esta manera, se puede ver que el café que se produzca en este origen hacia New York y hacia Oakland, debe ser exportado a través de Cartagena con la naviera Hapag Lloyd porque dicha ruta presenta los menores costos y tiempos simultáneamente.

Por su parte, el café que entreguen en Neiva y tenga como destino Charleston no tiene una ruta óptima en costos y tiempos simultáneamente, sino que en tocaría exportar por Cartagena y escoger entre las navieras Hamburg Sud y Hapag Lloyd, donde la primera presenta un incremento en costo del 8,65% y una disminución en tiempo del 22,22% frente a la segunda.

RESULTADOS - VARIABLES COSTO Y TIEMPO NEIVA				
RUTA POR DESTINO	COSTO NAVIERA 1	TIEMPO NAVIERA 1	COSTO NAVIERA 2	TIEMPO NAVIERA 2
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	-	-	<u>65.615,39</u>	<u>21,1</u>
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	<u>71.119,57</u>	<u>20,3</u>	<u>65.451,87</u>	<u>26,1</u>
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	-	-	<u>62.469,97</u>	<u>26,8</u>

Tabla 44: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para el origen Neiva

ORIGEN IBAGUÉ

Para el origen Ibagué, los resultados de menores costos y tiempos se resumen en la tabla 45. Con este origen no se tuvo ningún óptimo considerando el costo y tiempo simultáneamente.

Para el destino New York, se debe exportar el café a través de la naviera Hapag Lloyd y por el puerto de Cartagena. Sin embargo, se debe escoger entre incluir o no en la ruta el nodo de Barranca, ya que al utilizarlo en la ruta el costo se disminuye en un 6,8% y el tiempo aumenta un 32% frente a la ruta que no lo tiene en cuenta.

De igual manera, para el destino Oakland, se debe exportar el café a través de la naviera Hapag Lloyd, por el puerto de Cartagena y se debe escoger entre incluir o no en la ruta el nodo de Barranca. Al incluirlo en la ruta el costo se disminuye en un 7% y el tiempo aumenta un 25% frente a la ruta que no lo tiene en cuenta.

RESULTADOS - VARIABLES COSTO Y TIEMPO ORIGEN IBAGUÉ				
RUTA POR DESTINO	COSTO NAVIERA 1	TIEMPO NAVIERA 1	COSTO NAVIERA 2	TIEMPO NAVIERA 2
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	-	-	63.457,92	<u>17,5</u>
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - NEW YORK	-	-	<u>59.157,80</u>	23,1
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	68.901,80	<u>17,2</u>	63.177,47	<u>22,2</u>
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - CHARLESTON	-	-	<u>58.877,34</u>	27,8
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	-	-	60.264,89	<u>22,8</u>
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - OAKLAND	-	-	<u>55.964,77</u>	28,5

Tabla 45: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para el origen Ibagué

Finalmente, dado que la ruta hacia el destino Charleston no presenta dos alternativas en conflicto sino tres, este se revisa con más detalle y para ello se toman de forma independiente estas opciones como se puede ver en la tabla 46 y se grafican en la Ilustración 31.

Las tres opciones por considerar se muestran a continuación:

- OPCIÓN 1: Naviera 1 / CARTAGENA - CHARLESTON
- OPCIÓN 2: Naviera 2 / CARTAGENA - CHARLESTON
- OPCIÓN 3: Naviera 2 / BARRANCA - CARTAGENA – CHARLESTON

Adicionalmente, en la tabla 46 se relaciona el promedio entre las tres opciones para analizar si la opción dos que no tiene el menor costo ni el menor tiempo, pero se encuentra entre estos rangos puede ser una buena decisión.

RUTA POR DESTINO Y NAVIERA	COSTO	TIEMPO
OPCION 1	68.902	17,2
OPCION 2	63.177	22,2
OPCION 3	58.877	27,8
PROMEDIO	63.652	22,4

Tabla 46: Resultados finales para la ruta Ibagué a Charleston

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se grafican los costos frente a los tiempos para las opciones 1, 2 y 3 que se encuentran en azul y se incluye el promedio que corresponde a punto naranja en la Ilustración 31.

De esta manera, dado que la opción 2 se encuentra por debajo y hacia el lado izquierdo del punto promedio que se traduce en un menor costo y un menor tiempo que la media, se podría decir que al analizar simultáneamente los costos y tiempos para el origen Ibagué y

el destino Charleston sería mejor la opción 2 que incluye el puerto marítimo Cartagena y la naviera 2.

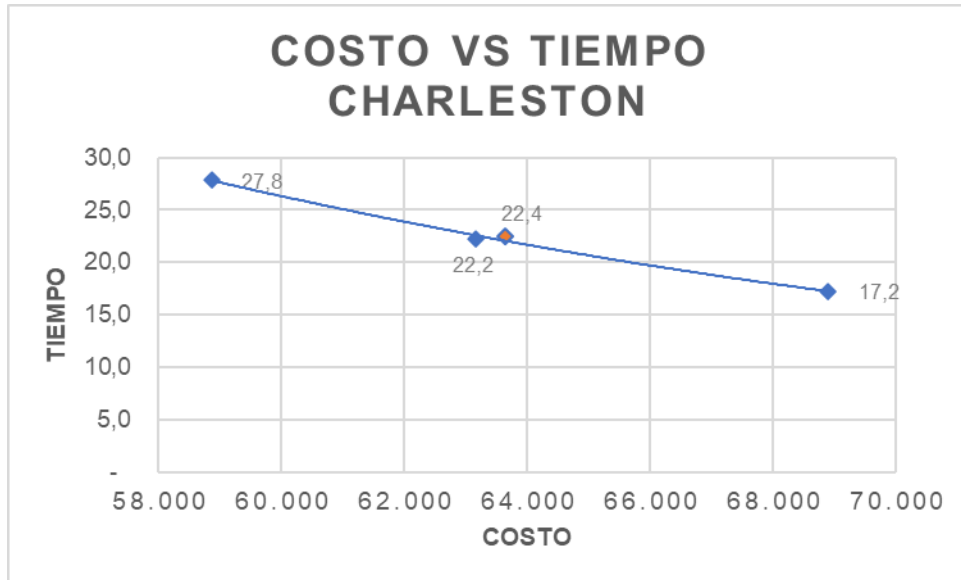


Ilustración 31: Resultados finales para la ruta Ibagué a Charleston

ORIGEN MANIZALES

Para el origen Manizales, los resultados de menores costos y tiempos se resumen en la tabla 47.

Considerando los resultados obtenidos, se concluiría que lo que se produzca en este origen hacia New York y hacia Oakland, debe ser exportado a través de Cartagena con la naviera Hapag Lloyd porque dicha ruta presenta los menores costos y tiempos simultáneamente.

Por su parte, el café que entreguen en Manizales y se destine hacia Charleston, no tiene una ruta óptima en costos y tiempos simultáneamente, sino que en tocaría exportar por Cartagena y escoger entre las navieras Hamburg Sud y Hapag Lloyd, donde la primera presenta un incremento en costo del 9,4% y una disminución en tiempo del 20,33% frente a la segunda.

RESULTADOS - VARIABLES COSTO Y TIEMPO				
MANIZALES				
RUTA POR DESTINO	COSTO NAVIERA 1	TIEMPO NAVIERA 1	COSTO NAVIERA 2	TIEMPO NAVIERA 2
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	-	-	<u>62.569,81</u>	<u>20,1</u>
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	<u>68.224,71</u>	<u>19,6</u>	<u>62.381,62</u>	<u>24,6</u>
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	-	-	<u>59.457,80</u>	<u>25,7</u>

Tabla 47: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para el origen Neiva

RESULTADO FINAL

En la tabla 48 se presenta el resumen de los resultados expuestos y analizados previamente, donde se observa que únicamente las rutas con orígenes Neiva y Manizales hacia los destinos de New York y Oakland tienen rutas con costos y tiempos óptimos de manera simultánea.

Entre las rutas posibles desde Ibagué hacia cualquiera de los tres destinos New York, Charleston y Oakland no se obtuvo una alternativa óptima en costos y tiempos.

Por su parte las posibles rutas con destino Charleston desde cualquiera de los tres orígenes Neiva, Ibagué y Manizales, no presentaron una alternativa óptima en costos y tiempos paralelamente.

RESUMEN RESULTADOS FINALES OPTIMOS EN TIEMPO Y COSTO SIMULTÁNEO			
ORIGEN	DESTINO		
	NEW YORK	CHARLESTON	OAKLAND
NEIVA	CARTAGENA CON NAVIERA 2	NO HAY OPTIMO EN TIEMPO Y COSTO	CARTAGENA CON NAVIERA 2
IBAGUÉ	NO HAY OPTIMO EN TIEMPO Y COSTO	NO HAY OPTIMO EN TIEMPO Y COSTO	NO HAY OPTIMO EN TIEMPO Y COSTO
MANIZALES	CARTAGENA CON NAVIERA 2	NO HAY OPTIMO EN TIEMPO Y COSTO	CARTAGENA CON NAVIERA 2

Tabla 48: Resultados obtenidos en menores tiempos y costos para todos los orígenes y destinos

8.1.2 OTROS ANÁLISIS

Considerando nuevamente la tabla 40 y 41 donde se mostraron todos los resultados en costos y tiempos para todas las posibles combinaciones de rutas, se presentan ahora las tablas 49 y 50 con una discriminación por colores. El color verde muestra los dos menores costos y tiempos, el negro representa el punto medio y el color rojo los dos mayores costos y tiempos.

De esta manera se puede ver que los mayores costos están asociados con el puerto de Buenaventura y el puerto de Santa Marta en la ruta que incluye el puerto multimodal de la

Dorada. Por el contrario, las rutas que contemplan a Cartagena ya se de forma directa o incluyendo el puerto multimodal de Barranca son las opciones con menores costos.

Finalmente, la ruta de Santa Marta en términos de costos fue la que permaneció en el medio para todas las alternativas posibles.

RESULTADOS RED COMPLETA - VARIABLE COSTO (POR SACO)	Neiva - Naviera 1	Neiva - Naviera 2	Ibague - Naviera 1	Ibague - Naviera 2	Manizales - Naviera 1	Manizales - Naviera 2
TRILLADORA - BUENAVENTURA - NEW YORK	104.611,03	93.107,75	97.711,24	91.025,83	99.876,85	94.135,81
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	71.119,57	65.615,39	68.785,88	63.457,92	67.993,05	62.569,81
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - NEW YORK	71.212,94	65.964,72	64.409,69	59.157,80	69.491,28	64.292,41
TRILLADORA - SANTA MARTA - NEW YORK	76.667,16	71.647,22	73.792,17	69.259,88	74.949,56	70.059,90
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - NEW YORK	78.622,79	73.614,65	75.754,80	70.883,91	76.936,77	71.758,86
TRILLADORA - BUENAVENTURA - CHARLESTON	101.813,75	91.860,81	98.360,08	88.840,31	99.412,08	88.921,93
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	71.119,57	65.451,87	68.901,80	63.177,47	68.224,71	62.381,62
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - CHARLESTON	71.212,94	65.801,20	64.525,61	58.877,34	69.722,94	64.104,22
TRILLADORA - SANTA MARTA - CHARLESTON	75.666,73	70.534,98	73.534,91	67.693,33	73.763,91	68.885,50
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - CHARLESTON	77.622,36	72.502,40	75.497,55	69.317,36	75.751,12	70.584,47
TRILLADORA - BUENAVENTURA - OAKLAND	95.423,65	86.827,94	92.311,68	83.406,68	90.799,70	85.414,13
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	71.652,94	62.469,97	68.530,54	60.264,89	68.563,97	59.457,80
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - OAKLAND	71.746,30	62.819,29	64.154,35	55.964,77	70.062,20	61.180,40
TRILLADORA - SANTA MARTA - OAKLAND	76.308,38	70.082,13	73.480,90	66.945,16	74.798,58	68.140,41
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - OAKLAND	78.264,01	72.049,56	75.443,54	68.569,19	76.785,78	69.839,37

Tabla 49: Resultados de costos por saco en la red completa por colores

Por su parte los mayores tiempos están asociados principalmente al puerto de Santa Marta ya sea de forma directa o incluyendo el puerto multimodal de la Dorada y por el contrario los menores tiempos están relacionados con la exportación a través del puerto de Cartagena y para algunos casos Buenaventura.

RESULTADOS RED COMPLETA - VARIABLE TIEMPO (DÍAS)	Neiva - Naviera 1	Neiva - Naviera 2	Ibague - Naviera 1	Ibague - Naviera 2	Manizales - Naviera 1	Manizales - Naviera 2
TRILLADORA - BUENAVENTURA - NEW YORK	24,1	25,8	23,4	25,5	23,8	25,8
TRILLADORA - SANTA MARTA - NEW YORK	30,8	29,6	24,8	23,9	30,0	28,7
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - NEW YORK	35,9	34,8	29,6	28,9	34,9	33,8
TRILLADORA - CARTAGENA - NEW YORK	22,6	21,1	19,3	17,5	21,4	20,1
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - NEW YORK	28,2	27,0	24,5	23,1	27,1	26,1
TRILLADORA - BUENAVENTURA - CHARLESTON	25,0	30,7	24,6	30,5	24,8	30,5
TRILLADORA - SANTA MARTA - CHARLESTON	33,1	33,0	28,2	27,9	32,3	32,2
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - CHARLESTON	38,2	38,2	33,0	32,9	37,2	37,4
TRILLADORA - CARTAGENA - CHARLESTON	20,3	26,1	17,2	22,2	19,6	24,6
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - CHARLESTON	26,0	31,9	22,4	27,8	25,3	30,6
TRILLADORA - BUENAVENTURA - OAKLAND	26,9	38,7	26,6	38,3	26,7	38,7
TRILLADORA - SANTA MARTA - OAKLAND	41,0	41,7	35,9	36,4	40,5	41,0
TRILLADORA - DORADA - SANTA MARTA - OAKLAND	46,1	46,9	40,7	41,5	45,4	46,2
TRILLADORA - CARTAGENA - OAKLAND	38,0	26,8	34,8	22,8	37,3	25,7
TRILLADORA - BARRANCA - CARTAGENA - OAKLAND	43,6	32,6	40,0	28,5	43,0	31,6

Tabla 50: Resultados de tiempos en días en la red completa por colores

Así, si se presenta una necesidad para la empresa exportadora o un requerimiento puntual de un cliente donde una de las dos variables ya sea costos o tiempos tenga una importancia

dominante sobre la otra, se podrían tomar decisiones de rutas más rápidas, lentas, o menos costosas con base en estos resultados obtenidos.

8.2 RESULTADOS SEGMENTADOS OBTENIDOS

Los resultados generales obtenidos partieron de unas bases donde inicialmente se encontraban segmentados en dos partes. Una que incluía el trayecto desde la trilladora hasta los puertos marítimos de origen y otra que consideraba la ruta marítima entre los puertos marítimos en origen y los de destino.

8.2.1 RUTA DESDE TRILLADORA HASTA PUERTOS ORIGEN: COSTO Y TIEMPO

En caso de que se realizara una negociación para una exportación bajo el Incoterm FOB que es entregado puesto en el barco, pero sin asumir los fletes marítimos, se tendrían los resultados de las tablas 51 y 52.

Bajo este modelo es evidente que los costos al exportar por el puerto de Buenaventura son mucho menores que los de Cartagena y Santa Marta ya sean directos o a través de los puertos multimodales como se puede ver en la tabla 51.

COSTO RUTA TRILLADORA A PUERTO ORIGEN	Promedio Neiva	Promedio Ibague	Promedio Manizales
Ruta Trilladora - Buenaventura	9.448,75	6.856,03	6.851,08
Ruta Trilladora - Cartagena	15.155,98	13.006,04	12.185,76
Ruta Trilladora - Barranca- Cartagena	15.377,33	8.667,88	13.796,18
Ruta Trilladora - Santa Marta	14.045,01	11.928,18	12.305,15
Ruta Trilladora - Dorada- Santa Marta	16.006,54	13.721,51	14.148,24

Tabla 51: Costo de las rutas desde trilladoras hasta puertos marítimos de origen

Adicionalmente, en términos de tiempos asociados a las actividades entre las trilladoras y los puertos marítimos en origen también es evidente que es más veloz la ruta a través de Buenaventura y que las rutas que incluyen los nodos multimodales de Barranca y La Dorada presentan los tiempos de tránsito más elevados como se puede ver en la tabla 52.

TIEMPO RUTA TRILLADORA A PUERTO ORIGEN	Promedio Neiva	Promedio Ibague	Promedio Manizales
Ruta Trilladora - Buenaventura	2,6	2,4	2,5
Ruta Trilladora - Cartagena	3,1	2,9	2,7
Ruta Trilladora - Barranca- Cartagena	8,8	8,3	8,6
Ruta Trilladora - Santa Marta	3,0	2,7	2,8
Ruta Trilladora - Dorada- Santa Marta	8,1	7,6	7,8

Tabla 52: Tiempo de las rutas desde trilladoras hasta puertos marítimos de origen

8.2.2 RUTA DESDE PUERTOS EN ORIGEN A PUERTOS EN DESTINO: COSTO Y TIEMPO

En caso de que se realizara una negociación donde la empresa estuviera encargada de pagar el flete marítimo, pero no la operación logística en el país de origen, se tendrían los resultados de las tablas 53 y 54.

De esta manera se puede ver en la tabla 53 que para las dos navieras los promedios de costos por saco son más elevados desde Buenaventura y menores desde Cartagena como puertos marítimos en origen.

COSTO RUTA MARÍTIMA	Promedio costo por saco N1	Promedio costo por saco N2
Buenaventura a New York	92.983,82	85.068,45
Cartagena a New York	53.141,01	50.490,00
Santa Marta a New York	59.969,87	57.556,18
Buenaventura a Charleston	87.149,54	82.186,34
Cartagena a Charleston	53.093,58	50.279,28
Santa Marta a Charleston	58.920,45	56.271,79
Buenaventura a Oakland	81.312,01	77.528,23
Cartagena a Oakland	51.707,42	47.339,85
Santa Marta a Oakland	58.866,48	55.623,08

Tabla 53: Costos logísticos de las rutas marítimas

En lo concerniente a los tiempos, se puede observar en la tabla 54 que para las dos navieras los promedios de tiempos en días son más elevados desde Santa Marta y menores desde Cartagena como puertos marítimos en origen.

TIEMPO RUTA MARÍTIMA	Promedio días N1	Promedio días N2
Buenaventura a New York	21,2	23,2
Cartagena a New York	17,4	16,7
Santa Marta a New York	25,1	24,5
Buenaventura a Charleston	25,2	28,1
Cartagena a Charleston	18,8	21,4
Santa Marta a Charleston	28,3	28,2
Buenaventura a Oakland	30,2	36,1
Cartagena a Oakland	28,0	22,2
Santa Marta a Oakland	36,6	36,9

Tabla 54: Tiempos de tránsito, almacenamiento y espera de las rutas marítimas

8.3 CONCLUSIONES

Se realizaron análisis desde varias perspectivas que incluían los resultados generales con todas las posibles rutas entre los orígenes y destinos establecidos, así como resultados segmentados considerando solo trayectos en Colombia como país de origen y trayectos marítimos.

Se encontraron los óptimos en términos de costos y tiempos de manera individual para todas las rutas establecidas entre los nodos de origen y los nodos de destino, pasando a través de los nodos multimodales y marítimos en origen. De esta manera, las exportaciones a través del puerto de Cartagena fueron las que presentaron mejor desempeño en términos de costos y tiempos.

Al evaluar simultáneamente los costos y los tiempos no fue posible encontrar óptimos para todas las rutas, pero se presentaron las alternativas para aquellas en las que no fue posible tener el menor tiempo y costo.

Finalmente se presentaron algunos resultados y análisis adicionales a los planteados en el objetivo inicial del trabajo, que incluían análisis del segmentados de las rutas establecidas, donde en términos de tiempo y costos en trayectos desde trilladora hasta el puerto marítimo de origen, Buenaventura presentó el mejor desempeño en estas variables y por el contrario en los trayectos que involucran solo la ruta marítima, tuvo el peor desempeño entre los escenarios.

CAPITULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

Se logró detectar un vacío de investigación en el campo del transporte multimodal a través de la revisión del estado del arte, para posteriormente identificar, estudiar, conocer y abordar el problema, encontrando la solución planteada inicialmente en los objetivos.

Se identificaron los actores involucrados en la red de transporte multimodal, así como los elementos que componen la red en términos de nodos y arcos. Adicionalmente se presenta la descripción del proceso de exportación como base del entendimiento de la red y los modelos de simulación propuestos.

Se identificaron los costos, tiempos y restricciones que influyen en los costos logísticos y tiempos de exportación del café verde y fueron clasificados de acuerdo con su naturaleza.

Se seleccionó la simulación como técnica de solución que permitió la construcción y validación del modelo de la red de transporte multimodal, de acuerdo con los parámetros, variables y restricciones establecidas.

Se construyeron los modelos de simulación que abarcaban la red de transporte multimodal para la exportación de café verde desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos.

Se modelaron diferentes escenarios a través de los cuales se obtuvieron resultados clave para la toma de decisiones en el flujo a través de la red de transporte multimodal y selección de modos de transporte y proveedores, desde el nivel táctico.

Se abordaron todos los objetivos específicos planteados desde cada uno de los capítulos y finalmente se cumple con el objetivo general de proponer la red de transporte multimodal para reducir los costos logísticos y tiempos de exportación de café verde desde los departamentos del Huila, Tolima y Caldas hacia los puertos de New York, Charleston y Oakland en Estados Unidos, teniendo en cuenta la infraestructura existente.

Adicionalmente, los resultados obtenidos a través de la herramienta de simulación permitieron hacer un análisis más profundo y detallado del comportamiento de la red general y a su vez, de fragmentos de ella.

9.2 RECOMENDACIONES

Para entender mejor el comportamiento de la red de transporte multimodal para exportar café verde, es necesario plantear unos escenarios como oportunidad de investigación futura.

De este trabajo que pueden derivar estudios futuros que permitan abordar los problemas de planeación de redes de transporte multimodal en la exportación de café verde desde los horizontes estratégicos y operativos dado que este trabajo se expuesto desde el enfoque táctico.

Adicionalmente se pueden buscar otras herramientas que permitan la simulación con menor cantidad de restricciones en la utilización de componentes dentro del modelo, de tal manera que su construcción y ejecución pueda ser más simple.

Partiendo de este trabajo exploratorio, dado que no se han hecho investigaciones en este campo con las características particulares, se podría tomar como punto de partida para explorar redes más grandes y complejas que integren diversas opciones de orígenes y destinos incluso en otros países.

Otro aspecto que se podría destacar sería la inclusión de diversos tipos de vehículos para el transporte terrestre dada la disponibilidad y las probabilidades de utilización, así como la incorporación de otras líneas navieras que se encuentran disponibles para la prestación de servicios de transporte marítimos en la exportación de café.

ANEXOS

1.RESULTADO DE VARIABLES DE LAS 6 SIMULACIONES

(Normal Run - Avg. Reps)							
VARIABLES	1.1 Neiva Naviera 1	1.2 Neiva Naviera 2	2.1 Ibague Naviera 1	2.2 Ibague Naviera 2	3.1 Manizales Naviera 1	3.2 Manizales Naviera 2	Notas
vMulas Buenaventura	152,1	152,1	92,7	92,8	139,3	139,5	Variable
vMulas Cartagena	75,9	75,7	46,1	46,2	69,6	69,6	Variable
vMulas Santamarta	75,0	75,0	45,5	45,4	68,7	68,7	Variable
vMulas Dorada	75,8	75,7	46,0	46,0	69,2	69,2	Variable
vMulas Barranca	75,7	76,0	46,3	46,3	69,5	69,3	Variable
vMt Trilla Buenaventura	513000,0	513000,0	307000,0	307000,0	304000,0	304000,0	Constante
vMt Trilla Cartagena	1200000,0	1200000,0	1045000,0	1045000,0	839000,0	839000,0	Constante
vMt Trilla Santamarta	1115000,0	1115000,0	960000,0	960000,0	952000,0	952000,0	Constante
vMt Trilla Dorada	334000,0	334000,0	218000,0	218000,0	171000,0	171000,0	Constante
vMt Trilla Barranca	590000,0	590000,0	435000,0	435000,0	427000,0	427000,0	Constante
vMt Buenaventura Newyork	14280000,0	15960000,0	14280000,0	15960000,0	14280000,0	15960000,0	Constante
vMt Buenaventura Charleston	15120000,0	20160000,0	15120000,0	20160000,0	15120000,0	20160000,0	Constante
vMt Buenaventura Oakland	16800000,0	27720000,0	16800000,0	27720000,0	16800000,0	27720000,0	Constante
vMt Cartagena Newyork	8400000,0	6720000,0	8400000,0	6720000,0	8400000,0	6720000,0	Constante
vMt Cartagena Charleston	6720000,0	10920000,0	6720000,0	10920000,0	6720000,0	10920000,0	Constante
vMt Cartagena Oakland	22680000,0	11760000,0	22680000,0	11760000,0	22680000,0	11760000,0	Constante
vMt Santamarta Newyork	12600000,0	11760000,0	12600000,0	11760000,0	12600000,0	11760000,0	Constante
vMt Santamarta Charleston	15120000,0	15120000,0	15120000,0	15120000,0	15120000,0	15120000,0	Constante
vMt Santamarta Oakland	22680000,0	23520000,0	22680000,0	23520000,0	22680000,0	23520000,0	Constante
vTiempo Cafe M Buenaventura	64,6	62,2	56,8	57,9	60,4	58,7	Variable
vTiempo Cafe M Cartagena	75,0	73,1	70,1	67,9	66,0	64,8	Variable

vTiempo Cafe M Santamarta	71,2	72,2	63,2	65,3	68,1	67,8	Variable
vTiempo Cafe M Dorada	153,7	153,0	156,2	155,5	150,7	149,9	Variable
vTiempo Cafe M Barranca	158,8	161,8	143,8	152,0	151,6	156,6	Variable
VTiempo Cafe Barranca Cartagena	51,3	51,3	51,3	51,2	51,3	51,3	Variable
VTiempo Cafe Dorada Santamarta	34,4	34,3	34,3	34,3	34,3	34,3	Variable
v Tiempo cafe Buenaventura Newyork	514,8	557,4	503,9	554,1	510,2	559,9	Variable
v Tiempo cafe Buenaventura Charleston	535,3	675,4	534,5	673,7	534,4	674,1	Variable
v Tiempo cafe Buenaventura Oakland	580,2	867,3	581,5	862,5	580,7	870,0	Variable
v Tiempo cafe Cartagena Newyork	466,6	434,3	393,0	352,1	447,8	418,2	Variable
v Tiempo cafe Cartagena Charleston	413,2	553,3	343,6	464,6	403,6	525,7	Variable
v Tiempo cafe Cartagena Oakland	837,4	569,8	764,5	480,2	828,5	551,5	Variable
v Tiempo cafe Santamarta Newyork	668,7	638,6	532,7	508,1	651,3	620,1	Variable
v Tiempo cafe Santamarta Charleston	724,0	720,6	612,8	603,8	707,2	706,2	Variable
v Tiempo cafe Santamarta Oakland	912,5	929,0	798,9	809,2	904,4	917,0	Variable
v Cargue saco trilla	490,0	490,0	490,0	490,0	490,0	490,0	Constante
v Flete saco Trilla m Buenaventura	7149,0	7149,0	4628,0	4628,0	4498,0	4498,0	Constante
v Flete saco Trilla m Cartagena	12966,0	12966,0	10885,0	10885,0	9975,0	9975,0	Constante
v Flete saco Trilla m Santamarta	11823,0	11823,0	9872,0	9872,0	10082,0	10082,0	Constante
v Flete saco Trilla m Dorada	4891,0	4891,0	2630,0	2630,0	2832,0	2832,0	Constante
v Flete saco Trilla m Barranca	7085,0	7085,0	412,0	412,0	5560,0	5560,0	Constante

v Transporte saco Dorada Santamarta	8000,0	8000,0	8000,0	8000,0	8000,0	8000,0	Constante
v Transporte saco Barranca Cartagena	5278,0	5278,0	5278,0	5278,0	5278,0	5278,0	Constante
v Costo cargadescargue Saco Buenaventura	683,0	683,0	683,0	683,0	683,0	683,0	Constante
v Costo cargadescargue Saco Cartagena	683,0	683,0	683,0	683,0	683,0	683,0	Constante
v Costo cargadescargue Saco Santamarta	737,0	737,0	737,0	737,0	737,0	737,0	Constante
v Costo cargadescargue Saco Barranca	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0	Constante
v Costo Almacenamiento Buenaventura hora	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Constante
v Costo Almacenamiento Cartagena hora	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Constante
v Costo Almacenamiento Santamarta hora	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Constante
v Costo Almacenamiento Dorada hora	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Constante
v Costo Almacenamiento Barranca hora	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	Constante
v Sacos Tri Santamarta a destino	37490,7	37477,5	22766,4	22710,7	34331,9	34358,1	Variable
v Sacos Tri Dorada Santamarta destino	36446,9	36419,4	22062,4	22085,8	33297,7	33287,8	Variable
v Sacos Tri Cartagena a destino	37913,8	37828,9	23053,1	23075,1	34791,1	34798,3	Variable
v Sacos Tri Barranca Cartagena destino	36276,7	36356,6	22176,7	22115,9	33312,1	33198,6	Variable
v Sacos Tri a Buenaventura	76025,8	76033,1	46334,9	46379,9	69634,8	69705,3	Variable
v Costo Sacos M Buenaventura	9495,5	9402,0	6832,9	6879,2	6837,6	6782,9	Variable

v Costo Sacos M Cartagena	15186,6	15125,4	13044,2	12967,9	12146,4	12079,8	Variable
v Costo Sacos M Santamarta	14019,5	14070,5	11890,3	11966,0	12274,0	12261,9	Variable
v Costo Sacos M Dorada Santamarta	15975,2	16037,9	13853,0	13590,0	13864,3	13960,9	Variable
v Costo Sacos M Barranca Cartagena	15279,9	15474,7	8668,0	8667,8	13761,9	13802,4	Variable
v Costo T espera por saco P Buenaventura	458,0	458,0	458,0	458,0	458,0	458,0	Constante
v Costo T espera por saco P Cartagena	409,0	409,0	409,0	409,0	409,0	409,0	Constante
v Costo T espera por saco P Santamarta	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Constante
v Costo uso por saco Buenaventura	108,0	108,0	108,0	108,0	108,0	108,0	Constante
v Costo uso por saco Cartagena	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	Constante
v Costo uso por saco Santamarta	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	Constante
v Costo servicios de aduanas	2406,0	2406,0	2406,0	2406,0	2406,0	2406,0	Constante
v Costo flete seguro Buenaventura Newyork	60289,0	52912,0	60289,0	52912,0	60289,0	52912,0	Constante
v Costo flete seguro Buenaventura Charleston	59469,0	51273,0	59469,0	51273,0	59469,0	51273,0	Constante
v Costo flete seguro Buenaventura Oakland	53732,0	47994,0	53732,0	47994,0	53732,0	47994,0	Constante
v Costo flete seguro Cartagena Newyork	53437,0	47994,0	53437,0	47994,0	53437,0	47994,0	Constante
v Costo flete seguro Cartagena Charleston	53437,0	47994,0	53437,0	47994,0	53437,0	47994,0	Constante
v Costo flete seguro Cartagena Oakland	55371,0	45043,0	55371,0	45043,0	55371,0	45043,0	Constante

v Costo flete seguro Santamarta Newyork	60289,0	55371,0	60289,0	55371,0	60289,0	55371,0	Constante
v Costo flete seguro Santamarta Charleston	59961,0	54486,0	59961,0	54486,0	59961,0	54486,0	Constante
v Costo flete seguro Santamarta Oakland	61928,0	55371,0	61928,0	55371,0	61928,0	55371,0	Constante
v Tiempo Variable Naviera	24,0	48,0	24,0	48,0	24,0	48,0	Variable
v Costo Saco Buenaventura Newyork	95115,5	83705,8	90878,3	84146,7	92957,6	87352,9	Variable
v Costo Saco Buenaventura Charleston	92318,2	82458,8	91527,2	81961,2	92492,8	82139,0	Variable
v Costo Saco Buenaventura Oakland	85928,1	77426,0	85478,8	76527,5	83880,5	78631,2	Variable
v Costo Saco Cartagena Newyork	55933,0	50490,0	55741,7	50490,0	55701,3	50490,0	Variable
v Costo Saco Cartagena Charleston	55933,0	50326,5	55857,6	50209,5	55933,0	50301,8	Variable
v Costo Saco Cartagena Oakland	56466,4	47344,6	55486,4	47297,0	56272,3	47378,0	Variable
v Costo Saco Santamarta Newyork	62647,6	57576,7	61901,8	57293,9	62601,2	57798,0	Variable
v Costo Saco Santamarta Charleston	61647,2	56464,5	61644,6	55727,3	61415,5	56623,6	Variable
v Costo Saco Santamarta Oakland	62288,9	56011,6	61590,6	54979,1	62450,2	55878,5	Variable

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- J. Udomwannakhet, et al (2018). "A review of multimodal transportation optimization model," 2018 5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR), 2018, pp. 333-338, doi: 10.1109/ICBIR.2018.8391217
- Abbassi, A., et al (2019). Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach. *Journal of Computational Science*, pp. 127-142. doi:10.1016/j.jocs.2018.12.001
- Kai-Hua Wang, et al (2020). Are there periodically collapsing bubble behaviours in the global coffee market? *Agrekon*, vol 59:1, pp. 65-77, DOI: 10.1080/03031853.2019.1631865
- Federación Nacional de Cafeteros (2021). *Glosario. Cafés suaves*. <https://federaciondecafeteros.org/wp/glosario/cafes-suaves/>
- Federación Nacional de Cafeteros (2022). *Informe del Gerente al 89 Congreso Nacional de Cafeteros 2021*. <https://www.flipsnack.com/federaciondecafeteros/informe-del-gerente-general-al-89-congreso-nacional-cafetero/full-view.html>
- The World Bank. (2018). *The Logistics Performance Index*. Obtenido de <https://lpi.worldbank.org/about>
- Almeida, F. M., Monteiro da Silva, O., & Braga, M. J. (2011). O Comércio Internacional do Café Brasileiro: a influência dos custos de transporte. *RESR Piracicaba*, 49(02), 323-340. doi:10.1590/S0103-20032011000200003
- Díaz, J. (2017). 81ª CUMBRE CAFETERA. Contexto económico Colombiano: Comercio exterior y Competitividad. Asoexport y Analdex. <http://www.analdex.org/wp-content/uploads/2000/03/2-2017-11-03-Javier-Daz-Cumbre-Cafetera.pdf>
- Portafolio (2018). *Costos del transporte, el trago amargo de exportadores de café*. Portafolio. <https://www.portafolio.co/negocios/costos-del-transporte-el-trago-amargo-de-exportadores-de-cafe-522504>
- López, J. (2020). "PESE A CONTINGENCIAS DEL VIRUS COVID-19, NI UN SOLO GRANO DE CAFÉ SE HA DEJADO DE EXPORTAR". *Agronegocios*.

<https://www.agronegocios.co/aprenda/pese-a-contingencias-del-covid-19-ni-un-solo-grano-de-cafe-se-ha-dejado-de-exportar-3073796>

Federación Nacional de Cafeteros (2021). Estadísticas Cafeteras. Precios, área y producción del café. <https://caldas.federaciondecafeteros.org/estadisticas-cafeteras/>

Federación Nacional de Cafeteros (2013). Ensayos sobre economía cafetera. Año 26 No. 29 Enero - Diciembre 2013. https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2019/12/Econom%C3%ADa-Cafetera-No.-29_Web.pdf

Departamento Nacional de Planeación -DNP- (2020). Encuesta Nacional Logística. DNP. <https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/News/Encuesta%20Nacional%20Logi%C3%81stica%202020.pdf?ver=2021-09-24-211753-007>

International Coffee Organization ICO (2021). Trade Statistics Tables. Imports of coffee by selected importing countries. https://www.ico.org/trade_statistics.asp?section=Statistics

Taylor, et al (2019) U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service, Profiles of the Top U.S. Agricultural Ports. June 2019. Web. <<http://dx.doi.org/10.9752/TS092.06-2019>>

Ministerio de Agricultura de Colombia (2020). Cosecha cafetera de 2020 cerraría con un valor de \$9 billones, superior en 20% a 2019 y una de las más altas en 20 años. Noticias MinAgricultura. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Cosecha-cafetera-2020.aspx>

Federación Nacional de Cafeteros (2022). Estadísticas Cafeteras. Exportaciones. <https://caldas.federaciondecafeteros.org/estadisticas-cafeteras/>

Trujillo Diaz, J., & Martinez Rojas, M. (2015). Methodology for decisions making in transportation logistics function For Supply Chain (SC) colombian green coffee study. International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Dubai. doi:10.1109/IEOM.2015.7228104

- Trujillo Diaz, J. (2017). Metodología para la clasificación, selección de la modalidad del transporte y la consolidación de carga usando PROMETHEE. International Congress on Industrial Engineering and Operations Management. Bogota.
- Lebedeva & Poltavskaya (2020). Multimodal transport network freight routing algorithms in optimization models. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. doi:10.1088/1757-899X/971/5/052008
- StadieSeifi, M., et al (2014). Multimodal freight transportation planning: A literature review. European Journal of Operational Research, 1-15. doi:10.1016/j.ejor.2013.06.055
- Sun, Y., & Lang, M. (2015). Modeling the Multicommodity Multimodal Routing Problem with Schedule-Based Services and Carbon Dioxide Emission Costs. Mathematical Problems in Engineering. doi:10.1155/2015/406218
- Anoop K P & Vinay V. Panicker (2020): Multimodal transportation planning with freight consolidation and volume discount on rail freight rate, Transportation Letters, DOI:10.1080/19427867.2020.1852504
- Banomyong & Beresford (2001). Multimodal transport: the case of Laotian garment exporters. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 31 No. 9, pp. 663-685. # MCB University Press, 0960-0035
- Kang Kai, et al (2009). Improved integrated optimization Model research of mode and route in multimodal transportation. 2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, pp. 621-624, doi: 10.1109/ICIII.2009.155.
- Wang Qingbin & Han Zengxia (2010) The Optimal Routes and Modes Selection in Container Multimodal Transportation Networks. 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing, pp 573 – 576, doi: 10.1109/ICOIP.2010.276.
- Tang Liansheng & Huo Jiazhen (2011). Multimodal Transport Distribution Network Design with Time Window. 2011 International Conference on Management and Service Science, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICMSS.2011.5998316.
- Bing Wang & Xiaoli Wang (2013). Genetic Algorithm Application for Multimodal Transport Networks. Information Technology Journal, vol 12, pp 1263-1267, doi: 10.3923/itj.2013.1263.1267.

- Guiwu Xiong & Yong Wang (2014). Best routes selection in multimodal networks using multi-objective genetic algorithm. *J Comb Optim*, vol 28, pp 655–673. <https://doi.org/10.1007/s10878-012-9574-8>
- Yan Sun & Maoxiang Lang (2015). Modeling the Multicommodity Multimodal Routing Problem with Schedule-Based Services and Carbon Dioxide Emission Costs. *Mathematical Problems in Engineering*, pp 1-21, doi: 10.1155/2015/406218.
- Anthony Beresford, et al (2011). Multimodal supply chains: iron ore from Australia to China, *Supply Chain Management*, Vol. 16 No. 1, pp. 32-42. <https://doi.org/10.1108/13598541111103485>
- Ying WANG & Gi-Tae YEO (2016). A Study on International Multimodal Transport Networks from Korea to Central Asia: Focus on Secondhand Vehicles. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Volume 32, Issue 1, Pages 41-47, <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2016.03.005>.
- Haiyan Luo, et al (2018). Path and Transport Mode Selection in Multimodal Transportation with Time Window. 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), pp. 162-166, doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577563.
- Yan Liu & Lingyun Wei (2018). The optimal routes and modes selection in multimodal transportation networks based on improved A* algorithm. 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp. 236-240, doi: 10.1109/IEA.2018.8387103.
- Xiaozhen Mi, et al (2019). Study on Optimal Routes of Multimodal Transport under Time Window Constraints. 2019 IEEE 23rd International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), pp. 512-516, doi: 10.1109/CSCWD.2019.8791930
- Zhaojin Li, et al (2021). An effective kernel search and dynamic programming hybrid heuristic for a multimodal transportation planning problem with order consolidation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 152. Doi: 102408. [10.1016/j.tre.2021.102408](https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102408).

- Mnif & Bouamama (2017). A multi-objective formulation for multimodal transportation network's planning problems. 2017 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, Pp 144-149, doi: 10.1109/SOLI.2017.8120985.
- Mnif & Bouamama (2019). A New Multi-Layer Distributed Approach for a Multi-objective Planning Problem. 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems. Procedia Computer Science 159, pp 1406–1420, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.311
- Orjuela, J., et al (2016). Effects of Using Multimodal Transport over the Logistics Performance of the Food Chain of Uchuva. Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2016. Communications in Computer and Information Science, vol 657. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_15
- Bortolini, M. et al (2016). Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization. Journal of Food Engineering, Volume 174, Pages 56-67, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.014>.
- Maneengam, A (2020). A Bi-Objective Programming Model for Multimodal Transportation Routing Problem of Bulk Cargo Transportation. 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp. 890-894, doi: 10.1109/ICIEA49774.2020.9101982.
- Bai, Y., et al (2017). Transportation Cost Modeling of Containerized Soybean Exports in the United States. Journal of the Transportation Research Board, No. 2611, pp. 19–31. doi: 10.3141/2611-03
- Kaewfak, K. et al (2021). Multi-objective Optimization of Freight Route Choices in Multimodal Transportation. International Journal of Computational Intelligence Systems. Vol 14, pp 794- 807, doi: 10.2991/ijcis.d.210126.001.
- Koohathongsumrit & Meethom (2021). Route selection in multimodal transportation networks: a hybrid multiple criteria decision-making approach. Journal of Industrial and Production Engineering, vol 38:3, pp 171-185, DOI: 10.1080/21681015.2020.1871084

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. México D.F.: McGraw-Hill.
- Galeano, M. (2004). Diseño de proyectos en la investigación cualitativa. Eafit. Medellín. Capítulo 1.
- Asoexport (2020). Boletín de Comercio Exterior Año Calendario 2019. Asoexport. https://asoexport.org/wp-content/uploads/2020/03/Boleti%CC%81n_de_Comercio_Exterior_An%CC%83o_Calendario_2019.pdf
- Asoexport (2021). Analdex: Crisis marítima en puertos de China y EEUU cuadruplicó el preci de los fletes. Tomado de: <https://www.analdex.org/2021/08/31/crisis-maritima-en-puertos-de-china-y-ee-uu-cuadruplico-los-precios-de-los-fletes/>
- ANDI (2021). Transporte multimodal: retos para mejorar la competitividad logística de Colombia. Tomado de: <http://www.andi.com.co/Home/Noticia/16014-transporte-multimodal-retos-para-mejora>
- Ministerio de Transporte (2022). Publicaciones: Hasta 598 toneladas de carga se podrán movilizar por la red férrea que comunica La Dorada (Caldas) con el puerto de Santa Marta. Tomado de: mintransporte.gov.co/publicaciones/10581/hasta-598-toneladas-de-carga-se-podran-movilizar-por-la-red-ferrea-que-comunica-la-dorada-caldas-con-el-puerto-de-santa-marta/
- Resat, H & Turkay, M. (2015). Design and operation of intermodal transportation network in the Marmara region of Turkey. Transportation Research Part E, vol. 83, p. 16–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.006>
- Ralf Elbert, Jan Philipp Müller & Johannes Rentschler, (2020) Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review, Research in Transportation Business & Management, Volume 35, 2020, 100462, ISSN 2210-5395, <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100462>.
- Kuehne Nagel (2020). Información. Incoterms 2020. Tomado de: <https://co.kuehne-nagel.com/-/informacion/incoterms>
- Ministerio de Transporte (2021). Transporte en cifras 2021. Tomado de: <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/9443/transporte-en-cifras/>

Empresas exportadoras (2021) Exportar. Registro de empresas exportadoras de café en Colombia. Tomado de: <https://federaciondecafeteros.org/wp/exportacion/>

Ministerio de transporte (2022) Registro Nacional de Carga. Tomado de: <https://rndc.mintransporte.gov.co/MenuPrincipal/tabid/204/language/es-MX/Default.aspx?returnurl=%2f>

Compañía Operadora Portuaria Cafetera (s.f.) Operaciones y servicios. COPC. Tomado de: <http://www.copcsa.com/category/operaciones-y-servicios/servicios/>

DIAN (2021). ABC DIAN Aspectos básicos de exportación. Tomado de: <https://www.dian.gov.co/aduanas/Regimen-de-Aduanas/Documents/ABC-Aspectos-basicos-Exportacion.pdf>

Sicex (2018) Top 5 de líneas navieras que ingresan a Colombia de enero a abril. Tomado de: <https://sicex.com/blog/top-5-de-lineas-navieras-que-ingresan-a-colombia-de-enero-a-abril/>

International Chamber of Commerce – ICC – (2020) Resources for business. Incoterm Rules. Tomado de: <https://iccwbo.org/resources-for-business/incoterms-rules/incoterms-2020/>

International Chamber of Commerce – ICC – (2010) Resources for business. Incoterm Rules. Tomado de: <https://iccwbo.org/resources-for-business/incoterms-rules/incoterms-rules-2010/>

Impala Terminals (2020). Webinar logístico. Tomado de: <https://grupozfb.com/wp-content/uploads/2020/10/PPT-Impala-Terminals-webinar-logistica-2020.pptx.pdf>

Ministerio de Transporte de la República de Colombia (2013) Decreto número 2228 de 2013. Tomado de: <https://web.mintransporte.gov.co/jspui/handle/001/96>

Banco Mundial (1996) Glosario del Banco Mundial. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Tomado de: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/541831468326979631/pdf/322800PUB00PUB0d0bank0glossary01996.pdf>

García, H., et al. (2013). Simulación y Análisis de sistemas con ProModel. Segunda Edición, Mexico: Pearson. Tomado de: <https://cffgblog.files.wordpress.com/2017/03/libro->

simulacion-y-analisis-de-sistemas-2da
edicion.pdf#page=14&zoom=100,105,120

- Superintendencia de Transporte (2022). Tarifas Sociedades Portuarias y Fluviales. Tomado de: <https://www.supertransporte.gov.co/index.php/superintendencia-delegada-de-puertos/tarifas-sociedades-portuarias-y-fluviales/>
- Ministerio de Transporte (2021). Comunicado de prensa: Ministerio inicia capacitaciones para que transportadores de carga usen de manera adecuada la herramienta del SICETAC. Tomado de: <https://www.andi.com.co/Uploads/COMUNICADO%20SICETAC%2019%20DE%20MAYO%202021.pdf>
- Asociación Nacional de Instituciones Financieras – ANIF – (2014). Costos de transporte, Multimodalismo y la competitividad de Colombia. Tomado de: <https://www.infraestructura.org.co/nuevapagweb/descargas/Multimodalismo.pdf>
- Verga, J., Silva, R.C., Yamakami, A. (2018). Multimodal Transport Network Problem: Classical and Innovative Approaches. In: Cruz Corona, C. (eds) Soft Computing for Sustainability Science. Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol 358. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62359-7_14
- Elbert, R., Müller, J., Rentschler, J. (2020). Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review. Research in Transportation Business & Management, Volume 35, 2020, 100462, ISSN 2210-5395. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100462>.
- Hamburg Sud (s.f.). Ocean Tariff. Hamburg Sud. Tomado de: <https://www.hamburgsud.com/ocean-tariff/>
- Hapag Lloyd (s.f.). Quick Quotes. Hapag Lloyd. Tomado de: <https://solutions.hapag-lloyd.com/quick-quotes/#/>
- PROMODEL (s.f.) Products. Tomado de: <https://www.ProModel.com/products/ProModel>
- Aznar, J. & Guijarro, F. (2012). Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València