

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil Industrial



**SIMULACIÓN DE UNA RED LOGÍSTICA ESPECÍFICA DE LA REGIÓN DEL
BIOBÍO**

MATÍAS IGNACIO ZAMORANO LABBÉ
INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

Profesor Guía

Dr. Jorge Beyer Barrientos

Profesor Informante

Sr. Omar Salgado

Concepción, Septiembre 2015.

I. RESUMEN

Este proyecto se lleva a cabo para el estudio de una red específica compuesta desde Arauco hacia los Puertos de San Vicente y Talcahuano poniendo especial énfasis en lo que ocurre en la Ruta 160, ubicada en la Región del Biobío que es uno de los centros de exportación más importantes en la economía del país.

El propósito de este Proyecto de Título fue realizar una simulación de tránsito en el *software* de simulación Flexsim, para demostrar que una herramienta con base en la simulación para estudios de tránsito puede llegar a ser potentísima dada las características que presenta, puesto que permite realizar proyecciones a futuro y evaluar las alternativas propuestas para el mejoramiento o solución de un problema específico sin necesidad de interactuar directamente con el sistema real. Por esta razón, se decidió proponer una metodología que integrara el método de simulación perteneciente al Dr. Jerry Banks, experto en Simulación, Tecnología y Logística, el cual es uno de los más conocidos, con aspectos importantes de la Ingeniería de Tránsito.

Un punto a tener en cuenta es el aumento considerable que el parque vehicular está teniendo en los últimos años, lo que puede ocasionar problemas al momento de querer lograr que la cadena logística funcione correctamente, es por ello, que la región debe contar con una infraestructura logística adecuada para llegar a los puertos de manera eficiente. Por lo tanto, se hizo una proyección de los flujos vehiculares en base al aumento del parque vehicular de la región y de esa manera recopilar los datos necesarios para la construcción del modelo de simulación.

El presente informe se enfoca en el desarrollo de una herramienta que sea capaz de simular el comportamiento de tráfico de la red en estudio y así evaluar los dos escenarios propuestos: 1) Proyecto en construcción de la “Tercera pista en la Ruta 160”, y 2) el – supuesto– Proyecto del “Cuarto puente para vehículos pesados”. Con el fin de determinar cuan viables son dichas alternativas de cara al futuro.

II. ABSTRACT

This project is conducted for the study of a specific network made from Arauco to the ports of San Vicente and Talcahuano with emphasis on what happens on Route 160, located in the Bio Bio Region which is one of the most important centers of export in the country's economy.

The purpose of this Project it was perform a traffic simulation on the simulation *software* Flexsim, to show that a tool based on simulation for traffic studies can be powerful given the characteristics presented, since it allow to make projections to future and evaluate alternative proposals for improving or solving a specific problem without directly interacting with the actual system. For this reason, it was decided to propose a methodology to integrate the simulation method belonging to Dr. Jerry Banks, expert in Simulation, Technology and Logistics, which is one of the best known, with important aspects of Traffic Engineering.

A point to note is the significant increase that the vehicle fleet is having in recent years, which can cause problems when is wanted to achieve that the supply chain works properly, therefore, the region must have a logistics infrastructure adequate to reach ports efficiently. Hence, it was made a projection of traffic flows based on the increase of the vehicle fleet in the region and thus collect the data necessary for the construction of the simulation model.

This report focuses on the development of a tool that is able to simulate the behavior of the traffic network in study and thus assess the two proposed scenarios: 1) The ongoing project the “third track on Route 160”, and 2) the -supposed- project of “fourth bridge for heavy vehicles”. In order to determine how viable are these alternatives for the future.

III. AGRADECIMIENTOS

Dedicado a mis padres Luz y Alejandro, mis hermanos Felipe y Eduardo, mi sobrino Francisco y mi sobrina y ahijada Isidora que esperamos ahora por fin se pueda poner con algo el “Nano”...Y en especial a Mi Negrita Nicole pilar fundamental para ponerme las pilas. Gracias a todos y cada uno de los que participaron en mi época universitaria por ayudar de una u otra manera a sacar esto adelante.

IV. ÍNDICE

I.	RESUMEN	i
II.	ABSTRACT	ii
III.	AGRADECIMIENTOS	iii
IV.	ÍNDICE	iv
V.	ÍNDICE DE DIAGRAMAS	vii
VI.	ÍNDICE DE GRÁFICOS	vii
VII.	ÍNDICE DE FIGURAS	vii
VIII.	ÍNDICE DE TABLAS	viii
IX.	ÍNDICE ANEXOS	x
1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Presentación del Tema	1
1.2	Objetivo General	3
1.3	Objetivos Específicos	3
1.4	Justificación de la Propuesta	4
1.5	Delimitación de la Propuesta	5
1.6	Metodología aplicada	6
1.7	Contenido de los capítulos siguientes	6
2	MARCO TEÓRICO	7
2.1	Conceptos teóricos de Simulación	7
2.1.1	Pasos para un Estudio de Simulación	7
2.1.2	Ventajas y desventajas de la simulación	11
2.1.3	Software de simulación Flexsim	12
2.1.4	Simulación en Estudios de Tránsito en Flexsim	12

2.2	Modelos básicos del flujo vehicular	13
2.2.1	Modelo Lineal	14
2.2.2	Modelos No Lineales	14
2.3	La logística como motor de competitividad	15
2.3.1	Definición y estructura de los costos logísticos	16
2.3.2	Diagnóstico logístico para Chile	17
3	METODOLOGÍA PROPUESTA	20
4	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	23
4.1	Formulación del problema	23
4.2	Fijación de objetivos y plan general del proyecto de simulación	24
4.3	Modelo de conceptualización	25
4.3.1	Estudio piloto	25
4.4	Recopilación de datos	29
4.5	Modelo de traducción	35
4.6	Verificación	41
4.7	Validación	42
4.8	Diseño experimental	44
4.8.1	Suplementos	44
4.8.2	Escenarios	45
4.9	Ejecuciones de producción y análisis	48
4.9.1	Escenario propuesto N°1: Proyecto en proceso de construcción ‘Tercera pista Ruta 160’	48
4.9.2	Escenario propuesto N°2: Suposición Proyecto ‘Cuarto puente para vehículos pesados o de carga’ que busca descongestionar la Ruta 160 sector de acceso a los puentes	53

4.10	Considerar un número mayor de ejecuciones	58
4.11	Documentación e Implementación u Opciones de Aplicación	58
5	RESULTADOS	59
5.1	Modelar las rutas de la Red por tramos/secciones de acuerdo a las especificaciones que cada segmento contempla en el <i>software</i> Flexsim	59
5.2	Realizar un análisis estadístico de la situación actual y de los escenarios propuestos y modelados en el simulador para el horario punta	59
5.3	Evaluar la viabilidad de los escenarios propuestos frente a la proyección de los flujos vehiculares para el horario punta de la mañana	62
5.4	Generar una metodología de trabajo para la construcción de estudios de este tipo, que permita analizar proyectos viales antes de su puesta en marcha	64
6	CONCLUSIONES	65
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
8	ANEXOS	70
	Anexo A: Flujos vehiculares estimados y Tiempo entre llegadas (Tasas esperadas Θ)	70
	Anexo B: Longitud y Velocidades para cada tramo del Modelo.	72
	Anexo C: Porcentajes de distribución a Puertos.	73
	Anexo D: Tabla de Resultados, tiempos promedios (segundos) luego de las 12 ejecuciones para cada Modelo simulado en Flexsim.	74
	Anexo E: Programación de Motores del Simulador.	78

V. ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1: Metodología de Simulación de Jerry Banks.	10
Diagrama 2: Metodología Propuesta de Simulación de Tránsito en Flexsim.	20
Diagrama 3: Diagrama lógico de Simulación de Tránsito.	36

VI. ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Estructura media de los costos logísticos.	16
Gráfico 2: Costos logísticos como porcentaje del valor del producto.	17
Gráfico 3: Parque vehicular últimos 5 años.	31
Gráfico 4: Comparación tiempo de viaje actual (2015) con cada escenario.	57
Gráfico 5: Comparación Situación Actual y Modelo Nuevo (3P).	63
Gráfico 6: comparación Situación Actual y Modelo Nuevo II (4° Puente).	64

VII. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Trayecto Arauco hacia Puertos de Talcahuano y San Vicente.	23
Figura 2: Objetos utilizados en Estudio Piloto.	26
Figura 3: Representación de los elementos utilizados en el simulador para estudio piloto.	27
Figura 4: Representación de los elementos utilizados en el simulador para estudio piloto.	28
Figura 5: Representación gráfica de la escala aplicada en el simulador Flexsim.	37
Figura 6: Modelo real construido en Flexsim, primer ejemplo: vista amplia.	38
Figura 7: Modelo real construido en Flexsim, segundo ejemplo: zoom en carretera.	38
Figura 8: Modelo real construido en Flexsim, tercer ejemplo: zoom a puentes.	39
Figura 9: Marcadores de tiempo en Flexsim.	39
Figura 10: Sección San Pedro de la Paz - Puente Juan Pablo II – Pedro Aguirre Cerda, situación actual.	46
Figura 11: Sección San Pedro de la Paz – Puente Juan Pablo II – Pedro Aguirre Cerda, escenario 3° pista.	46

Figura 12: Idealización posible cuarto puente para vehículos pesados. 47

VIII. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Flujos vehiculares de puntos estratégicos de la red simulada (año 2010).	30
Tabla 2: Parque vehicular últimos 5 años.	30
Tabla 3: Rangos de flujo vehicular año 2010.	31
Tabla 4: Rangos flujo vehicular estimados año 2011-2015.	32
Tabla 5: Rangos flujo vehicular estimados año 2016-2020.	33
Tabla 6: Estimación flujo vehicular Ruta 160 (San Pedro de la Paz) de 2010 a 2020.	33
Tabla 7: Distancia total y velocidad estimada de cada tramo utilizado en el simulador.	34
Tabla 8: Transformación de velocidades a unidades Flexsim.	34
Tabla 9: Flujos ocupados en el simulador para situación actual.	40
Tabla 10: Tasas y sus respectivas distribuciones estadísticas para situación actual.	40
Tabla 11: Estadística descriptiva de Fuente Arauco a Puertos San Vicente o Talcahuano.	43
Tabla 12: Número de réplicas necesarias para validación.	43
Tabla 13: Validación en base a tiempo en sistema.	44
Tabla 14: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘tercera pista Ruta 160’ (para los dos kilómetros construidos) para el año 2015.	48
Tabla 15: Diferencia de tiempo entre Modelo Actual y Nuevo (2K) 2015.	48
Tabla 16: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘tercera pista Ruta 160’ (Modelo Nuevo) para el año 2015.	49
Tabla 17: Diferencia de tiempo entre Modelo Actual y Nuevo 2015.	49
Tabla 18: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2016 y 2015.	50
Tabla 19: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2016 y 2015.	50
Tabla 20: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2017 y 2015.	50
Tabla 21: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2017 y 2015.	50
Tabla 22: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2018 y 2015.	51
Tabla 23: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2018 y 2015.	51
Tabla 24: Comparación Tiempo de Viaje de proyección 2018 y Modelo Actual 2015.	51

Tabla 25: Diferencia de tiempo entre proyección 2018 y Modelo Actual 2015.	52
Tabla 26: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2015 y 2019.	52
Tabla 27: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2019 y 2015.	52
Tabla 28: Comparación Tiempo de Viaje Modelo Actual y proyección año 2019.	53
Tabla 29: Diferencia de tiempo entre proyección 2019 y Modelo Actual 2015.	53
Tabla 30: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2018.	54
Tabla 31: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2018 y Modelo Nuevo 2015.	54
Tabla 32: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2019.	54
Tabla 33: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2019 y Modelo Nuevo 2015.	55
Tabla 34: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2020.	55
Tabla 35: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2020 y Modelo Nuevo 2015.	55
Tabla 36: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2025.	56
Tabla 37: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2025 y Modelo Nuevo 2015.	56
Tabla 38: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2025 en comparación a Situación Actual (2015).	56
Tabla 39: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2025 y Modelo Actual 2015.	56
Tabla 40: Ejemplo de flujo vehicular R-160 año 2010.	60
Tabla 41: Ejemplo de Tiempos entre llegadas R-160 año 2015.	61
Tabla 42: Ejemplo del Tiempo de viaje total año 2015.	61
Tabla 43: Comparación Tiempos de viaje Situación Actual y Escenario N°1.	62
Tabla 44: Comparación Tiempos de viaje Situación Actual y Escenario N°2.	62
Tabla 45: Comparación Tiempo de viaje Escenarios N°1 y N°2.	62

IX. ÍNDICE ANEXOS

Tabla Anexo A. 1: Tasas esperadas Fuente R-160 Ar / Lo / Co de 2010 a 2020.	70
Tabla Anexo A. 2: Tasas esperadas Fuente R-160 SP de 2010 a 2020.	70
Tabla Anexo A. 3: Tasas esperadas Fuente R-156 y Chgte de 2010 a 2020.	71
Tabla Anexo A. 4: Tasas esperadas Fuente Las Golondrinas de 2010 a 2020.	71
Tabla Anexo B. 1: Velocidades estimadas y transformadas a unidades del Simulador para flujos libre.	72
Tabla Anexo B. 2: Velocidades estimadas y transformadas a unidades del Simulador para flujos congestionados.	72
Tabla Anexo C. 1: Porcentajes de distribución a puerto.	73
Tabla Anexo C. 2: Distribución Salida de San Pedro de la Paz hacia Puentes.	73
Tabla Anexo D. 1: Tiempo de viaje total estimado Modelo Actual año 2015.	74
Tabla Anexo D. 2: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2015.	74
Tabla Anexo D. 3: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2016.	75
Tabla Anexo D. 4: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2017.	75
Tabla Anexo D. 5: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2018.	75
Tabla Anexo D. 6: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2019.	76
Tabla Anexo D. 7: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2018.	76
Tabla Anexo D. 8: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2019.	76
Tabla Anexo D. 9: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2020.	77
Tabla Anexo D. 10: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2025.	77
Figura Anexo E 1: Ejemplo programación de motores del simulador.	78

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación del Tema

Este proyecto de tesis nace a raíz de la necesidad que la Región del Biobío tiene de cara al futuro respecto del incremento significativo que en las últimas décadas ha tomado el sector exportador de la región, transformándose en el tercer PIB de los centros de exportación más importantes de la economía del país, de acuerdo a las Cuentas Nacionales de Chile 2013 entregadas por el Banco Central. Donde la Región del Biobío debe mantener esa posición y no perder competitividad tanto a nivel nacional como internacional producto de factores externos que puedan perjudicar el correcto funcionamiento de su cadena logística.

Hay que considerar que las exportaciones de la región están en alza, con exportaciones del orden de MMUS\$ 5000 (2013) y que entre Enero-Julio de 2014 con respecto a 2013 hay un aumento de más de MMUS\$ 100, y que de acuerdo al último boletín de movimiento de carga entregado por el INE Biobío en marzo de 2015, la carga portuaria movilizada y manipulada regional se incrementó en un 1,6% en doce meses.

Por lo tanto, se debe contar con la infraestructura logística adecuada, que vaya de la mano con el aumento de la exportación, puesto que el parque vehicular de la región está en constante incremento, lo cual de por sí, trae aún más problemas de congestión habiendo las mismas rutas y de esta manera puede perjudicar el correcto funcionamiento del sistema logístico de las empresas a la hora de llevar a cabo sus labores de exportación, y de esa manera incurrir en costos logísticos aún más elevados. Consecuencia de este escenario puede ser la pérdida de competitividad, es por ello que se pretende incentivar a la industria logística y agilizar los procesos de toma de decisiones del sector público y privado, cuyo objetivo es fortalecer el desarrollo del sector exportador de la región.

El sector público así como el sector privado deben tomar decisiones respecto a mejoras y nuevas infraestructuras y servicios logísticos. Estas inversiones son de grandes montos. Por lo tanto, debe realizarse un riguroso análisis del comportamiento futuro de dichas infraestructuras y servicios. Estas inversiones pueden enfrentar diversos escenarios, los

cuales se deben considerar en los procesos de análisis. Con todo lo anterior vemos la simulación (uso de valores aleatorios y peak de datos) como un instrumento útil para plantear los escenarios actuales y futuros, y de esta manera analizar alternativas en términos técnicos y evaluar si producen mejoras, como por ejemplo observar reducciones en la congestión vehicular que den pie a disminución de tiempos de viaje y posterior baja en los costos logísticos. Y de esta manera ayude a la toma de decisiones de inversiones en infraestructura logística pública y/o privada que así lo deseen.

Por consiguiente, este proyecto de tesis se orienta a desarrollar una herramienta capaz de predecir el comportamiento de tráfico de la red logística compuesta desde la Ruta 160 (Arauco) hasta los Puertos de San Vicente y Talcahuano por medio de la simulación de un modelo sistémico, utilizado en el *software* Flexsim, y así contribuir como un instrumento de bien público a la hora de tomar decisiones.

1.2 Objetivo General

Desarrollar una herramienta ingenieril capaz de simular el comportamiento de tráfico de la Red compuesta desde la Ruta 160 (Arauco) hacia los Puertos de San Vicente y Talcahuano por medio del *software* Flexsim, con el fin de ayudar en la toma de decisiones de inversión en infraestructura logística tanto pública como privada.

1.3 Objetivos Específicos

- Modelar las rutas de la Red por tramos/secciones de acuerdo a las especificaciones de cada segmento mediante el uso del *software* Flexsim.
- Realizar un análisis estadístico de la situación actual y de los escenarios propuestos y modelados en el simulador para el horario punta.
- Evaluar la viabilidad de los escenarios propuestos frente a la proyección de los flujos vehiculares para el horario punta.
- Generar una metodología de trabajo para la construcción de estudios de este tipo, que permita analizar y evaluar proyectos viales en el proceso de toma de decisiones.

1.4 Justificación de la Propuesta

La Región del Biobío se ha convertido en el soporte logístico del sur del país, esto se debe a que cuenta con un gran número de puertos disponibles, siendo una de las regiones con mayor cantidad de carga con 10,2 Millones de toneladas el año 2014. Además, cuenta con redes viales pavimentadas y red ferroviaria, conectadas directamente con el aeropuerto y los puertos marítimos (Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas – Biobío, 2014).

Cabe destacar que en las últimas décadas el sector exportador de la región (forestal, pesquero y agroalimentario) ha incrementado su producción considerablemente y es por ello que es de vital importancia contar con la infraestructura portuaria, vial y ferroviaria adecuada para el posterior desarrollo del comercio exterior tanto a nivel nacional como regional (Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas – Biobío & Aduanas Chile, 2013).

Cabe señalar, que se han visto sobrecargados en momentos los sistemas logísticos actuales, provocando problemas de congestión vehicular en la red logística, por ejemplo, un punto crítico de acuerdo a estadísticas entregadas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) en 2013, durante los horarios punta mañana en la Ruta 160 – Av. Pedro Aguirre Cerda, los vehículos deben recorrer alrededor de 10 kilómetros congestionados a velocidades entre los 25 y 35 kilómetros por hora.

En consecuencia a lo anteriormente mencionado, respecto de la sobrecarga de los sistemas logísticos actuales, se observa que obedece al aumento del parque vehicular en la región y aumento de la carga, causando aún más congestión. Con datos de la base del INE (2013) confirmamos la información:

- Aumento del parque vehicular en los últimos 10 años es de un 96,1%, lo que arroja una tasa anual de crecimiento de un 8% aproximadamente.
- La Región del Biobío es la segunda región del país con mayor parque vehicular con un 10,7%, lo que equivale aproximadamente a 440.000 vehículos motorizados, donde un 90,3% corresponde a transporte particular, un 5,8% a transporte de carga y un 3,9% a transporte público.

Además, de la infraestructura vial, existen otros factores que determinan los costos logísticos éstos corresponden a: Transporte 60%, administrativo 20% y financiero 20%, aproximadamente. (Esto se ve con más claridad en el Capítulo 2.3.1 Definición y estructura de los costos logísticos, p.16 y 17)

De acuerdo a lo expuesto, queda en evidencia lo atractiva que es nuestra región de cara al desarrollo de los negocios de exportación, es por ello que invertir en infraestructura logística traería un mejor desarrollo a la región del Biobío. Y he aquí la oportunidad de desarrollar una herramienta cuyo fin es ayudar a la toma de decisiones en futuras inversiones de infraestructura logística tanto pública como privada.

1.5 Delimitación de la Propuesta

- El proyecto tuvo como fin desarrollar una herramienta capaz de predecir mediante la simulación a través del *software* Flexsim el comportamiento de tráfico de la red logística compuesta desde la Ruta 160 (Arauco) hacia los puertos de San Vicente y Talcahuano.
- No se consideró el puerto de Coronel para esta tesis, pues el proyecto corresponde al estudio del trayecto continuo desde Arauco (Ruta 160) hacia los puertos de San Vicente y Talcahuano.
- El estudio se realizó sólo en el sentido Arauco hacia Puertos, pues el flujo de ida en el horario punta mañana es prácticamente el mismo para el flujo de vuelta en el horario punta tarde, que son los horarios más críticos de la red.
- El área de trabajo abarcada en el proyecto es la Región del Biobío.
- No se trabajó con datos reales, sino con datos estándares a partir de magnitudes reales.
- El proyecto se llevó a cabo mediante la simulación, a través de un modelo sistémico.
- El proyecto se efectuó durante el segundo semestre de 2014 y el año 2015.

1.6 Metodología aplicada

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, tuvo como base la metodología que se aplica en los estudios de simulación propuesta por Jerry Banks. Esta metodología se lleva a cabo efectuando los siguientes doce pasos:

1. Formulación del problema
2. Determinación de objetivos y plan general de proyecto
3. Modelo de conceptualización
4. Recolección de datos
5. Modelo de traducción
6. Verificación
7. Validación
8. Diseño experimental
9. Ejecuciones de producción y análisis
10. Considerar más ejecuciones
11. Documentación y presentación de informes
12. Implementación, aplicación o puesta en marcha

Durante el marco teórico se explicará con detalle el proceso en cada etapa para el correcto funcionamiento de la simulación.

1.7 Contenido de los capítulos siguientes

En los capítulos siguientes, se expondrán conceptos teóricos de simulación, explicando la metodología utilizada para el estudio de simulación del presente proyecto. Se detallarán las etapas de trabajo realizadas para llevar a cabo el objetivo de confeccionar una herramienta que pueda simular el comportamiento de la Red estudiada y se interpretarán los resultados del modelo de simulación presentado.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos teóricos de Simulación

La simulación consiste en construir un modelo que describa el comportamiento de un sistema, y proceder a experimentar con el modelo para llegar a conclusiones que apoyen la toma de decisiones (David Ríos, Sixto Ríos & Jacinto Martín, 2000).

La simulación no es una técnica de optimización. Más bien es una técnica para estimar las medidas de desempeño del sistema modelado (Winston, 1994).

Conforme a estas dos definiciones, se puede decir que, simulación implica crear un modelo que sea capaz de representar un sistema real, y así experimentar con él para predecir posibles comportamientos del sistema, entregando datos que pueden ser de ayuda a la hora de tomar decisiones.

De acuerdo a lo anterior, hay dos términos que interactúan continuamente, estos son, modelización y simulación. Con esta definición relacionamos, principalmente, tres elementos: sistema, modelo y ordenador (*software*). Estos elementos están conectados por medio de las relaciones modelización y simulación. La modelización relaciona los sistemas reales y los modelos, y estudia la validez de éstos, es decir, la forma en que el modelo representa un sistema real. La simulación relaciona modelos y ordenador (*software*), y se refiere al proceso de imitación de aspectos importantes del comportamiento del sistema en tiempo real, comprimido o expandido, mediante la experimentación con el modelo del sistema.

2.1.1 Pasos para un Estudio de Simulación

De acuerdo a lo expuesto, los pasos a seguir en un estudio de simulación son:

- i. **Formulación del Problema:** cada estudio debe comenzar con una declaración del problema. Si la declaración es proporcionada por quienes tienen el problema, el

analista de simulación debe asegurarse de que el problema quede comprendido a cabalidad. En caso que la formulación sea desarrollada por el analista de simulación, es de suma importancia que el cliente comprenda y esté conforme con ella.

- ii. **Determinación de Objetivos y Plan General de Proyecto:** los objetivos indican las preguntas que van a ser respondidas por medio de la simulación. El plan de proyecto debe incluir una declaración de los distintos escenarios estudiados, como también el tiempo que tomara en llevarse a cabo el estudio, personal involucrado, requerimientos de *hardware* y *software*, etapas y costos, y finalmente resultados esperados del estudio.
- iii. **Modelo de Conceptualización:** extracción de características del sistema real para su posterior modelado, es decir, fundar relaciones lógicas entre las componentes y la estructura del sistema. Es recomendable comenzar a modelar desde los más sencillo o básico hasta lograr el modelo deseado.
- iv. **Recolección de Datos:** recopilación de los datos necesarios para la construcción del modelo. A medida que el modelo pudiese pasar por cambios, los elementos de información también podrían cambiar. Esta etapa, a veces, consume una gran parte del tiempo total requerido para el estudio de simulación.
- v. **Modelo de Traducción:** una vez realizado el modelo conceptual, el modelador decide si lo debe programar en un lenguaje de simulación, o utiliza un *software* de simulación, o lo ejecuta con un algoritmo propio.
- vi. **Verificación:** la verificación apunta a la forma en que está operando el modelo, confirmar que funciona correctamente, sin haber sido comparado con el sistema real. Es por ello, que las revisiones deben ser minuciosas durante la construcción del modelo y no realizarlas solo al final del proceso.
- vii. **Validación:** la validación es el proceso de calibración del modelo, aquí es comparado con el comportamiento real del sistema, este proceso se repite hasta que el comportamiento de ambos (modelo y sistema real) sea prácticamente el mismo. Cabe destacar que este es el paso más importante, y de este punto depende el éxito del modelo de simulación.

- viii. **Diseño Experimental:** este paso consiste en simular las propuestas que buscan mejorar la realidad del sistema simulado, o simplemente para experimentar. Las decisiones deben formularse en relación a la duración de la simulación y el número de repeticiones.
- ix. **Ejecuciones de Producción y Análisis:** se realiza un número apropiado de ejecuciones en el modelo propuesto, para estimar las medidas de rendimiento del sistema que se está simulando, y posteriormente de esa manera compararlas con el modelo simulado de la realidad.
- x. **Considerar más ejecuciones:** considerando el análisis de las ejecuciones totalmente ejercidas, el analista debe decidir la necesidad de realizar o no más ejecuciones para determinados experimentos, a fin de cumplir el objetivo planteado.
- xi. **Documentación y Presentación de Informes:** la necesidad de documentar referentemente el modelo de simulación en la eventualidad de ser utilizado nuevamente, ya sea por el mismo analista o por otros. Además, puede requerirse algún tipo de modificación, lo cual facilitaría el proceso consultando la documentación pertinente. Cabe destacar que el resultado de todo el análisis debe ser informado de manera clara y precisa, para que cualquier persona que desee consultar el documento pueda revisar la estructura final del problema, las propuestas, los resultados obtenidos de los experimentos y las recomendaciones finales por parte de los analistas, a la hora de tomar decisiones.
- xii. **Implementación, Aplicación o puesta en marcha:** corresponde a la aplicación de los resultados obtenidos en el sistema real. Su éxito depende de la calidad de los pasos anteriores y de la participación del cliente durante el estudio de simulación. Agregar que en caso de tratarse de estudios de investigación donde no hay un cliente definido, este último paso es opcional.

METODOLOGÍA DE UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN

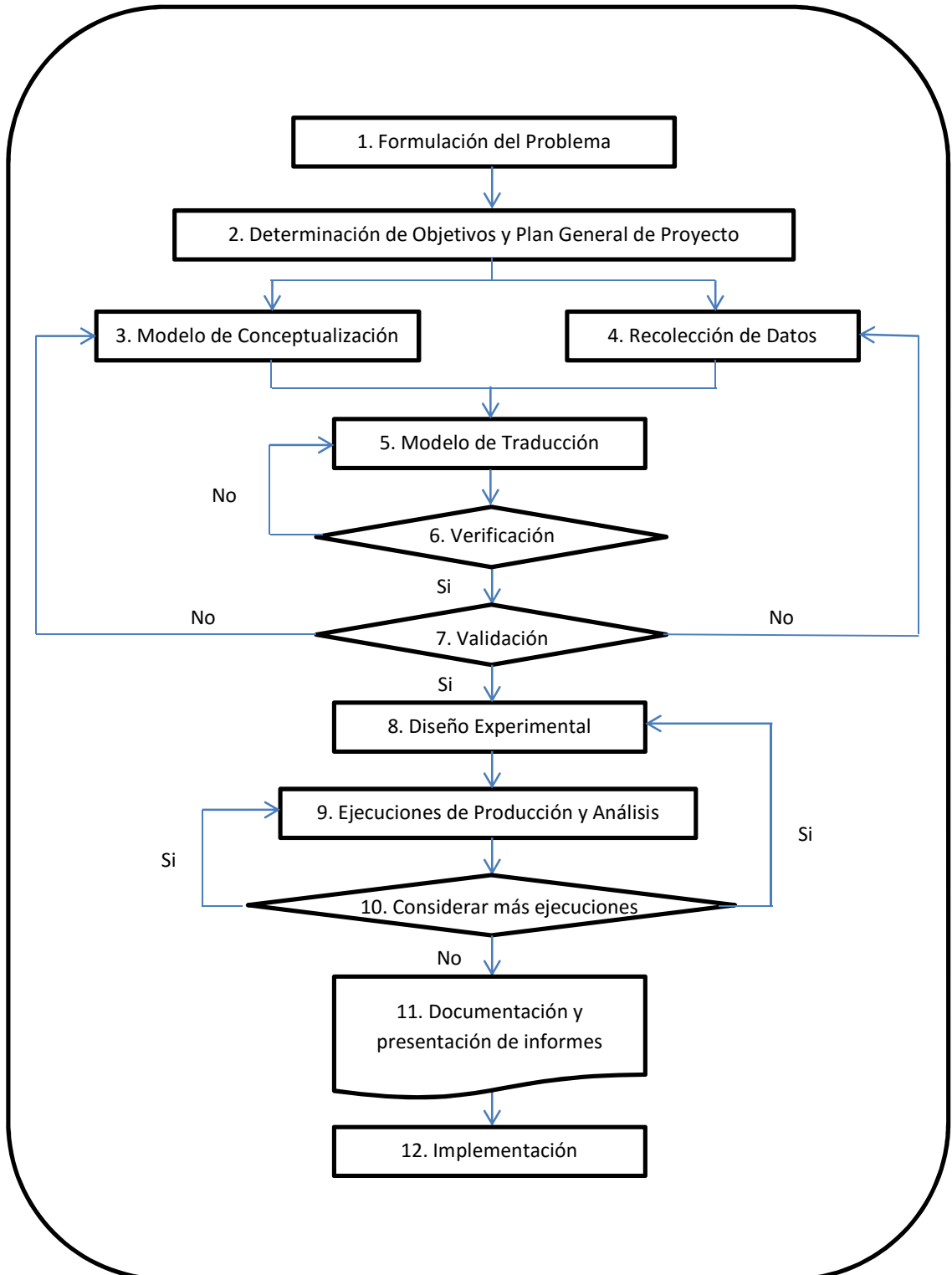


Diagrama 1: Metodología de Simulación de Jerry Banks.

2.1.2 Ventajas y desventajas de la simulación

La simulación como toda técnica de estudio cuenta con ventajas y desventajas. De acuerdo a la literatura revisada, se consideran significativas las siguientes ventajas:

- Permite estudiar y analizar los sistemas como realmente son, sin interferir en el mundo real.
- Permite la experimentación en condiciones que podrían ser peligrosas o de elevado costo económico en el sistema real.
- Puede ser usada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales se tiene poca o ninguna información, y de esa manera se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.
- Permite analizar sistemas de mayor complejidad o con mayor detalle.
- Es un proceso relativamente eficiente y flexible.
- El *software* necesario para crear modelos de simulación cada vez es más flexible y con interfaces más amigables para el usuario.
- Contribuye a la reducción del riesgo inherente a la toma de decisiones.

Como desventajas se tiene que:

- Invertir en un *software* de simulación puede ser bastante costoso.
- Mal aplicada puede llevar a conclusiones erróneas, que pueden resultar costosas y demandar demasiado tiempo.
- Las respuestas no implican que las mejoras sean exactas. Sólo se basa en estimaciones, como no se trata de un método de optimización las soluciones dependen de la capacidad del analista para crear escenarios alternativos.
- Puede requerir de cierto nivel de aprendizaje.

2.1.3 Software de simulación Flexsim

Flexsim es un programa de simulación que permite realizar operaciones en cualquier proceso de manufactura, logística, manejo de materiales y de servicios, de forma simple y rápida. Además nos da la posibilidad de probar cambios en las operaciones de cualquier proceso y de esa manera evitar altos costos, riesgos y excesivos tiempos que conlleva experimentar directamente en el mundo real, con la modalidad prueba y error.

El *software* provee al usuario de controles amigables y de fácil manejo para modelar y simular procesos con su sistema de arrastrar y soltar, en conjunto con la experiencia de su visualización en 3D. Cuenta con objetos altamente parametrizados para minimizar la necesidad de programar. Además, de ser flexible y permitir programar y modificar objetos base para su reutilización (creación de librerías de usuario). Cada objeto puede tener su ubicación, velocidad, rotación y un comportamiento dinámico a través del tiempo, dando la facilidad de crear, trasladar o eliminar si lo desea sin problemas.

Flexsim permite modelar casi todos los objetos físicos que existen. Máquinas, operadores, colas, transportadores, procesadores, almacenes, semáforos, tanques, cajas, plataformas y envases se pueden modelar fácilmente usando la robusta biblioteca que posee.

Por otra parte, la capacidad de fabricar videos de las simulaciones desde el mismo Flexsim permite una forma adicional de comunicar, mostrar y compartir los modelos. Permite además, importar dibujos tridimensionales desde una vasta librería ya incluida, o bien incorporar otros totalmente nuevos creados por el usuario (Flexsim México, 2009).

2.1.4 Simulación en Estudios de Tránsito en Flexsim

Brandon Peterson, uno de los desarrolladores más importantes de este *software*, ha señalado en foros de la comunidad Flexsim (2009) que este *software* no ha sido desarrollado pensando en modelos de tráfico vehicular, pero que no descarta una posible utilidad de éste si se encuentran los objetos adecuados con un respectivo buen uso. Sin embargo, en dicha comunidad, se encuentra un modelo de tráfico vehicular en autopistas denominado “Highway Traffic” (Brandon Peterson, 2007), donde se observa al menos gráficamente, que

se puede lograr un alto grado de fiabilidad. Y de acuerdo a ello, se consideró que el siguiente paso sería la integración de la fidelidad gráfica con los tiempos y aforos vehiculares, los que de no existir, demandan un trabajo estadístico en paralelo.

2.2 Modelos básicos del flujo vehicular

De acuerdo al libro, Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones de Cal, Reyes y Cárdenas (1994). Se rescató la siguiente información respecto de los modelos básicos para el flujo vehicular y sus respectivos ajustes según sea el caso, tanto para flujos congestionados como no congestionados (o flujos libres).

El punto de partida para analizar más en profundidad las características del flujo vehicular es a través de sus tres variables principales: flujo (q), velocidad (v) y densidad (k), relacionadas por medio de la ecuación fundamental del flujo vehicular, dada por:

$$q = v * k$$

Las posibles combinaciones que se pueden dar de esta ecuación son velocidad-densidad (v,k), flujo-densidad (q,k) y velocidad-flujo (v,q).

En general los modelos de flujo vehicular en dos clases: microscópicos y macroscópicos. Donde, los microscópicos consideran los espaciamientos y las velocidades individuales de los vehículos, basándose en la teoría del seguimiento vehicular. Los macroscópicos por su parte describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, que por lo general son tomadas como promedios. (Por lo tanto para este caso de estudio se ocupará el modelo macroscópico).

La relación que se ha tratado de lograr entre las parejas de las tres variables principales del flujo vehicular (q,v,k) tiene base en toma de datos y ajuste simple a curvas o regresión, utilizando métodos deductivos en condiciones límite o de frontera y analogías físicas. Estas maneras de aproximación han dado como resultado modelos macroscópicos, suponiendo

movimiento homogéneo o flujos estacionarios y describen características generales de la corriente vehicular. Dando como resultado algunos modelos, tanto lineal como no lineales.

2.2.1 Modelo Lineal

B.D. Greenshields, comenzó una de las primeras investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular, que correspondían a flujos no congestionados. Esta investigación propuso relaciones para la velocidad (v) y la densidad (k), el flujo (q) y la densidad (k), y por último para la velocidad (v) y el flujo (q), ajustadas mediante el método de los mínimos cuadrados. (Notar que, no se entró más en detalle con fórmulas y demases, pues el modelo lineal no se utilizará al momento de llevar a cabo el modelo de simulación y escoger las distribuciones estadísticas que se ocuparán en él).

2.2.2 Modelos No Lineales

2.2.2.1 Modelo Logarítmico

H. Greenberg, se apoyó en la analogía hidrodinámica para combinar las ecuaciones de movimiento y continuidad de los fluidos compresibles y, al aplicarlas al flujo vehicular, obtiene las siguientes relaciones:

$$v_e = v_m * \ln\left(\frac{k_c}{k}\right)$$

$$q = v_m * k * \ln\left(\frac{k_c}{k}\right)$$

Donde,

V_e = velocidad media espacial (km/h)

K = densidad (veh/km/carril)

V_m = velocidad a flujo máxima (km/h)

K_c = densidad de congestionamiento (veh/km/carril)

q = flujo (veh/h/carril)

Este modelo da buenos ajustes, especialmente para flujos congestionados.

Cabe indicar, que la fórmula para obtener la velocidad media fue utilizada para la fuente de entrada ubicada en la Ruta 160 tramo San Pedro de la Paz (R-160 SP) donde se ocasiona la congestión vehicular a gran escala. Además, dada las características del flujo vehicular en esta sección de la red simulada, la distribución logarítmica es la que mejor se ajustaba conforme los datos que se manejaban para la construcción del modelo, reproduciendo de similar forma lo que ocurre en el sistema real.

2.2.2.2 Modelo Exponencial

R. T. Underwood, se interesó por el análisis del régimen a flujo libre y conforme a eso formuló relaciones para obtener la velocidad media (V_e) y el flujo (q), tal cual el modelo logarítmico. Pero al igual que el modelo lineal, no se entró más en detalles con las fórmulas dadas por este modelo, ya que no serán utilizadas.

Cabe señalar, dado que el modelo exponencial es para flujos libres, el flujo utilizado para fuentes donde no hay congestión vehicular dada las características de estos tramos, la distribución exponencial es la que mejor se ajustaba. Ya que de acuerdo a los datos manejados en la construcción del modelo, la muestra del sistema real donde no hay congestión vehicular, es sin duda la más representativa.

2.3 La logística como motor de competitividad

La logística se está convirtiendo en un elemento crucial de la competitividad y el rendimiento económico, tanto en sí mismo como en el contexto de una globalización creciente. La mayoría de los países de América Latina y el Caribe, debido a su tamaño relativamente pequeño y a su capacidad de compra limitada, se están centrando en estrategias de crecimiento impulsadas por las exportaciones. Para que estas estrategias tengan éxito, es necesario la presencia de ciertos componentes claves (Guasch, 2004).

Para impedir que los costos logísticos se conviertan en un obstáculo para la productividad y competitividad, se requiere de una logística eficaz, esto incluye las infraestructuras y los

servicios asociados. De esta manera una logística eficaz, nos permite facilitar la producción y distribución de bienes a bajo costo y de manera fiable.

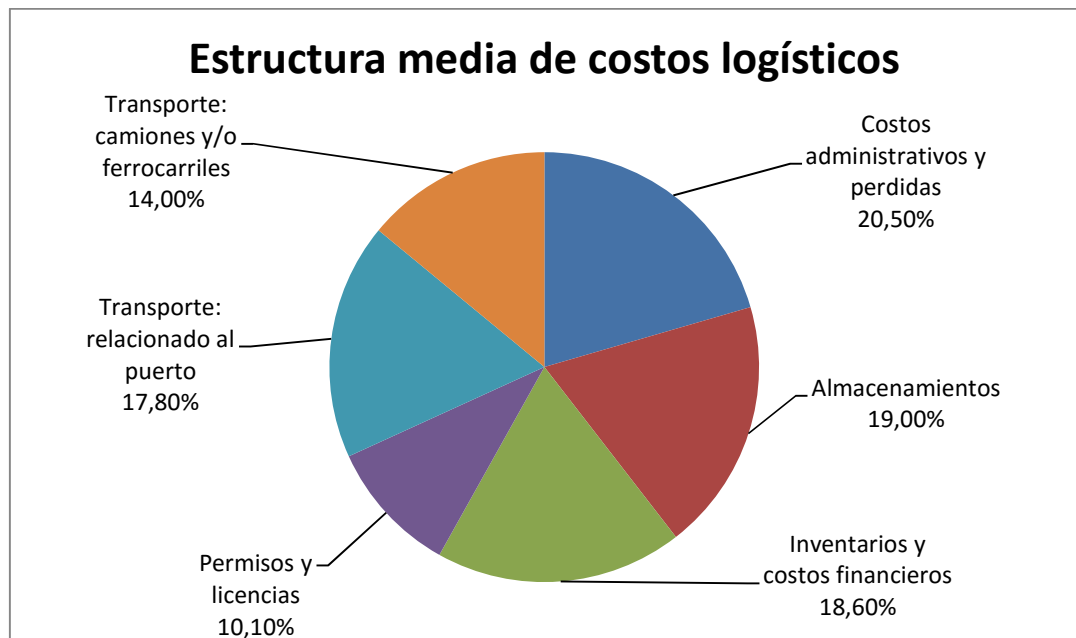
2.3.1 Definición y estructura de los costos logísticos

¿A qué nos referimos con costos logísticos?

Los costos logísticos son todos los costos involucrados en el proceso de transportar los bienes desde la fábrica hasta el punto donde el producto sale del país (puertos, aeropuertos, fronteras). Dentro de los costos logísticos están: transporte, licencias, permisos y procedimientos aduaneros; de inventario, almacenaje, deterioro o pérdidas durante el transporte; de seguros, procedimientos adecuados en puertos, aeropuertos o fronteras; de financiamiento; y costos administrativos.

Guasch (2008) presenta el desglose en porcentaje de los costos logísticos de un producto específico. Evidentemente existen variaciones dependiendo del tipo de producto, pero un aproximado es de la siguiente forma:

Gráfico 1: Estructura media de los costos logísticos.



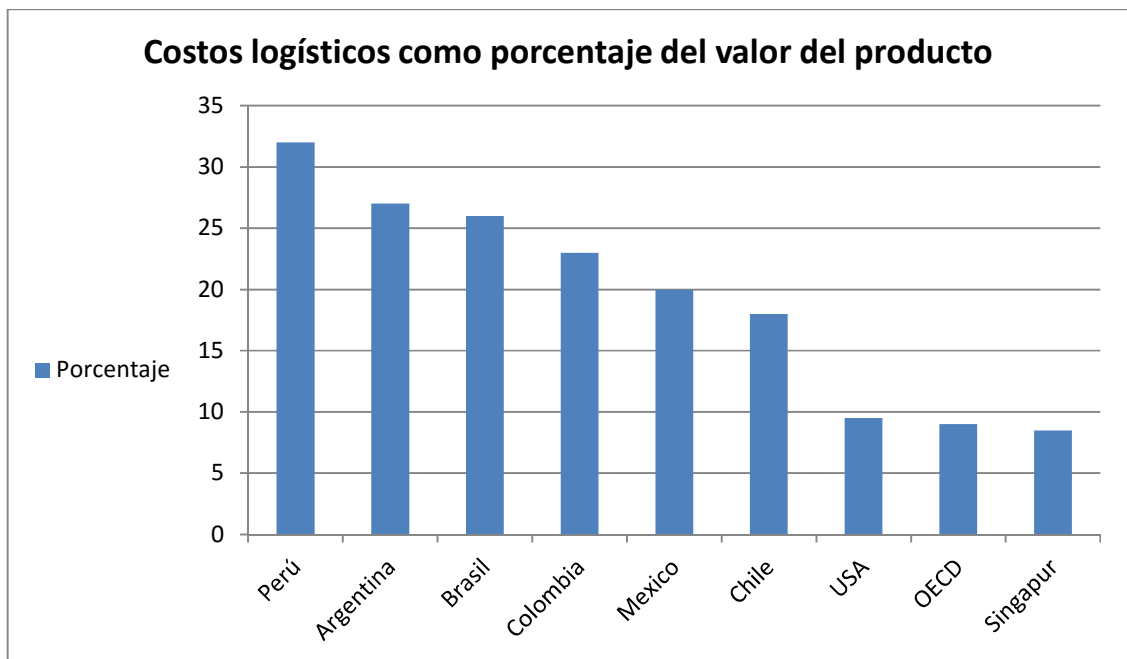
Fuente: Guasch (2008).

De acuerdo a esta estructura, queda claro que el costo de transporte es el más influyente, superando el orden del 30%, y si a ello le sumamos los costos en permisos y licencias aduaneras y almacenaje que están directamente relacionados con el transporte se tiene un 60% aproximado de los costos logísticos.

2.3.2 Diagnóstico logístico para Chile

Se estima que el costo logístico en Chile “en promedio” para empresas grandes es del orden del 18% del valor FOB del producto, cifra que a nivel latinoamericano nos sitúa como líderes, pero que lo deja lejos de los valores que manejan las economías más desarrolladas. Esto queda en evidencia, ya que Chile duplica el costo promedio de los países de la Organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE) (9%) y está más lejos todavía de Singapur, uno de los países de referencia logística (8,5%) (Guasch y Kogan, 2006).

Gráfico 2: Costos logísticos como porcentaje del valor del producto.



Fuente: Guasch y Kogan (2006).

Y peor aún es el caso de las pequeñas y medianas empresas (PYMEs), donde en América Latina los costos logísticos están en el orden del 40% aproximadamente. (Fuente: Centro Logístico de Latinoamérica, Bogotá, Colombia, Benchmarking 2007: Estado de la Logística en América Latina Anexo, María Rey Logistic Summit)

La componente más costosa en una cadena logística internacional es el transporte de la mercancía. Que en el caso de nuestro país, dicho costo representa una proporción significativa del valor del producto, ya que la canasta exportadora nacional se constituye fundamentalmente de recursos naturales de bajo nivel de diferenciación y escaso valor agregado. Además, la gran distancia respecto de los mercados que demandan los productos nacionales forma una debilidad estructural para las exportaciones de Chile.

Según la Mesa para el desarrollo del Comercio Exterior de la región del Biobío (Mesa COMEX), la evaluación del desempeño logístico de Chile está por debajo del nivel de sus países competidores (Australia, Noruega, Nueva Zelanda y Sudáfrica) en los mercados internacionales. Las deficiencias más connotadas se registran en las dimensiones infraestructura y envíos internacionales, que miden la calidad de la infraestructura de transporte y la facilidad para acceder a precios competitivos para el transporte internacional, respectivamente.

De acuerdo a la fuente del Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad, en su presentación: Recomendaciones para fortalecer la plataforma logística y transporte (2010), rescatamos los siguientes párrafos:

Según información del pilar Infraestructura del Índice de Competitividad Global (2009), es importante destacar la calidad de la infraestructura vial en Chile, pues aparece dentro de las mejor evaluadas siendo comparable incluso a la de los países de referencia, pero he aquí el contraste, ya que el transporte ferroviario se encuentra dentro de los países peor evaluados. Lo que de una u otra forma nos da a entender que gestionando bien los procesos logísticos, dada la infraestructura con la que se cuenta, se podría disminuir tiempos con la consecuente baja de costos asociados al proceso de exportación.

La Estrategia Nacional de Innovación considera al sector de logística y transporte como una industria con alto potencial de crecimiento en la generación de valor y también bajo el rol de plataforma habilitadora para el progreso de los demás sectores exportadores, y de esa manera constituir el escenario perfecto para el desarrollo adecuado del comercio internacional. Por lo tanto, la existencia de redes viales y/o redes ferroviarias que conecten los polos de desarrollo más importantes del país y la infraestructura para la entrada y salida de productos desde y hacia el extranjero son fundamentales.

De acuerdo a lo anterior, abordando apropiadamente un conjunto de desafíos bien fundados se podría aumentar de forma notable la eficiencia de la cadena logística de exportación, influyendo en la productividad y fundamentalmente en las actividades exportadoras.

3 METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta se explica en el siguiente diagrama:

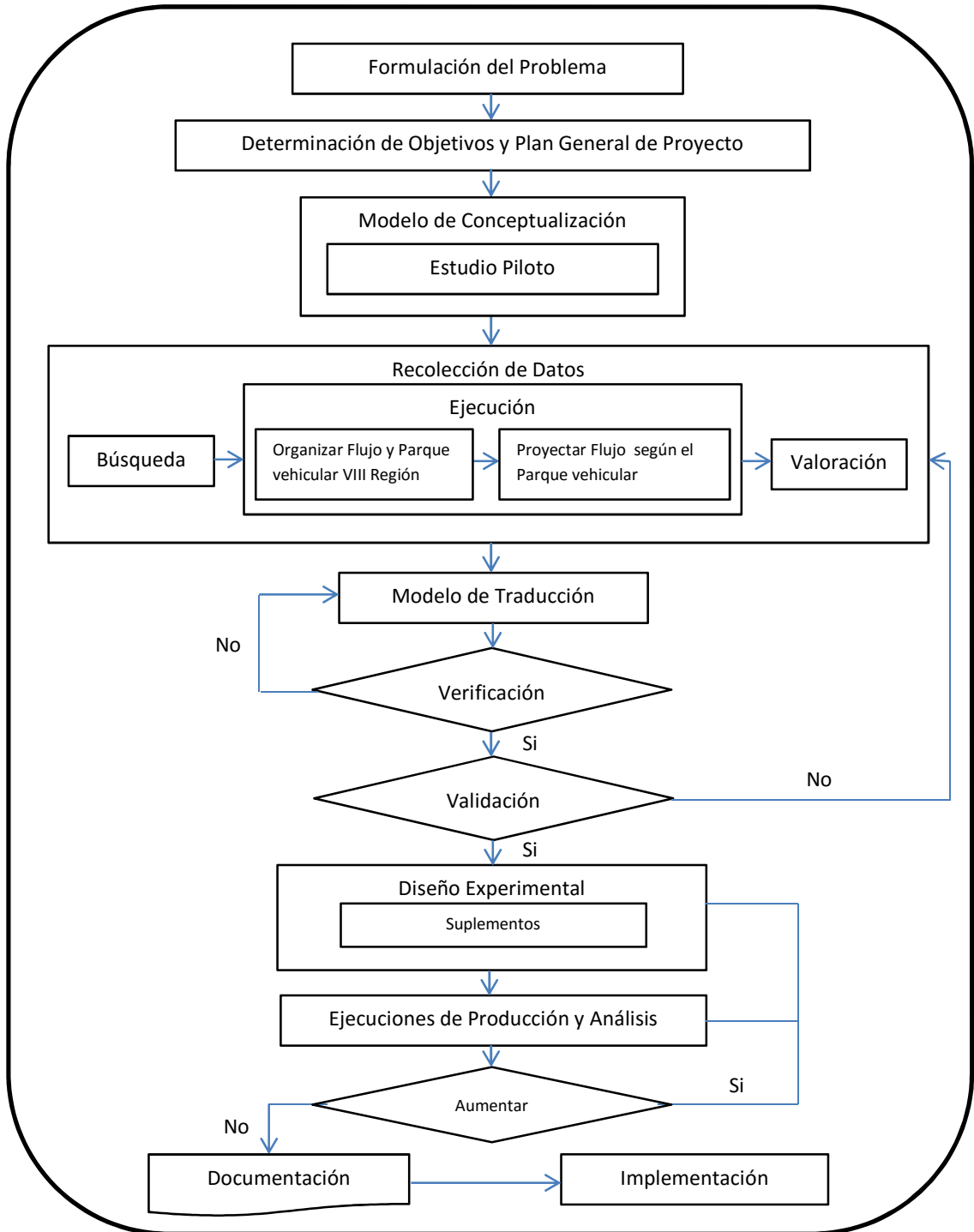


Diagrama 2: Metodología Propuesta de Simulación de Tránsito en Flexsim.

Las Actividades a desarrollar para lograr el objetivo planteado en el proyecto presenta como base para construir un Modelo de Simulación, los 12 pasos propuesto por Jerry Banks.

Para el primer objetivo específico, correspondiente al modelamiento del sistema en el *software*, con el fin de lograr una representación de la situación real lo más similar posible, se deben llevar a cabo los pasos 1) Formulación del problema, hasta el 7) Validación. A lo anterior, se agregó dentro de los pasos 3 y 4 las siguientes actividades:

- Para el Modelo de conceptualización (3° Paso de la Metodología de Simulación) se necesitó hacer un estudio piloto, el cual requirió de una verificación, con el fin de establecer la validez de los objetos seleccionados, de manera que el modelo sea lo más fidedigno posible. Por ejemplo, ver si el comportamiento de las colas de tránsito eran correctas o no, de acuerdo a los objetos utilizados.
- En el caso de la Recolección de datos (4° Paso de la Metodología de Simulación) se realizó tres actividades para lograr obtener la información necesaria para la construcción del modelo, estas son:

Búsqueda, en ella se recopilaron los datos que fueron necesarios para la creación del modelo.

Ejecución, que contempla la organización de los datos e información para posteriormente realizar las proyecciones de flujos vehiculares anuales en los horarios punta de acuerdo al crecimiento del parque automotriz de la región.

Valoración, aquí es donde los datos recolectados nos entregan luego del proceso de ejecución, la información necesaria para la construcción del modelo final.

La Metodología Propuesta para esta tesis a diferencia de la Jerry Banks, que es la base de la metodología de trabajo, tiene directa relación con la toma de decisiones en un paso específico. Según Banks (2005), en caso de no haber Validación del modelo, debe realizarse un nuevo Modelo de Conceptualización, además de una nueva Recopilación de Datos, que para el caso de la Metodología Propuesta, no se hace necesario realizar un nuevo Modelo de Conceptualización si no hay Validación, dado que el modelo se encuentra

previamente verificado con un Estudio Piloto, es decir, de no ser validado el modelo, sólo sería necesaria una nueva Recolección de Datos.

Para el segundo y tercer objetivo específico (análisis estadístico de la situación actual y los escenarios propuestos, y evaluar viabilidad de los escenarios propuestos, respectivamente), una vez validado el modelo desarrollado en el objetivo específico número uno, se comienza a trabajar de lleno en el paso 8) Diseño Experimental, y 9) Ejecuciones de producción y Análisis, que es el paso donde se obtienen los resultados buscados por los objetivos específicos 2 y 3, encargados de entregar la información para análisis y evaluación del sistema simulado actual y los escenarios propuestos (alternativas de mejoramiento) como ayuda a la hora de tomar decisiones en infraestructura logística.

Y por último, el cuarto objetivo específico (generación de una metodología para la construcción de este tipo de estudios), corresponde al paso 11) Documentación, es aquí donde se concluye la tesis y se da por terminado el proceso de creación de una metodología de estudios para este caso de proyectos, afín de facilitar de alguna manera posibles proyectos o investigaciones asociadas a la simulación de redes de transporte.

4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.1 Formulación del problema

El problema planteado es una propuesta basada en el estudio del comportamiento de una red rodo-viaria de la Región del Biobío, en específico el trayecto desde Arauco hacia los Puertos de San Vicente y Talcahuano, poniendo especial énfasis en lo que sucede en el tramo de la Ruta 160 y los Puentes que unen San Pedro de la Paz con Concepción.

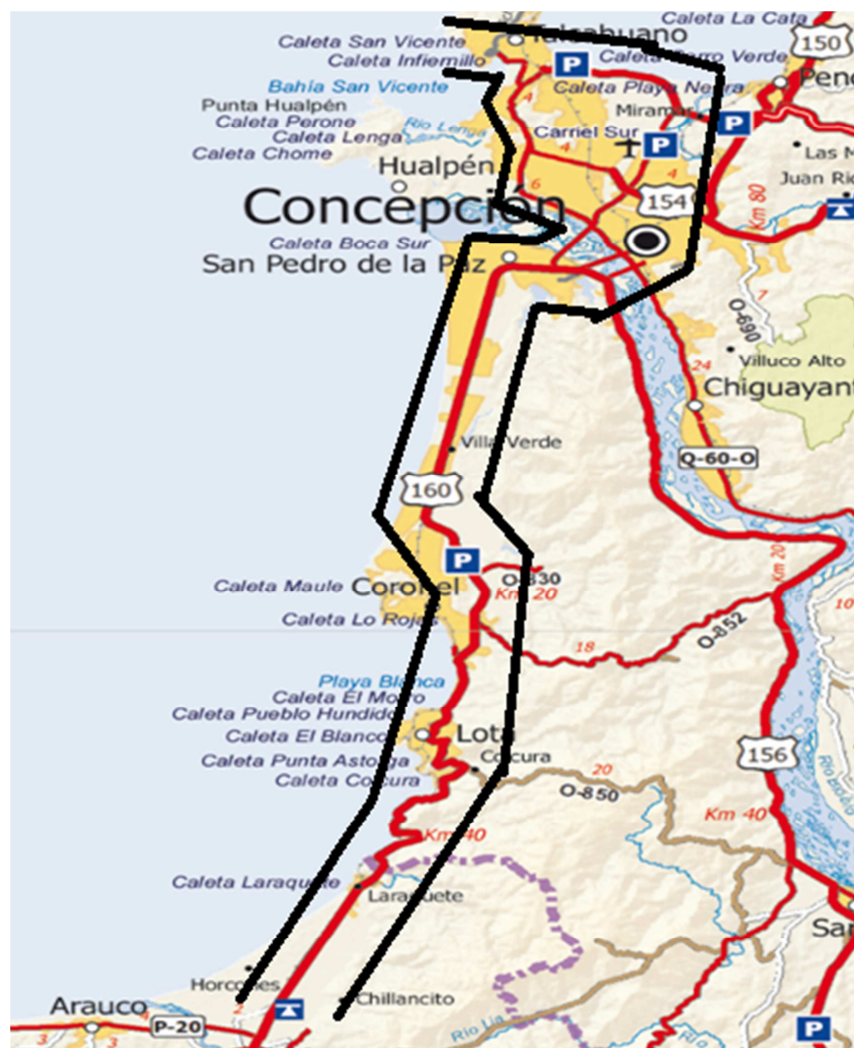


Figura 1: Trayecto Arauco hacia Puertos de Talcahuano y San Vicente.

El problema de mayor impacto para el transporte de carga en este trayecto, es el alto tiempo que concentra el tramo de la Ruta 160 - Av. Pedro Aguirre Cerda que da paso a los Puentes, debido al constante aumento del flujo vehicular que va de la mano con el incremento considerable de la Región del Biobío. Según estudios hechos por el Ministerio de Obras Públicas en los horarios punta de la mañana, el tramo de la Ruta 160 - Av. Pedro Aguirre Cerda donde los vehículos recorren aproximadamente 10 kilómetros congestionados, a velocidades que fluctúan entre los 25 y 35 kilómetros por hora, lo que no es número muy favorable o alentador para una autopista de velocidad máxima 70 kilómetros por hora, y lo hace el punto más crítico de este trayecto.

Cabe destacar que en la actualidad existe conciencia respecto de este problema, pues las autoridades de tránsito han creado restricciones horarias para el acceso a los puentes para los transportes de carga, donde el rango de 07:30 a 09:00 horas tienen prohibición de transitar por el Puente Llacolén y durante las 24 horas por el Puente Juan Pablo II, lo cual no le favorece a las empresas exportadoras al momento de transportar sus cargas hacia los puertos, ya que esto les afecta directamente tanto en multas de tránsito por circular de igual forma algunos transportes a pesar de las restricciones como también multas provenientes de los clientes por demoras en la entrega de los productos, debido a que se trata de una cadena para lograr entregar a tiempo el producto a los clientes exportadores.

En estos momentos está en marcha el proyecto de la tercera vía en la Ruta 160 (el tramo ubicado en San Pedro de la Paz), además de eso, hay un proyecto que está en estudio donde se pretende crear un cuarto puente para el transporte de carga, de manera de absorber todo el flujo relacionado al transporte de carga y lograr descongestionar la Ruta 160 que da acceso a los Puentes.

4.2 Fijación de objetivos y plan general del proyecto de simulación

En este paso se procede a definir los objetivos propios del proyecto/investigación, los que fueron propuestos anteriormente (ver Capítulo 1, p.3). Pero además, el proceso de

simulación presenta objetivos propios en su plan general de trabajo, ojalá exhibidos de manera representativa y en cifras concretas que puedan ser medidas con la estadística proporcionada por el *software* de simulación. De esta manera, se propusieron los siguientes objetivos de la simulación:

- Representar lo más fidedigno posible la situación real que ocurre cada tramo del sistema simulado, en el horario punta mañana (que es el caso más complejo).
- Entregar los resultados del simulador de la manera más clara posible, para su posterior análisis en los objetivos específicos del proyecto/investigación.

El primer objetivo apunta a la construcción del modelo con los datos de flujos vehiculares históricos proyectados conforme se incrementa el parque automotriz, y que de esa manera represente lo más parecido posible la situación actual en cada tramo. Por su lado, el segundo objetivo busca entregar los resultados otorgados por el *software* de forma clara y concisa para el posterior análisis que se llevara a cabo con el fin de cumplir los objetivos específicos del proyecto.

4.3 Modelo de conceptualización

Para analizar el comportamiento simulado del tránsito en el *software* Flexsim, se procedió a realizar un estudio piloto en un sector de la vía de circulación vehicular de la red estudiada. De esta manera, se escogió un tramo de la Ruta 160 de la red simulada.

4.3.1 Estudio piloto

4.3.1.1 Objetos del simulador Flexsim utilizados para el estudio piloto

Los objetos utilizados del simulador Flexsim para el estudio piloto, con su correspondiente representación del mundo real, fueron los siguientes:

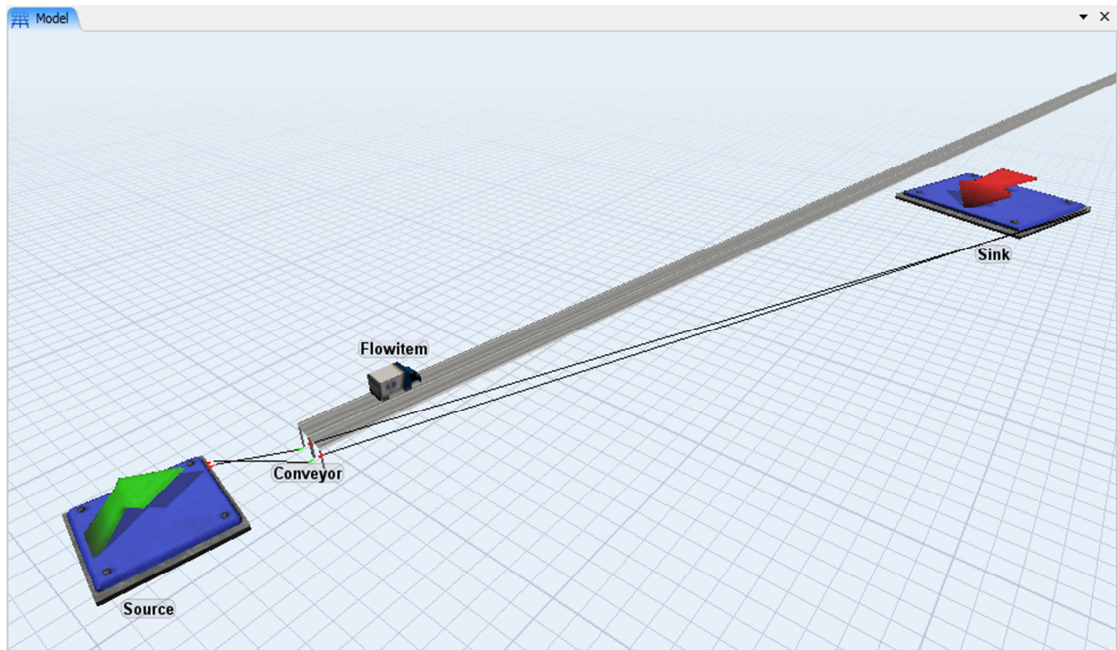


Figura 2: Objetos utilizados en Estudio Piloto.

- *Flowitems* (objetos de flujo): son los objetos que se mueven en el modelo, es la base de la simulación. Es la entidad que recorrerá el sistema y que se comportará según la programación lo señale. Corresponde a los transportes particulares, colectivos y de carga.
- *Source* (Fuente): es el creador de los objetos de flujo (*flowitems*) que participan del sistema, aquí se ingresa la distribución correspondiente a los tiempos entre llegadas (flujos vehiculares) ubicados en puntos estratégicos del modelo. Este objeto no equivale a nada físico en el sistema real, sino que representa el estimado de cada cuánto tiempo llega una entidad (*flowitem*) al sistema.
- *Conveyor* (banda transportadora): es utilizado para mover los objetos de flujo (*flowitems*) a través del modelo, es decir, el encargado de transportar las entidades y darle forma al sistema. Este objeto es capaz de recibir varias entidades a la vez, transportándolas hasta el final de la banda liberándolas hacia otro objeto. La banda transportadora cuenta con una ventana para programar el camino de las entidades, ya sea de acuerdo a una propiedad única de la entidad o porcentajes cuando hay varias salidas, etc. Dentro de las propiedades por la cual fue escogido este objeto

para la simulación es que permite ingresar velocidades, capacidad máxima y longitud para cada tramo, entre otros. Además cuenta con la opción de darle forma a la banda transportadora, logrando a nivel gráfico una similitud con la ruta simulada.

- *Sink* (Salida): este objeto recibió todas las entidades que salen del sistema una vez hecho su recorrido, por lo que permite saber el tiempo que tardó la entidad dentro del sistema y que caminos ha seguido dentro del mismo, si es que se hizo el etiquetado adecuado en la creación de los objetos en la fuente. Además, para nuestro caso que posee dos entidades, se puede crear una etiqueta para conocer el tiempo promedio de la entidad que se desee.

En la figura 3 y 4 se puede observar la representación gráfica del estudio piloto realizado en el simulador Flexsim.

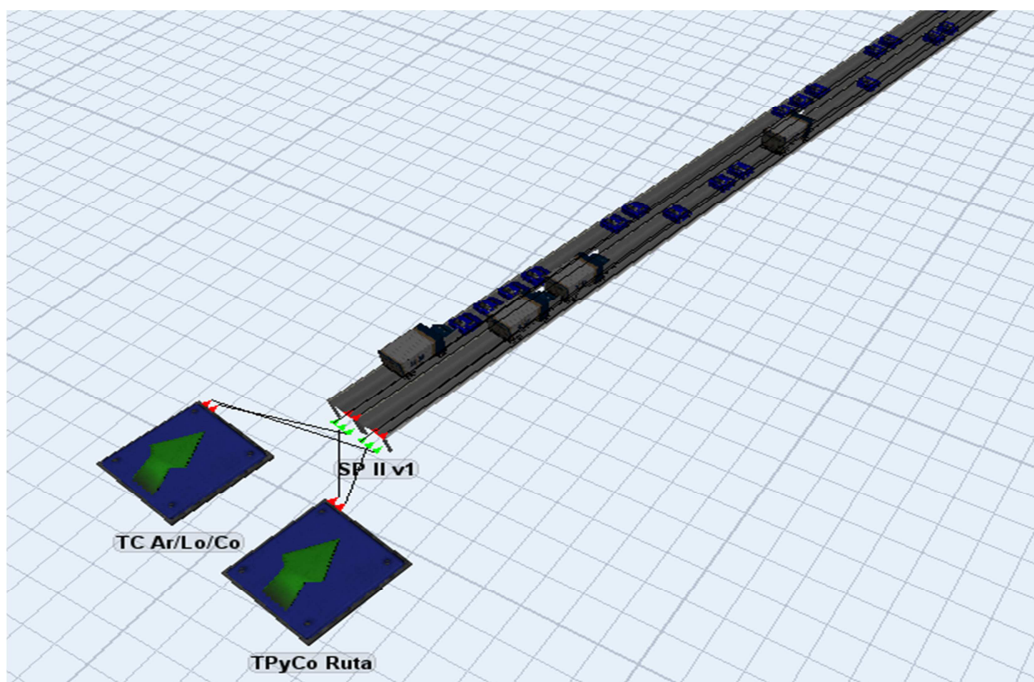


Figura 3: Representación de los elementos utilizados en el simulador para estudio piloto.

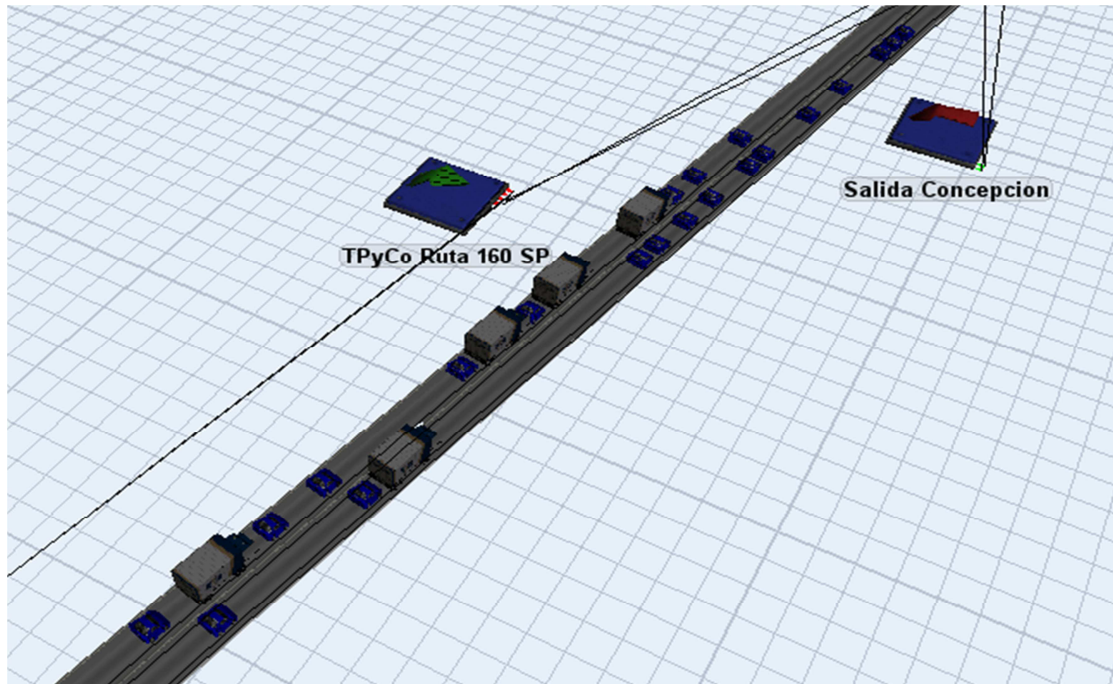


Figura 4: Representación de los elementos utilizados en el simulador para estudio piloto.

4.3.1.2 Resultados del estudio piloto

Al tratarse de un estudio piloto antes de la simulación final, no se consideraron todos los pasos planteados en la metodología de simulación de Jerry Banks, puesto que el objetivo de este estudio piloto fue comprobar que los objetos escogidos del simulador eran los adecuados. Para ello se hizo necesario un proceso de verificación, donde se buscó comprobar el correcto funcionamiento de los objetos.

El comportamiento detallado sobre cada uno de los objetos utilizados y mencionados con anterioridad, fue este:

- *Flowitems* (objetos de flujo): se comportó de forma correcta, recorriendo el sistema sin problemas que hicieran caer el sistema del simulador, sobrellevando sin inconvenientes la incorporación de otras figuras 3D anexadas que representaban formas de camiones y automóviles.
- *Conveyor* (banda transportadora): actuó de forma correcta, dado que el transporte de las entidades se realiza, por defecto, de la manera en que se comporta una cola en

situaciones de congestión vehicular, es decir, que los últimos automóviles de la cola esperan a que el resto pase según su orden de llegada (FIFO: primero en llegar, primero en salir). Además, permite dar longitud al tramo y asignar una velocidad promedio según corresponda.

Por otro lado, los objetos *Source* (fuente) y *Sink* (salida) no presentaron ningún tipo de problema y su comportamiento fue el esperado, sin causar eventos que obstruyeran el funcionamiento del modelo.

4.3.1.3 Conclusiones del estudio piloto

Como se observó en los resultados comparativos de la verificación respectiva del estudio piloto, el modelo se comportó según lo esperado, es decir, los objetos seleccionados cumplieron su función correctamente, lo que permitió llevar a cabo el modelamiento de la red completa. El uso y programación computacional de éste y todos los objetos utilizados en el modelo de simulación final, están detallados más adelante en este informe. (ver 4.5: Modelo de traducción, p.35 y 36).

4.4 Recopilación de datos

La recolección de los datos necesarios para llevar a cabo la simulación, se basó en una búsqueda por internet de datos históricos respecto de los flujos vehiculares, situación del parque vehicular y longitudes de los tramos seleccionados para la confección de la red del Gran Concepción.

Para el caso de los flujos vehiculares los datos se obtuvieron de la página web de la Secretaria de Planificación de Transporte (SECTRA), pero eran bastante antiguos, debido a que no cuentan con una renovación continua de ellos. Se encontraron datos de 2000 a 2005 de horarios punta de la mañana, mediodía y tarde, 2007 y 2010 solo de horarios punta de la mañana, lo cual no es de mucha ayuda considerando los vacíos y el hecho de que en los tres están expresados de distinta manera como para realizar un pronóstico, por lo tanto se

procedió a realizar una estimación con los últimos datos de flujos vehiculares correspondientes al año 2010, junto con la base de datos del parque vehicular regional, cuyos datos son actualizados año a año.

El parque vehicular fue obtenido de la página web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) el que se renueva anualmente.

Por lo tanto, de acuerdo a lo anterior se procedió a estimar los flujos vehiculares en base a los últimos datos (año 2010) y el incremento del parque vehicular a una tasa de un 8% anual aproximadamente. A continuación se presentan las tablas:

Tramo	Vehículos/Hora					
Arauco	0	206	610	1240	2134	3670
Lota	0	206	610	1240	2134	3670
Coronel	0	206	610	1240	2134	3670
San Pedro de la Paz	0	206	610	1240	2134	3670
Puente Juan Pablo II	0	206	610	1240	2134	3670
Puente Llacolén	0	206	610	1240	2134	3670
Puente Chacabuco	0	206	610	1240	2134	3670
Ruta 156	0	206	610	1240	2134	3670
Chiguayante	0	206	610	1240	2134	3670
Costanera	0	206	610	1240	2134	3670
Las Golondrinas	0	206	610	1240	2134	3670

Tabla 1: Flujos vehiculares de puntos estratégicos de la red simulada (año 2010).

Año	Vehículos Motorizados	↑ %
2009	312.085	0,0386
2010	341.882	0,0955
2011	379.451	0,1099
2012	411.350	0,0841
2013	444.000	0,0794
	Promedio Incremento %	0,0815

Tabla 2: Parque vehicular últimos 5 años.

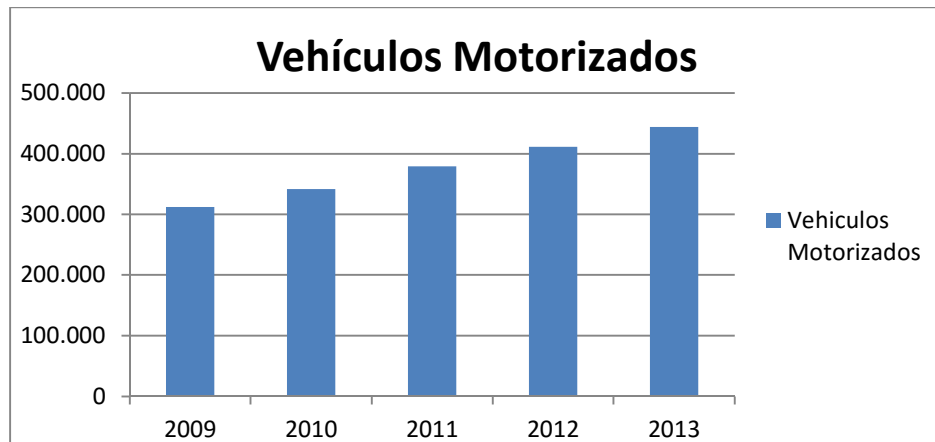


Gráfico 3: Parque vehicular últimos 5 años.

Como el promedio de crecimiento del parque automotriz es prácticamente un 8%, supondremos esa tasa de incremento del flujo vehicular anual y así estimar los valores necesarios para la simulación. Luego, las estimaciones quedaron de la siguiente manera:

Año 2010	Límite Inf	Promedio	Límite Sup
Rangos de Flujo vehicular	0	103	206
	207	409	610
	611	926	1240
	1241	1688	2134
	2135	2903	3670

Tabla 3: Rangos de flujo vehicular año 2010.

Año 2011			
Rangos de Flujo vehicular	0	111	222
	224	441	659
	660	1000	1339
	1340	1823	2305
	2306	3135	3964
Año 2012			
Rangos de Flujo vehicular	0	120	240
	241	476	712
	713	1080	1446
	1448	1968	2489
	2490	3385	4281
Año 2013			
Rangos de Flujo vehicular	0	130	260
	261	515	768
	770	1166	1562
	1563	2126	2688
	2689	3656	4623

Año 2014			
Rangos de Flujo vehicular	0	140	280
	282	556	830
	831	1259	1687
	1688	2296	2903
	2905	3949	4993
Año 2015			
Rangos de Flujo vehicular	0	151	303
	304	600	896
	898	1360	1822
	1823	2479	3136
	3137	4265	5392

Tabla 4: Rangos flujo vehicular estimados año 2011-2015.

Primero, se estimó hasta el año 2015 con el fin de obtener los datos necesarios para simular la situación actual en el modelo, y así verificar su validez.

Posteriormente, se estimó hasta 2020 para evaluar las alternativas propuestas, tanto la que está en ejecución (tercera pista de la Ruta 160) como la posibilidad de construir un cuarto puente para el transporte de carga. A continuación la tabla:

Año 2016			
Rangos de Flujo vehicular	0	163	327
	328	648	968
	970	1469	1968
	1969	2678	3386
	3388	4606	5824
Año 2017			
Rangos de Flujo vehicular	0	177	353
	355	700	1045
	1047	1586	2125
	2127	2892	3657
	3659	4974	6290
Año 2018			
Rangos de Flujo vehicular	0	191	381
	383	756	1129
	1131	1713	2295
	2297	3123	3950
	3952	5372	6793
Año 2019			
Rangos de Flujo vehicular	0	206	412
	414	817	1219
	1221	1850	2479
	2481	3373	4266
	4268	5802	7336

Año 2020			
Rangos de Flujo vehicular	0	222	445
	447	882	1317
	1319	1998	2677
	2679	3643	4607
	4609	6266	7923

Tabla 5: Rangos flujo vehicular estimados año 2016-2020.

Una vez obtenido los rangos de flujo necesarios para la simulación, se procedió a establecer el flujo que a cada sección o tramo le corresponda. Ejemplo de la Ruta 160 sección San Pedro de la Paz (nombre en *software* R-160 SP), las demás secciones o tramos pueden ser vistas en el Anexo A: Flujos vehiculares y Tiempo entre llegadas (ver p.70).

R-160 SP	Límite Inf	Promedio	Límite Sup
Año 2010	2135	2903	3670
Año 2011	2306	3135	3964
Año 2012	2490	3385	4281
Año 2013	2689	3656	4623
Año 2014	2905	3949	4993
Año 2015	3137	4265	5392
Año 2016	3388	4606	5824
Año 2017	3659	4974	6290
Año 2018	3952	5372	6793
Año 2019	4268	5802	7336
Año 2020	4609	6266	7923

Tabla 6: Estimación flujo vehicular Ruta 160 (San Pedro de la Paz) de 2010 a 2020.

Las longitudes de los tramos de la red se obtuvieron por medio de la Dirección Vial del Ministerio de Obras Públicas a través de internet (Cartas Camineras), además de la utilización de la herramienta Google Maps, pues al tratarse de una red dividida en tramos se necesitó de estas herramientas para la creación del modelo de la manera más real posible, ya que el modelo fue desarrollado a escala real. Finalmente, las velocidades también fueron obtenidas por medio de la herramienta Google Maps, que nos entrega los kilómetros y un tiempo estimado de viaje para el tramo seleccionado. A continuación se muestra la tabla con los kilómetros correspondientes a cada sección y su velocidad promedio:

Tramos	Kilómetros	Metros	Velocidad estimada (km/h)
Ruta 160 II Tramo 1 II	32	32000	60
Ruta 160 II Tramo 2 II	8,2	8200	45
Ruta 160 II Tramo 3 II	9	9000	45
Alternativa Coronel	10	10000	65
SP I	3	3000	55
SP II	5	5000	55
SP III	9	9000	55
Puente Juan Pablo II	2,8	2800	50
Pedro Aguirre Cerda (PAC)	1	1000	48
Puente Llacolén	2,2	2200	48
PAC + Puente Chacabuco	3	3000	50
Costanera II Tramo 1 II	1,2	1200	55
Costanera II Tramo 2 II	2,3	2300	55
Costanera II Tramo 3 II	6,9	6900	60
Gran Bretaña acceso Puertos	7,6	7600	60

Tabla 7: Distancia total y velocidad estimada de cada tramo utilizado en el simulador.

Las velocidades que se muestran en la tabla son las utilizadas en el Modelo sin congestión vehicular (flujos normales o fuera de punta), sin embargo para la simulación en el horario punta de la mañana en el tramo SP III y Pedro Aguirre Cerda se utilizó la fórmula indicada en el Marco Teórico para flujos congestionados del Modelo Logarítmico (Capítulos 2, p.14 y 15) a diferencia de las otras secciones que mantenían las velocidades estimadas por Google Maps. El cálculo fue el siguiente:

$$v_e = v_m * \ln\left(\frac{k_c}{k}\right) = 35 \text{ km/h} * \ln\left(\frac{154 \text{ veh/km/h}}{88 \text{ veh/km/h}}\right) = 20 \text{ km/h}$$

Por lo tanto, la velocidad utilizada en los tramos SP III y Pedro Aguirre Cerda para la simulación del modelo con congestión vehicular es de 20 km/h (Notar que se ocupa una velocidad a flujo máximo de 35 km/h, ya que es el valor entregado según estadísticas del MOP para ese tramo de 10 kilómetros).

Finalmente, se procedió a transformar las velocidades en unidades del simulador Flexsim:


□ → km	km/h	km/seg	□/time
0,010	40,000	0,011	1,111
0,010	50,000	0,014	1,389
0,010	60,000	0,017	1,667


Tabla 8: Transformación de velocidades a unidades Flexsim.

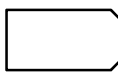
4.5 Modelo de traducción

Antes de realizar la codificación computacional de los datos obtenidos, es necesario realizar un Diagrama Lógico de Simulación para clarificar en qué situaciones se producen entradas, salidas, colas, procesos de cambio de dirección y/o ruta o etiquetados. El diagrama mencionado anteriormente que representa el Modelo de Simulación de Tránsito realizado está representado a continuación en la página siguiente diagrama 3.

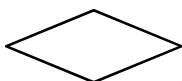
La simbología utilizada para la realización del Diagrama lógico o Modelo de traducción fue la siguiente:

 : Terminal, se utiliza para iniciar Inicio/Entrada y Fin/Salida de un algoritmo.

 : Documento, se utiliza para representar salida de datos.

 : Demora o Espera, se utiliza cuando ocurre una demora de documento cuando las condiciones no permiten la ejecución de la siguiente acción.

 : Proceso, representa una operación sobre datos.

 : Toma de decisión, indica operaciones lógicas y en función del resultado determina el camino a seguir.

 : Dirección, indica el sentido de la ejecución de las operaciones.

DIAGRAMA LÓGICO DE SIMULACIÓN DE TRÁNSITO

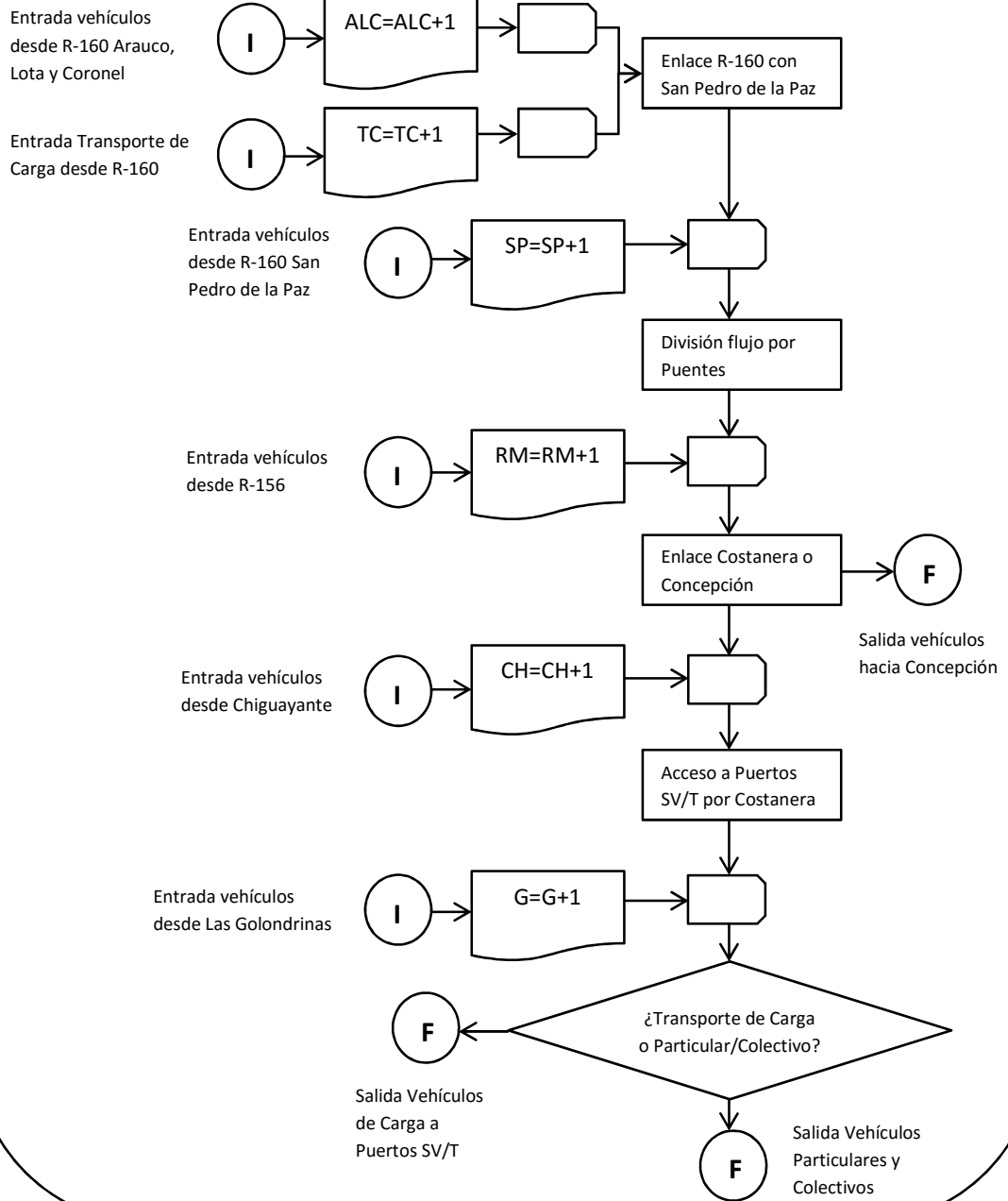


Diagrama 3: Diagrama lógico de Simulación de Tránsito.

Posteriormente al diagramado de la secuencia lógica de las entidades que participan del modelo, se dio paso a la construcción del modelo en el *software* de simulación, basado en el caso estudiado.

Primero que todo, se consideró fundamental que el modelo se debía hacer a escala real, con el fin de lograr una equivalencia incuestionable o lo más cercano a la realidad posible, en cuanto a los tiempos de viajes, velocidades, etc. De esta manera, se consideró a una unidad de longitud del simulador Flexsim, es decir, el largo de un cuadrado de la vista ortográfica que proporciona Flexsim equivale a 10 metros de largo en la realidad, esto se grafica en la figura 5:

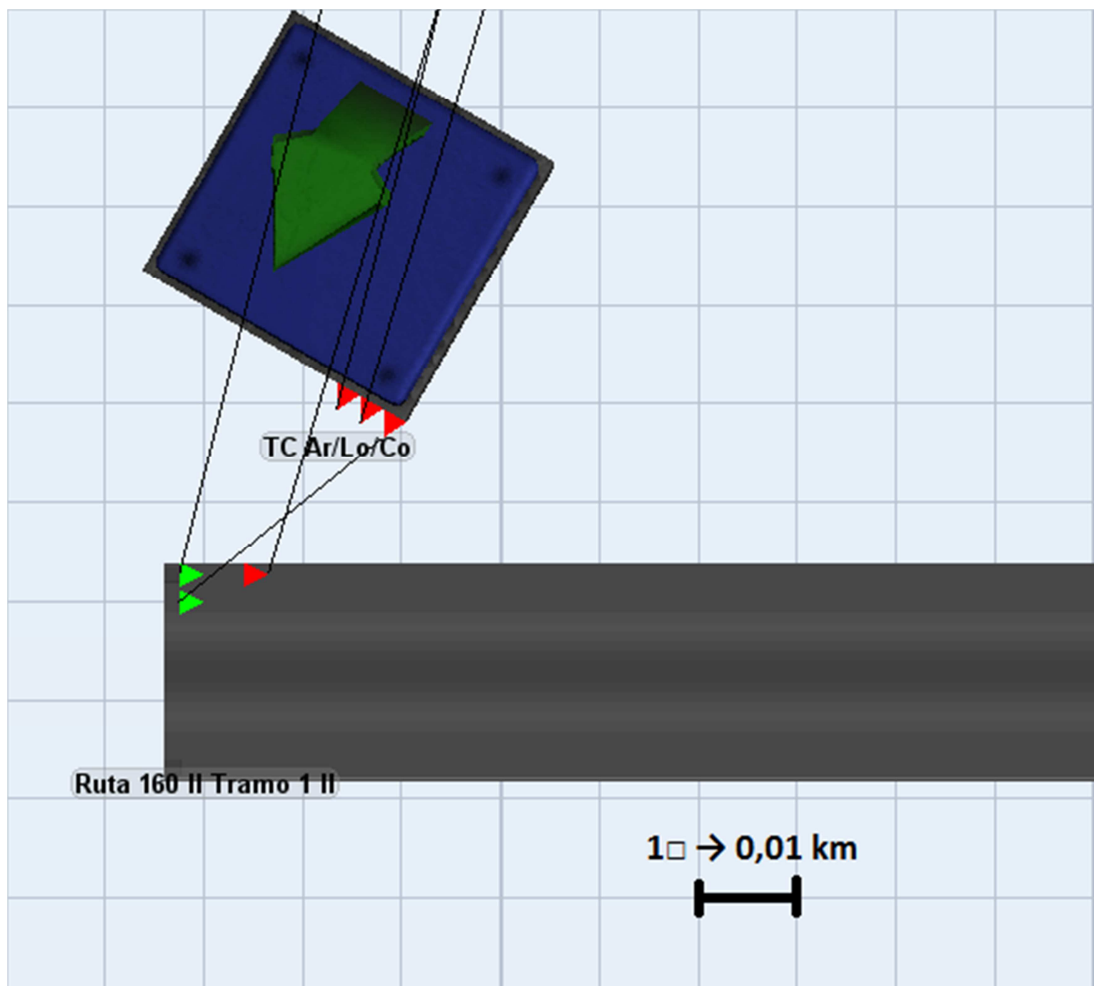


Figura 5: Representación gráfica de la escala aplicada en el simulador Flexsim.

Luego se llevó a cabo la construcción de la realidad en el modelo simulado, de acuerdo a la escala establecida precedentemente. Algunos puntos del modelo pueden ser observados en las figuras 6, 7 y 8. Dada la magnitud del modelo final real, el modelo completo se puede observar en el CD adjunto al informe.

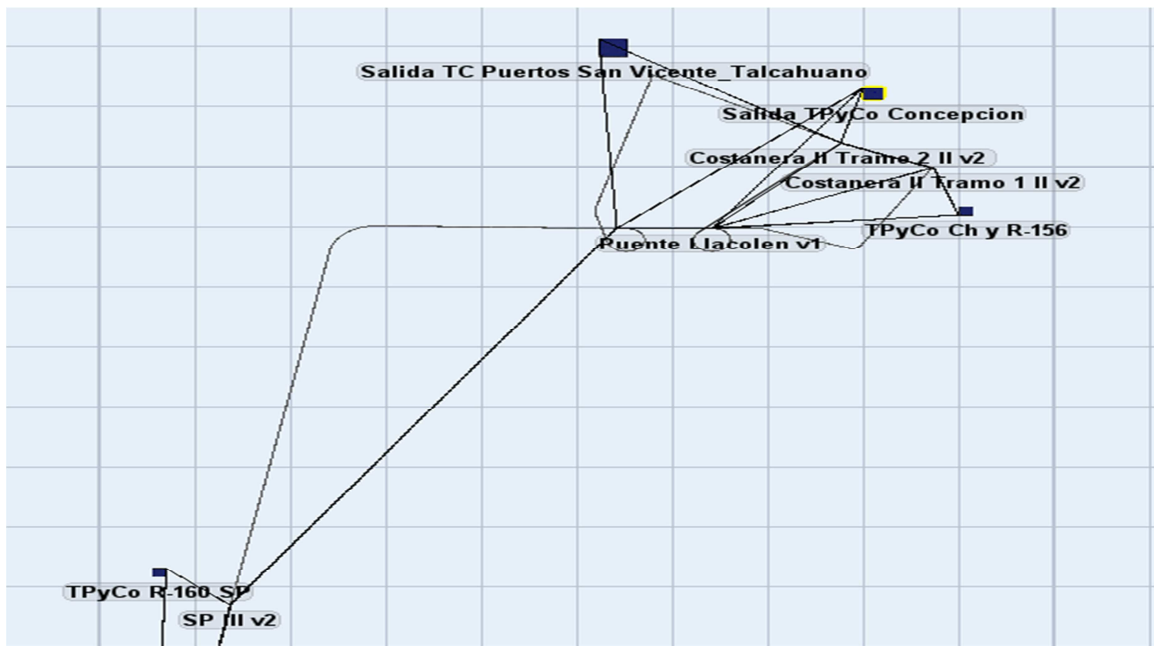


Figura 6: Modelo real construido en Flexsim, primer ejemplo: vista amplia.

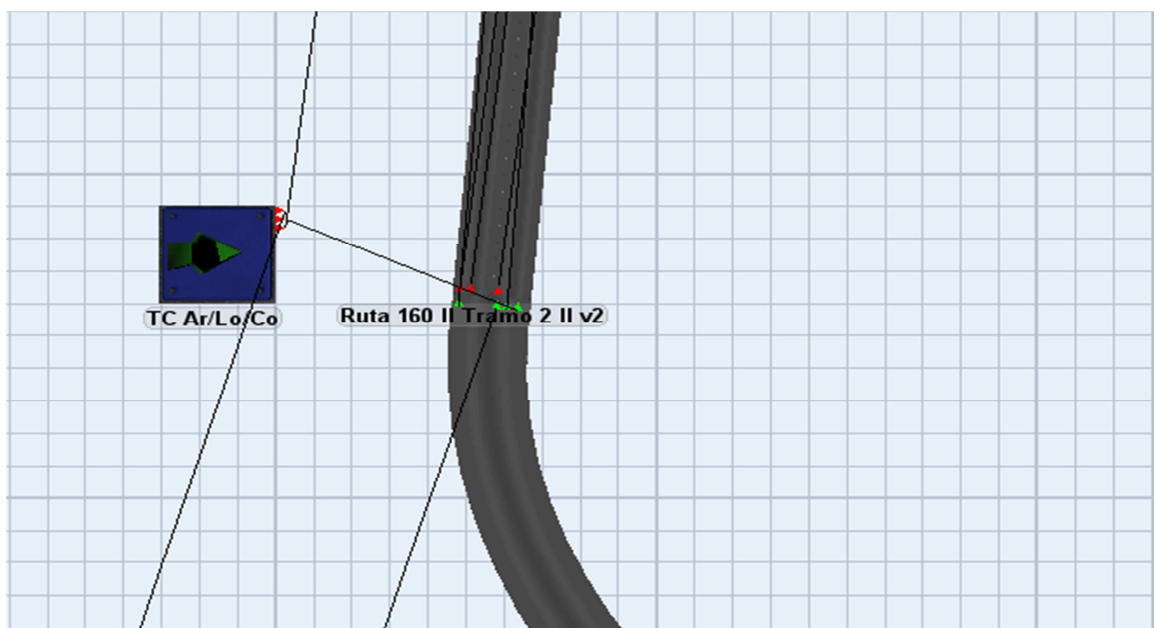


Figura 7: Modelo real construido en Flexsim, segundo ejemplo: zoom en carretera.

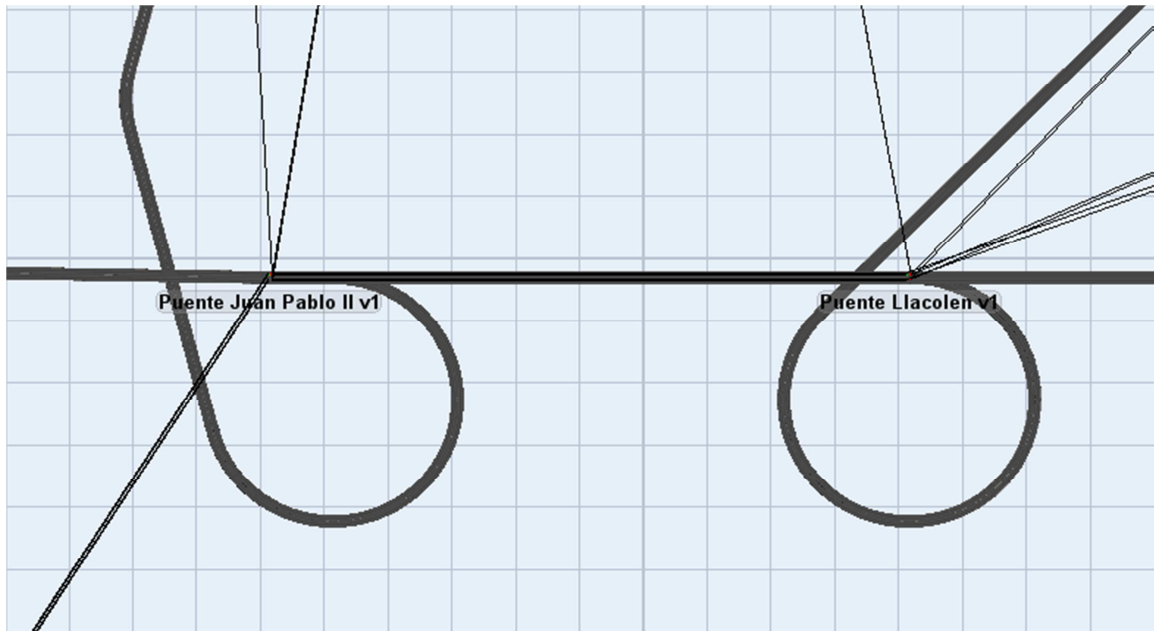


Figura 8: Modelo real construido en Flexsim, tercer ejemplo: zoom a puentes.

Sobre la unidad de tiempo utilizada, cabe indicar que se decidió que una unidad de tiempo del simulador Flexsim sea equivalente a un segundo de la realidad. El marcador de tiempo y velocidad de simulación se pueden apreciar en la figura:

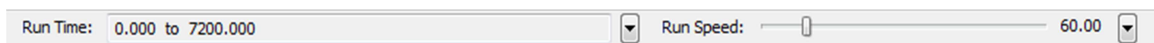


Figura 9: Marcadores de tiempo en Flexsim.

En la figura anterior se ven los valores que deben ser designados a las propiedades del reloj simulador, antes de iniciar el modelo:

- “*Run Time*” es el reloj que muestra el tiempo transcurrido, en donde una unidad de tiempo del simulador equivale a un segundo de la realidad en este modelo, y además se establece la duración de la simulación. La duración de la simulación se estableció en 7200, lo que equivale a 2 horas de simulación. Se utilizó 2 horas para tener un margen de media hora antes, para que llegue el flujo proveniente de Arauco, Lota, Coronel, pues como la hora punta mañana es considerada de 7:30 a 8:30, y media hora después para el cálculo del recorrido estudiado completo durante el paso por la

Ruta 160 en su horario punta de la mañana, que es el punto más crítico de todos durante el día.

- “Run Speed” debemos modificarlo de 1.00 a 60.00 puesto que el valor que entrega el reloj del simulador corresponde a 1 unidad de tiempo Flexsim igual a un segundo real, por lo tanto al usarlo en 60, quiere decir que por cada 1 segundo real el simulador avanzara 60 unidades de tiempo Flexsim. Cabe destacar que aumentar la velocidad de la simulación no afecta en los resultados obtenidos.

Después, se continuó ingresando los tiempos entre llegadas (los datos obtenidos por medio de la estimación presentada previamente). La manera de ingresar estos datos fue por medio de las estimaciones realizadas y explicadas anteriormente, cuyo valor fue ingresado en la distribución estadística ajustada previamente según sea el caso, es decir, logarítmica para flujos congestionados, y exponencial para flujos no congestionados (o flujos libres). A continuación en la Tabla 10 se muestra que distribución fue asignada a cada fuente o flujo de entrada, posteriormente se explica por qué fue utilizada.

Transporte Particular y Colectivo	Entradas			Flujo Max
TPyCo R-160 Ar / Lo / Co	Arauco	Lota	Coronel	2597
TPyCo R-160 SP	San Pedro de la Paz			2256
TPyCo R-156 y Ch	Chiguayante	Ruta 156		3136
TPyCo Las Golondrinas	Hualpén			1822
Transporte de Carga	Entradas			Flujo Max
TC R-160 Ar / Lo / Co	Arauco	Lota	Coronel	539

Tabla 9: Flujos ocupados en el simulador para situación actual.

Transporte Particular y Colectivo	Tasa esperada Θ	Distribución Estadística
TPyCo R-160 Ar / Lo / Co	1,386	exponential(0; 1,386; 0)
TPyCo R-160 SP	1,569	lognormal(0; 1,569; 0,01; 0)
TPyCo R-156 y Ch	1,148	exponential(0; 1,148; 0)
TPyCo Las Golondrinas	1,976	exponential(0; 1,976; 0)
Transporte de Carga	Tasa esperada Θ	Distribución Estadística
TC R-160 Ar / Lo / Co	6,676	exponential(0; 6,386; 0)

Tabla 10: Tasas y sus respectivas distribuciones estadísticas para situación actual.

Para el caso de “R-160 SP” se utilizó una distribución estadística distinta a las demás, puesto que se trata de un flujo congestionado (demasiados automóviles en un espacio

reducido), es decir, es el único tramo donde se trabaja con flujos congestionados en el modelo formando un atochamiento producto de la gran cantidad de vehículos para una ruta que no da abasto para tantos en ese instante. Por lo tanto, las demás tasas fueron insertadas en una distribución estadística exponencial, ya que en estos casos se trata de flujos libres. (Ver Marco Teórico, página 13, 14 y 15, explicación de cada modelo y por qué su utilización para la inclusión de dicha distribución estadística en la simulación final).

Finalmente, se repite la misma analogía para los años continuos y así obtener las tasas respectivas y su asignación de distribución estadística para cada año siguiente que será simulado en el *software* (revisar Anexo A: Flujos vehiculares y Tiempo entre llegadas, p.70).

Conveyor (banda transportadora): una vez realizado el estudio piloto, se decidió utilizar el objeto *Conveyor* puesto que el transporte de las entidades por medio de la banda transportadora se realiza, por defecto, de igual manera a cómo se comporta el tránsito en situaciones de congestión vehicular, el último de la cola espera a que los demás pasen, es decir, según orden de llegada (FIFO: primero en llegar, primero en salir). Además, la otra razón por la que se pensó en utilizar la banda transportadora es que permite ingresar la velocidad promedio, capacidad y longitud para cada objeto. (Ver en el Anexo B: Longitud y Velocidades para cada Tramo del modelo, p.72).

4.6 Verificación

El proceso de verificación se dio a partir de lo que se logró en el Estudio Piloto. Era indispensable realizar el reconocimiento de los objetos que mejor cumplían las funciones dentro de un esquema de tránsito desde un principio, para no cometer errores en un principio y tener que volver atrás en etapas ya más avanzadas en análisis. Es por ello que fue necesaria una exploración previa del simulador, que permitiera comprobar antes de comenzar a ingresar los datos finales.

Además, cabe destacar que se incluyeron verificaciones a medida que se iba construyendo el modelo, para evitar cualquier tipo de duda y confirmar que el modelo de simulación corría de acuerdo a lo planteado en el diagrama lógico de simulación (ver p.35 y 36).

4.7 Validación

El proceso de validación es muy importante al momento de llevar a cabo la simulación, esto dado que de esta etapa depende si los datos que se ocuparán para el desarrollo del modelo de simulación son los correctos o no. Por lo tanto, en caso de dar resultados favorables la validación de los datos recolectados, se puede pasar a la etapa del Diseño experimental y las posteriores Ejecuciones de producción y análisis. Por el contrario, en caso de resultar negativa la validación, significa que los datos recolectados para el desarrollo del modelo de simulación deben ser corroborados o simplemente realizarse nuevamente desde un principio.

Primero que todo, se calculó el número de réplicas que deben ser realizadas para que los valores que arroje el simulador representen lo que en realidad sucede en el sistema. Para decidir el número final de réplicas, fue necesario llevar a cabo un número arbitrariamente definido de réplicas iniciales, las cuales entregarán valores estadísticos que permitirán saber si es necesario realizar más réplicas para validar el modelo. Luego, se decidió efectuar cinco ejecuciones iniciales, buscando validar respecto al tiempo de estadía en el sistema, según opinión profesional (conductores de transporte de carga que circulan por la red simulada), cuando hay tráfico el tiempo de viaje es aproximadamente dos horas y media para el recorrido total, es decir, 150 minutos o 9000 segundos.

De esta manera, los datos estadísticos de interés después de las cinco ejecuciones, se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 11: Estadística descriptiva de Fuente Arauco a Puertos San Vicente o Talcahuano.

Media	8039,760 (seg)
Error Típico (1%)	80,398 (seg)
Desviación Estándar	58,606 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Estos valores obtenidos son los que se requieren para definir el número de réplicas necesarias para la validación correspondiente, utilizando la siguiente fórmula:

$$N = \left(\frac{SK}{E} \right)^2$$

Dónde:

N = número mínimo de réplicas.

S = desviación estándar estimada de las primeras réplicas.

K = constante *t-student*, correspondiente al nivel de confianza deseado (4,604 equivalente a un nivel de confianza del 99%).

E = error permitido en el estimado del tiempo.

Reemplazando los valores de la tabla en la fórmula anterior, se obtuvo el siguiente número mínimo de réplicas necesarias para validar el modelo:

Tabla 12: Número de réplicas necesarias para validación.

Sistema	Número de Réplicas
Arauco - Puertos Sn Vte / Thno	11,263

Fuente: Elaboración Propia.

Conforme a lo anterior, tenemos que el número de réplicas necesarias es de 12 repeticiones de ejecuciones del modelo, para poder validar los tiempos en el sistema. El resumen estadístico necesario para la validación, luego de hechas las 12 repeticiones, se presenta en la siguiente tabla, las cuales contienen los datos entregados por el experto (los tiempos del sistema entregados por el simulador están en segundos):

Tabla 13: Validación en base a tiempo en sistema.

Fuente	Promedio Modelo Real
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	7153,386 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	905,785 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	Variación
Arauco - Puertos SV/T	8059,171 (seg)	9000 (seg)	10,454%

Fuente: Elaboración Propia.

Como la variación del valor no es mayor a 15%, el modelo de simulación construido se considera como validado.

(Nota: Cabe resaltar que la segunda etapa del modelo (Costanera Tramo 2 – Puertos San Vicente/Talcahuano) mantiene un tiempo constante, ya que la Costanera da abasto para los flujos simulados y en ninguna ocasión se ve sobrepasada su capacidad en consideración con los flujos vehiculares.)

4.8 Diseño experimental

4.8.1 Suplementos

La fase de suplementos es el último paso de la Metodología de Estudios de Tiempo expuesta anteriormente. Este paso no fue incluido en la fase de Recopilación de Datos, ya que es donde se detectan las causas de los retardos en los tiempos observados, observación que es de gran ayuda para identificar los problemas del sistema simulado, lo que da pie a la posterior propuesta de solución al problema.

De esta manera, se observó que el principal problema que ocasiona las demoras en los tiempos de viaje dentro del sistema estudiado, corresponde al aumento del flujo vehicular en el sector de San Pedro de la Paz tanto de particular como vehículos de carga, que a pesar de las restricciones transitan durante los horarios de 7:30 a 9:00 horas por motivos de entregas a tiempo de sus mercancías a los puertos congestionando aún más las vías en dirección a los Puentes (sentido Sur – Norte), provocando un atochamiento desde el enlace

Coronel – San Pedro, pasando por el sector céntrico de San Pedro de la Paz donde se generan puntos críticos hasta llegar a los Puentes. En estos momentos está en marcha el proyecto de la tercera pista en la Ruta 160 concentrada en San Pedro de la Paz, con el fin de paliar el gran flujo vehicular proveniente de esos sectores, además, se está estudiando la supuesta opción del cuarto puente para el transporte de carga.

4.8.2 Escenarios

Visto lo anterior, se procedió a proponer como escenario alternativo para evaluación la tercera pista del proyecto de la Ruta 160 para eliminar los puntos altos de congestión. Cabe destacar que esta propuesta de análisis es factible, pues la tercera pista a la que se hace alusión, está en proceso de construcción, donde la primera etapa contempla alrededor de dos kilómetros en el sector de San Pedro de la Paz entre el cruce Michaihue hasta la Diagonal Biobío. Por lo cual, el escenario de estudio con proyecciones en el aumento del parque vehicular será la extensión hasta el acceso a Coronel que es una pretensión del proyecto.

La propuesta dentro del modelo simulado puede ser observada en las siguientes figuras (página siguiente); la figura 10 representa la situación actual y la figura 11 representa el escenario propuesto:

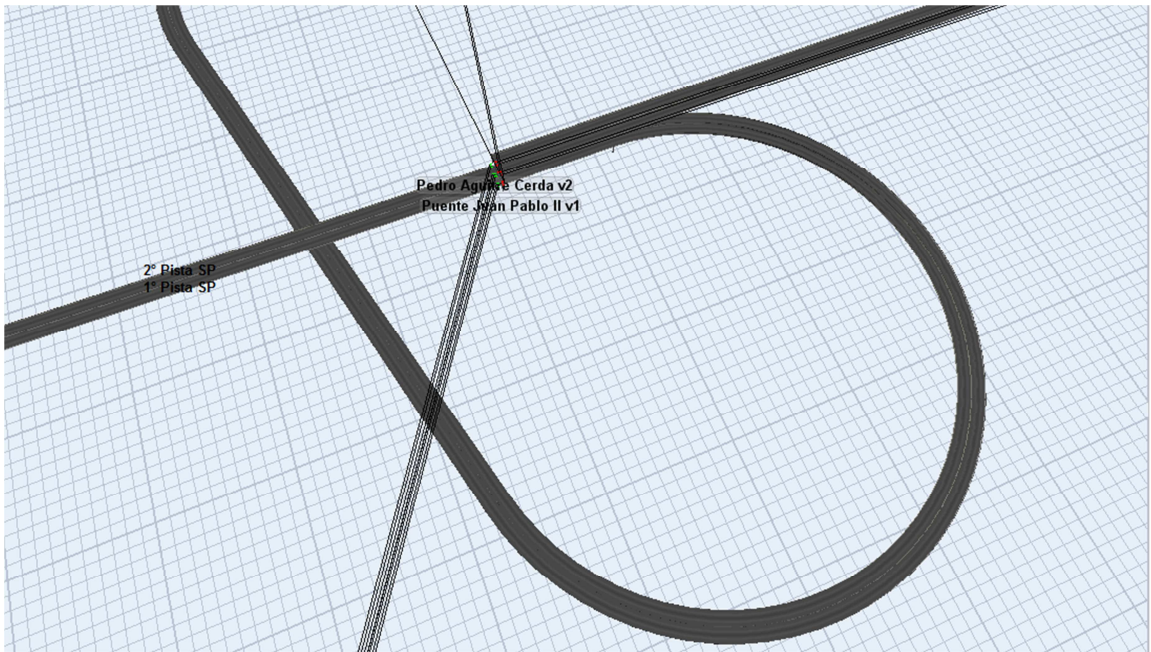


Figura 10: Sección San Pedro de la Paz - Puente Juan Pablo II – Pedro Aguirre Cerda, situación actual.

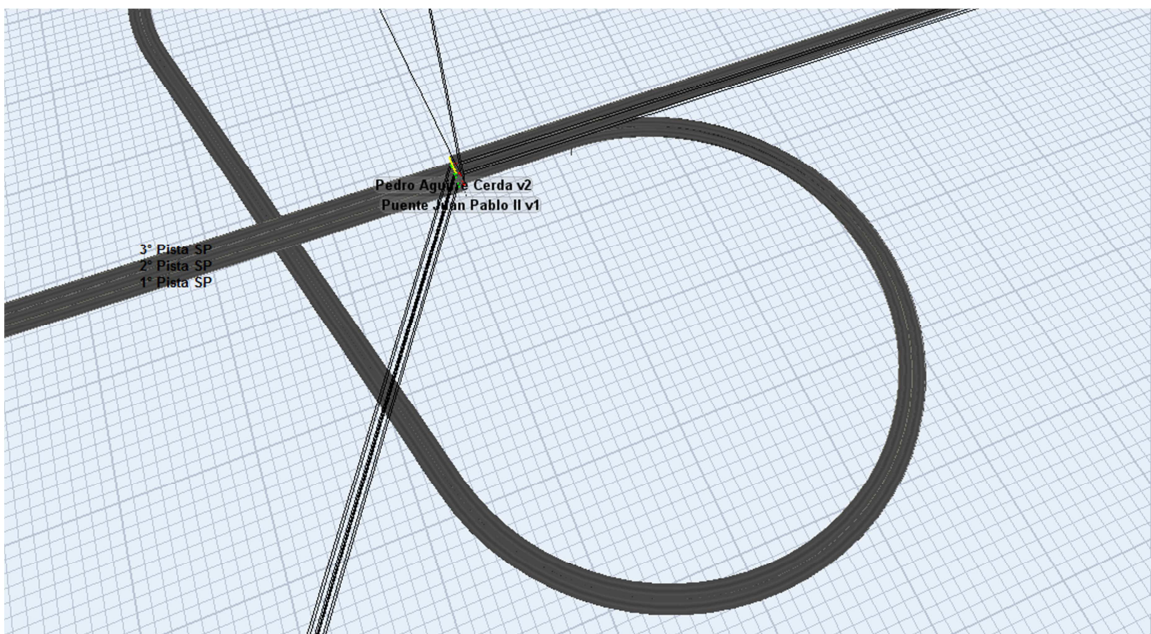


Figura 11: Sección San Pedro de la Paz – Puente Juan Pablo II – Pedro Aguirre Cerda, escenario 3° pista.

Y el otro escenario alternativo, se conforma con el supuesto proyecto del cuarto puente para el transporte pesado o de carga. Este escenario tiene cabida en el modelo nuevo (modelo con tres pistas). Cabe señalar, que se viene hablando de este proyecto desde el año 2009 como parte de la Estrategia de Desarrollo Regional en el Plan Director de Infraestructura MOP - Región del Biobío, y por ello se hace alusión a “supuesto” proyecto. Notar que la localización del puente obedece a una supuesta idealización y se puede observar en la siguiente figura 12:

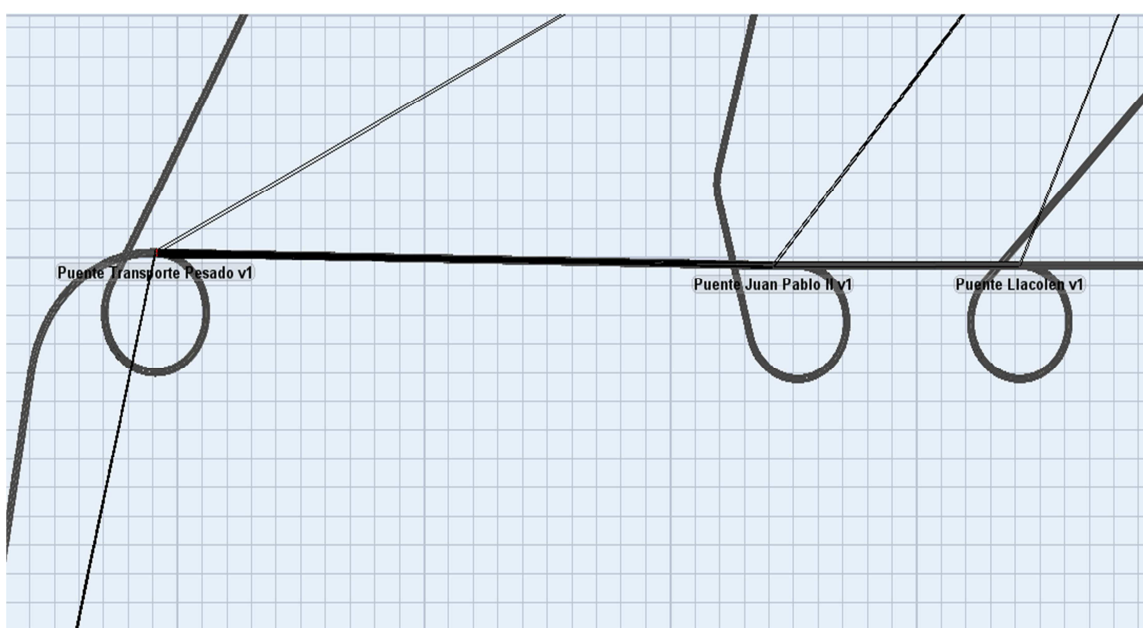


Figura 12: Idealización posible cuarto puente para vehículos pesados.

4.9 Ejecuciones de producción y análisis

Definición de ejecuciones de producción para los escenarios propuestos:

4.9.1 Escenario propuesto N°1: Proyecto en proceso de construcción ‘Tercera pista Ruta 160’

Este proyecto tiene como punto de partida la construcción de la tercera pista en la Ruta 160 en el sector de San Pedro de la Paz entre el cruce Michaihue hasta la Diagonal Biobío (aproximadamente dos kilómetros), con la idea de realizar una extensión de la tercera pista hasta el acceso a Coronel. En primer lugar se muestra la realización del modelo para estos dos kilómetros aproximados con tercera pista solo para el año 2015, con un posterior emplazamiento a la extensión de la tercera pista hasta el acceso a Coronel, el ideal que se pretende lograr con el fin de disminuir la congestión vehicular.

A continuación se muestra el resumen de las 12 réplicas efectuadas para el año 2015 con los dos kilómetros de tercera pista:

Tabla 14: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘tercera pista Ruta 160’ (para los dos kilómetros construidos) para el año 2015.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo (2K)
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6794,011 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	905,785 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo (2K)	Promedio Modelo Actual	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7699,796 (seg)	8059,171 (seg)	4,459%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15: Diferencia de tiempo entre Modelo Actual y Nuevo (2K) 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (min)
359,375	5,990

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la tabla los tiempos de viaje en el modelo nuevo (con dos kilómetros construidos de tercera pista) se puede ver una variación del promedio entre el modelo actual y el modelo nuevo (2K) de 4,459% lo que llevado a minutos corresponde al orden cercano

de 6 minutos, lo que ayudaría en algo a reducir la congestión pero no una solución viable a futuro como única opción.

Una vez realizadas otras 12 réplicas, esta vez en el primer escenario propuesto con la idea de extensión hasta el acceso a Coronel, se obtuvieron los siguientes promedios de tiempos de viaje en el sistema para este año, los que se pueden ver a continuación:

Tabla 16: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘tercera pista Ruta 160’ (Modelo Nuevo) para el año 2015.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6064,096 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	905,785 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo	Promedio Sistema Actual	Variación
Arauco - Puertos SV/T	6969,880 (seg)	8059,171(seg)	13,516%

Fuente: Elaboración Propia.

Con los tiempos de viaje obtenidos en el modelo nuevo, se puede observar una variación del promedio del tiempo de viaje entre el modelo actual y nuevo de un 13,516%, lo que reflejado en segundos y minutos se ven en la tabla siguiente:

Tabla 17: Diferencia de tiempo entre Modelo Actual y Nuevo 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (segundos)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (minutos)
1089,291	18,155

Fuente: Elaboración Propia.

Según lo entregado por la tabla, con la solución temporal del proyecto de la tercera pista Ruta 160 (extendida) tenemos un ahorro en el tiempo de viaje del orden entre los 15 y 20 minutos, lo que en teoría solucionará bastante el problema de congestión vehicular.

Ahora, si bien no se sabe hasta cuándo esta solución temporal será viable, se realizó un análisis de tiempo por medio de las estimaciones obtenidas anteriormente (ver tabla 6 - p.33 o en su defecto Anexo A: Flujos vehiculares estimados y Tiempo entre llegadas, p.70) y de esa manera tener en cuenta la capacidad de solución conforme el parque vehicular crezca.

A continuación se pueden observar las tablas para los años 2016 y 2017:

Tabla 18: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2016 y 2015.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6145,854 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	906,807 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo (2016)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7052,660 (seg)	6969,880 (seg)	1,188%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 19: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2016 y 2015.

Aumento de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Aumento de tiempo Sistema Nuevo (min)
82,780	1,380

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 20: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2017 y 2015.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6277,436 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	910,182 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo (2017)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7187,618 (seg)	6969,880 (seg)	3,124%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 21: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2017 y 2015.

Aumento de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Aumento de tiempo Sistema Nuevo (min)
217,737	3,629

Fuente: Elaboración Propia.

Analizando los resultados para los años siguientes 2016 y 2017, el aumento del parque vehicular no influirá en demasía, pues no provoca un colapso en las vías y se comporta de similar manera a cómo actúa el modelo nuevo (tercera pista Ruta 160) en el año 2015, como se pudo ver en las tablas anteriores los promedios de tiempo de viaje eran prácticamente idénticos.

Por lo tanto, queda demostrado mediante este modelo de simulación, al menos para los años 2016 y 2017 que la solución temporal proyecto ‘tercera pista Ruta 160’ (extendida hasta acceso a Coronel) en construcción no debería tener mayores complicaciones y comportarse

de similar forma al año 2015, que de acuerdo a los resultados previos el tiempo de viaje para esta red disminuiría por lo menos de 15 a 20 minutos.

Continuando con el análisis, lo que ocurre para el año 2018 se puede ver en las siguientes tablas:

Tabla 22: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2018 y 2015.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6628,837 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	910,323 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo (2018)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7539,160 (seg)	6969,880 (seg)	7,551%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 23: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2018 y 2015.

Aumento de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Aumento de tiempo Sistema Nuevo (min)
569,280	9,488

Fuente: Elaboración Propia.

Ahora, en el año 2018 empezaría un aumento en los tiempos de viaje para la red en comparación al periodo 2015-2017, lo que quiere decir que el incremento del parque vehicular si afectaría el flujo vehicular de las pistas, es decir, comenzarían los problemas de congestión, tal vez no del nivel que hay actualmente con dos pistas, pero si influiría. Esta aseveración se puede observar claramente, ya que el aumento en el tiempo de viaje para el año 2018 respecto a 2015 es considerable, consecuencia de ello, una diferencia que bordea el orden de los 10 minutos.

Además, se incluirá la diferencia entre el tiempo de viaje actual (2015 con dos pistas) y la proyección para 2018 en la siguiente tabla:

Tabla 24: Comparación Tiempo de Viaje de proyección 2018 y Modelo Actual 2015.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo (2018)	Promedio Modelo Actual (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7539,160 (seg)	8059,171 (seg)	6,452%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 25: Diferencia de tiempo entre proyección 2018 y Modelo Actual 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (min)
520,011	8,667

Fuente: Elaboración Propia.

Aquí podemos notar que la diferencia entre el Modelo Actual (dos pistas) y Modelo Nuevo 2015 (tres pistas, extendidas hasta acceso a Coronel) que andaba en el orden de los 15 a 20 minutos, para el año 2018 tiene una baja considerable, la cual pasa a tener una diferencia de 8 a 9 minutos con el peor de los casos que es la situación actual con dos pistas en la Ruta 160.

Y por último para este escenario dejamos la proyección para el año 2019, donde se puede apreciar que la tendencia de volver al estado que hay actualmente (caos de congestión vehicular en la Ruta 160 con dos pistas) proyectado en el año 2018, donde se demostró que comenzará nuevamente el problema de tráfico. Según la simulación proyectada para el año 2019 se indican valores que señalan que así será:

Tabla 26: Comparación Tiempo de Viaje de Modelo Nuevo entre años 2015 y 2019.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6902,121 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	910,889 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo (2019)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7813,011 (seg)	6969,880 (seg)	12,097%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 27: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo 2019 y 2015.

Aumento de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Aumento de tiempo Sistema Nuevo (min)
843,131	14,052

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a las tablas, se evidencia la pérdida obtenida en el año 2015 con el proyecto de la 'tercera pista Ruta 160', es decir, aquellos 15 a 20 minutos de disminución del tiempo de viaje para dicha red, ya en el año 2019 se pierde prácticamente por completo.

Para evidenciar aún más esta proyección, se muestra en las siguientes tablas la comparación del tiempo de viaje para la situación actual y la proyectada para el año 2019.

Tabla 28: Comparación Tiempo de Viaje Modelo Actual y proyección año 2019.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo	Promedio Modelo Actual (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7813,011 (seg)	8059,171 (seg)	3,054%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 29: Diferencia de tiempo entre proyección 2019 y Modelo Actual 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (seg)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo (min)
246,160	4,103

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, podemos inferir de acuerdo a estas tablas que el comportamiento esperado para el año 2019 con el escenario propuesto ‘tercera pista’ (extendida hasta acceso a Coronel) será prácticamente el mismo de hoy en día en la Ruta 160 con dos pistas, es decir, una congestión vehicular considerablemente grande.

A partir del análisis anterior se da comienzo al segundo escenario propuesto:

4.9.2 Escenario propuesto N°2: Suposición Proyecto ‘Cuarto puente para vehículos pesados o de carga’ que busca descongestionar la Ruta 160 sector de acceso a los puentes

Ya hecho el análisis para el primer escenario en el cual se pudo inferir que aproximadamente en el año 2018 empezarían a volver las complicaciones con la congestión vehicular y en 2019 serán de magnitud, se procedió a dar inicio al segundo escenario consistente en una construcción de un cuarto puente para vehículos pesados, es decir, se analizará el comportamiento del flujo vehicular a partir del año 2018 donde comienza a volver el problema.

Notar que la suposición es a partir del año 2018, pues se da a entender la existencia de una brecha de 3 años sin mayores complicaciones de tráfico vehicular, dando por hecho que en esos años se puede construir el puente.

Cabe destacar que el análisis fue hecho para un flujo de vehículos pesados equivalente al 10% del total, que es en promedio la cantidad que circula en los horarios punta por la Ruta 160 y esta será para comparar los tiempos de viaje para el mismo tramo (Arauco – Puertos San Vicente y Talcahuano), obviando el tiempo de viaje de los camiones por el puente nuevo, ya que no se conoce una propuesta concisa de donde estaría ubicado, además de darse por hecho que habrá una disminución en su tiempo de viaje hasta los puertos de San Vicente y Talcahuano. A continuación, se muestran las tablas con los tiempos de viaje y sus diferencias para los años 2018, 2019, 2020 y una proyección a 2025:

Tabla 30: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2018.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo II
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6034,893 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	910,323 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo II (2018)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	6945,216 (seg)	6969,880 (seg)	0,354%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 31: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2018 y Modelo Nuevo 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo II (seg)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo II (min)
24,664	0,411

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede ver que el tiempo de viaje es prácticamente el mismo, por lo tanto, la creación del puente mantendría el ahorro de tiempo que está en el orden de los 15 a 20 minutos.

Tabla 32: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2019.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo II
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6059,358 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	910,889 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo II (2019)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	6970,247 (seg)	6969,880 (seg)	0,005%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 33: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2019 y Modelo Nuevo 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo II (seg)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo II (min)
0,367	0,006

Fuente: Elaboración Propia.

Lo mismo que el caso anterior, el tiempo es igual prácticamente, por lo tanto no habría problemas de congestión vehicular para el año 2019.

Tabla 34: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2020.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo II
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6104,017 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	911,324 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo II (2020)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7015,341 (seg)	6969,880 (seg)	0,652%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 35: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2020 y Modelo Nuevo 2015.

Aumento de tiempo Sistema Nuevo II (seg)	Aumento de tiempo Sistema Nuevo II (min)
45,461	0,758

Fuente: Elaboración Propia.

Aquí continúa siendo similar el tiempo de viaje, lo que indica que en el año 2020 tampoco debiera existir complicaciones en el ámbito de congestión vehicular.

Y por último, se realizó una proyección para el año 2025, cabe resaltar que estos análisis se efectuaron con los flujos máximos proyectados para cada año (ver Anexo A: Flujos Vehiculares estimados y Tiempo entre Llegadas, p.70).

Tabla 36: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2025.

Fuente	Promedio Modelo Nuevo II
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6959,648 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	1008,534 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo II (2025)	Promedio Modelo Nuevo (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7968,182 (seg)	6969,880 (seg)	14,323%

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 37: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2025 y Modelo Nuevo 2015.

Aumento de tiempo Sistema Nuevo II (seg)	Aumento de tiempo Sistema Nuevo II (min)
998,302	16,638

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la proyección hecha y su posterior análisis de las ejecuciones, se puede observar e indicar que en el año 2025 se espera un comportamiento de las vías, ahora con el cuarto puente para vehículos pesados, similar al que hay hoy en la Ruta 160 con dos pistas. Como se mencionó anteriormente, estos análisis están hechos en base a una proyección en la cual se ocupó el flujo máximo obtenido para dicho año. La comparación a la que se hace alusión está en la siguiente tabla:

Tabla 38: Tiempo de viaje, escenario propuesto ‘Cuarto puente para vehículos pesados’ para el año 2025 en comparación a Situación Actual (2015).

Fuente	Promedio Modelo Nuevo II
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	6959,648 (seg)
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	1008,534 (seg)

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema	Promedio Modelo Nuevo II (2025)	Promedio Modelo Actual (2015)	Variación
Arauco - Puertos SV/T	7968,182 (seg)	8059,171 (seg)	1,129%

Fuente: Elaboración Propia.

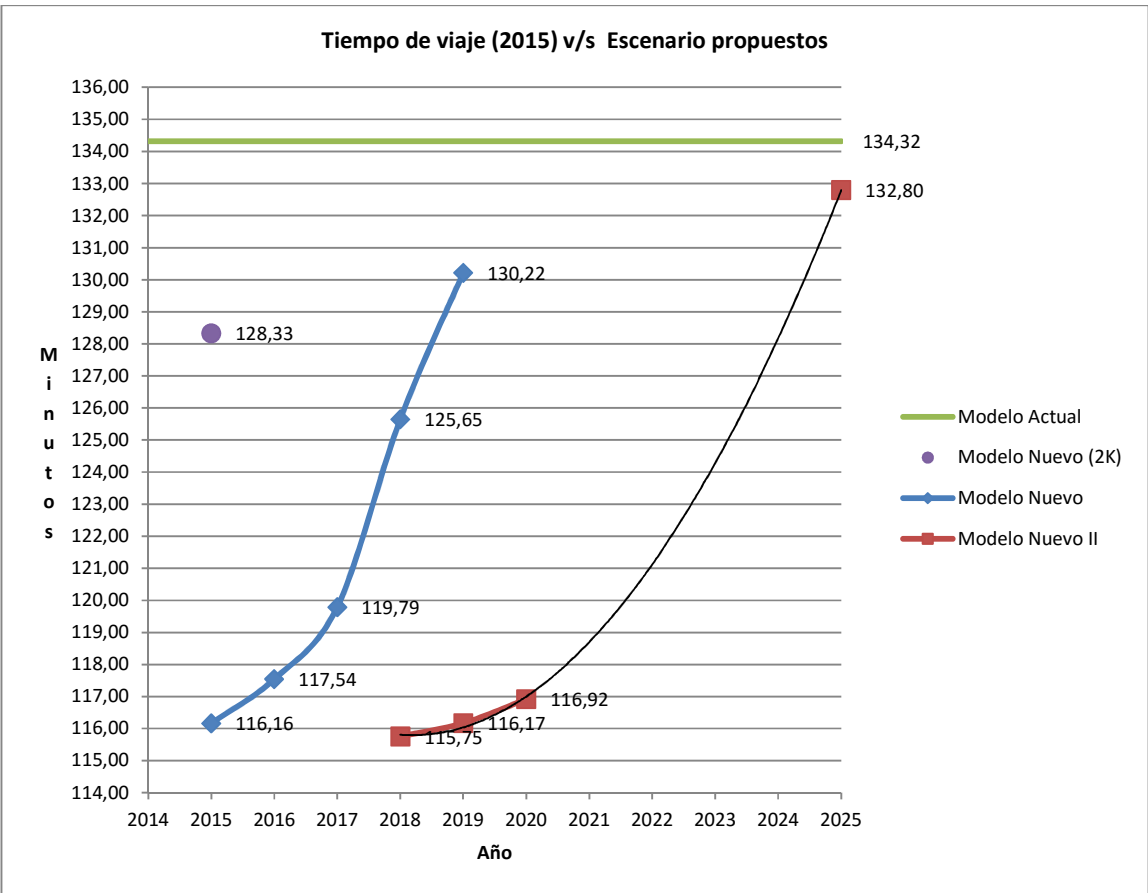
Tabla 39: Diferencia de tiempo entre Modelo Nuevo II año 2025 y Modelo Actual 2015.

Ahorro de tiempo Sistema Nuevo II (seg)	Ahorro de tiempo Sistema Nuevo II (min)
90,989	1,516

Fuente: Elaboración Propia.

Finalizado el proceso de Ejecuciones de producción y Análisis, se confeccionó un gráfico que muestra los comportamientos de cada escenario de manera comparativa respecto del tiempo de viaje (en minutos) actual en el año 2015:

Gráfico 4: Comparación tiempo de viaje actual (2015) con cada escenario.



Fuente: Elaboración Propia

4.10 Considerar un número mayor de ejecuciones

Después de efectuar las repeticiones para cada escenario propuesto y el análisis respectivo de los datos obtenidos por dichas réplicas, se decidió que no era necesario aumentar el número de réplicas. Dado que:

- El número de ejecuciones se determinó con un nivel de confianza de un 99% (ver fórmula en Capítulo 4.7 Validación, p.42 y 43), que lo hace muy fiable para los objetivos que busca el proyecto de investigación.
- Se concretó el objetivo de analizar ambos escenarios propuestos por medio de la simulación sin mayores dificultades ni contratiempos, otorgando los resultados esperados luego de las repeticiones determinadas por la fórmula.

Por lo tanto, se concluyó que es irrelevante aumentar el número de ejecuciones.

4.11 Documentación e Implementación u Opciones de Aplicación

De acuerdo a la Metodología Propuesta estas dos etapas se desarrollan por separado, para efectos de la investigación se han juntado, dado que la Documentación es, en sí, este informe.

Por otro lado, las opciones de implementación pasa por conversaciones que se puedan llegar a generar con las entidades que se ocupan de prevenir el correcto funcionamiento del sistema o red estudiada, que para este caso se trata de la Gobernación de Concepción, más en específico, a la Dirección de Transito de aquella institución que debiera trabajar en conjunto con la Secretaria de Planificación de Transporte (SECTRA), y Ministerio de Obras Públicas (MOP) en caso de dar pie a dichos proyectos.

5 RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos por medio de la simulación, en base al cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto.

5.1 Modelar las rutas de la Red por tramos/secciones de acuerdo a las especificaciones que cada segmento contempla en el *software* Flexsim

El resultado obtenido para este objetivo se enmarca dentro de lo esperado, esto se debe a que la estructura de la Metodología de Simulación propuesta por Jerry Banks contempla los pasos de Verificación y Validación. Además, la Metodología propuesta para esta tesis con base en lo indicado por Banks, se hizo un Estudio Piloto previo a estos pasos para corroborar que los objetos utilizados para la simulación son los correctos, lo cual en caso de no dar los resultados que se esperaban, solo se debía comprobar los datos utilizados y no hacer un modelo nuevo completamente. Cabe destacar que el número de ejecuciones para el modelo se validó con un nivel de confianza del 99%, que lo hace sumamente fiable para los objetivos del proyecto.

5.2 Realizar un análisis estadístico de la situación actual y de los escenarios propuestos y modelados en el simulador para el horario punta

Se realizó un análisis estadístico de la situación actual y de los modelos simulados para los escenarios propuestos, entregando estadística descriptiva de la situación actual que antes no existía. Así también, se entregaron los resultados de las proyecciones de los flujos vehiculares para los años siguientes, y de la mano de esas proyecciones, los Tiempos entre llegadas y los Tiempos de viaje en el Sistema o Red estudiada.

Ahora se explicará brevemente como se obtuvieron las proyecciones, para posteriormente determinar los Tiempos entre llegadas y los Tiempos de viaje en el Sistema.

Como se indicó anteriormente (ver Capítulo 4.4 Recolección de Datos, p.30 y 31) el incremento promedio porcentual para los últimos 5 años fue un aproximado de 8%, conforme a eso, el proceso de proyección fue el siguiente:

Tenemos que los últimos datos medidos de flujos vehiculares por parte de SECTRA fueron del año 2010 por lo tanto, se parte de ese año la proyección hasta 2015 para luego considerar un flujo aproximado de la situación actual. Por ejemplo, los flujos para Coronel y San Pedro de la Paz en 2010 fueron:

R-160 Coronel	Límite Inf	Promedio	Límite Sup
Año 2010	1241	1688	2134
R-160 SP	Límite Inf	Promedio	Límite Sup
Año 2010	2135	2903	3670

Tabla 40: Ejemplo de flujo vehicular R-160 año 2010.

Ahora se estimarán los flujos máximos para el año 2015:

$$\text{Año 2015 (Coronel)} = 2134 * (1,08)^5 = 3136$$

$$\text{Año 2015 (San Pedro de la Paz)} = 3670 * (1,08)^5 = 5392$$

Cabe señalar, que se ejemplifica el flujo máximo, pues ese flujo fue el que se ocupó para la obtención de los resultados de la simulación.

Una vez que ya se definió el flujo vehicular para el año, se pudo calcular el tiempo entre llegadas, no obstante, se debe recordar que el flujo estaba dividido en Transporte Particular/Colectivo y Transporte de Carga, donde el transporte de carga representaba el 10% del flujo que transita en los horarios punta por San Pedro de la Paz, por lo tanto, se realizó un cálculo previo antes de obtener los tiempos entre llegadas:

Como en San Pedro de la Paz para el año 2015 se esperaba un flujo de 5392 vehículos, esto implica que el número de camiones que transitara en esos horarios, correspondiente a la fuente 'TC R-160 Ar/Lo/Co' será:

$$\text{Transporte de Carga} = 5392 * 0,1 = 539$$

Si bien el flujo vehicular proyectado para San Pedro de la Paz es 5392, no es el valor que corresponde a la fuente ubicada ahí ‘R-160 SP’, pues la fuente corresponde a la diferencia entre el flujo total para San Pedro de la Paz y el que proviene desde Coronel (proyectado para el mismo), es decir:

$$\text{Ruta 160 SP} = 5392 - 3136 = 2256$$

Luego, el flujo vehicular proveniente desde Arauco, Lota y Coronel, correspondiente a la fuente ‘R-160 Ar/Lo/Co’ es:

$$\text{Transporte Particular y Colectivo} = 3136 - 539 = 2597$$

Entonces, los tiempos entre llegadas son los siguientes:

Fuente	Flujo TPyCo	Tasa esperada Θ	Flujo TC	Tasa esperada Θ
R-160 Ar/Lo/Co	2597	1,386	539	6,676
R-160 SP	2256	1,596	-	-

Tabla 41: Ejemplo de Tiempos entre llegadas R-160 año 2015.

Después de tener todos los tiempos entre llegadas definidos para las fuentes de entrada (ver Anexo A: Flujos vehiculares estimados y Tiempo entre llegadas, p.70 se procedió a ejecutar el modelo en el *software*, y de esa manera obtener los resultados para cada año en los horarios punta de la mañana. Que para continuar el ejemplo en el año 2015 dieron los siguientes resultados:

Fuente	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	Variación
Arauco - Costanera II Tramo 2 II	7153,386 (seg)		
Costanera II Tramo 2 II - Puertos SV/T	905,785 (seg)		
Sistema	Promedio Modelo Real	Promedio Experto	Variación
Arauco - Puertos SV/T	8059,171 (seg)	9000 (seg)	10,454%

Tabla 42: Ejemplo del Tiempo de viaje total año 2015.

Y finalmente es así como se obtiene el resultado para el modelo en el año que se está simulando (ver Anexo D: Tabla de Resultados, tiempos promedios (segundos) luego de las 12 ejecuciones para cada Modelo simulado en Flexsim, p.74).

A continuación se muestran las tablas de resultados en cuanto a los tiempos de viaje total para cada año en cada situación (Actual, Escenarios N°1 y N°2):

Año	Situación	Sistema	Promedio Modelo Nuevo	Promedio Situación Actual	Diferencia de Tiempo
2015	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	6969,880 (seg)	8059,171 (seg)	-1089,291 (seg)
2016	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7054,658 (seg)	8059,171 (seg)	-1004,513 (seg)
2017	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7135,135 (seg)	8059,171 (seg)	-924,036 (seg)
2018	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7534,622 (seg)	8059,171 (seg)	-524,549 (seg)
2019	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	8050,956 (seg)	8059,171 (seg)	-8,215 (seg)

Tabla 43: Comparación Tiempos de viaje Situación Actual y Escenario N°1.

Año	Situación	Sistema	Promedio Modelo Nuevo II	Promedio Situación Actual	Diferencia de Tiempo
2018	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	6937,263 (seg)	8059,171 (seg)	-1121,908 (seg)
2019	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	6971,398 (seg)	8059,171 (seg)	-1087,773 (seg)
2020	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7070,667 (seg)	8059,171 (seg)	-988,504 (seg)
...					
2025	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7885,597 (seg)	8059,171 (seg)	-173,574 (seg)

Tabla 44: Comparación Tiempos de viaje Situación Actual y Escenario N°2.

Año	Situación	Sistema	Promedio Modelo Nuevo II	Promedio Modelo 3P (2015)	Diferencia de Tiempo
2018	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	6937,263 (seg)	6969,880 (seg)	-32,617 (seg)
2019	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	6971,398 (seg)	6969,880 (seg)	+1,518 (seg)
2020	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7070,667 (seg)	6969,880 (seg)	+100,787 (seg)
...					
2025	Tercera Pista	Arauco - Puertos SV/T	7885,597 (seg)	6969,880 (seg)	+915,717 (seg)

Tabla 45: Comparación Tiempo de viaje Escenarios N°1 y N°2.

5.3 Evaluar la viabilidad de los escenarios propuestos frente a la proyección de los flujos vehiculares para el horario punta de la mañana

En este inciso se realizaron los mismos cálculos anteriores pero esta vez para los modelos de los escenarios propuestos, en el caso del Escenario N°1 la simulación comienza a partir del año 2015, ya que trata del proyecto que está en construcción de la tercera pista en la Ruta 160. En cambio, para el caso del Escenario N°2 la simulación comienza desde el año 2018, pues aquí se hace un supuesto que habla de un cuarto puente ya creado (se considera que durante los años 2015 a 2018 sería la construcción del puente para vehículos pesados).

De esa manera se pudo identificar que:

- El Escenario N°1 es considerado bueno como solución temporal hasta el año 2018, puesto que hasta ese año habría una reducción significativa de la congestión

vehicular, ya que a partir de 2019 la congestión vuelve a ser prácticamente la misma que la situación actual. A continuación, se muestra una representación gráfica de lo que se dice:

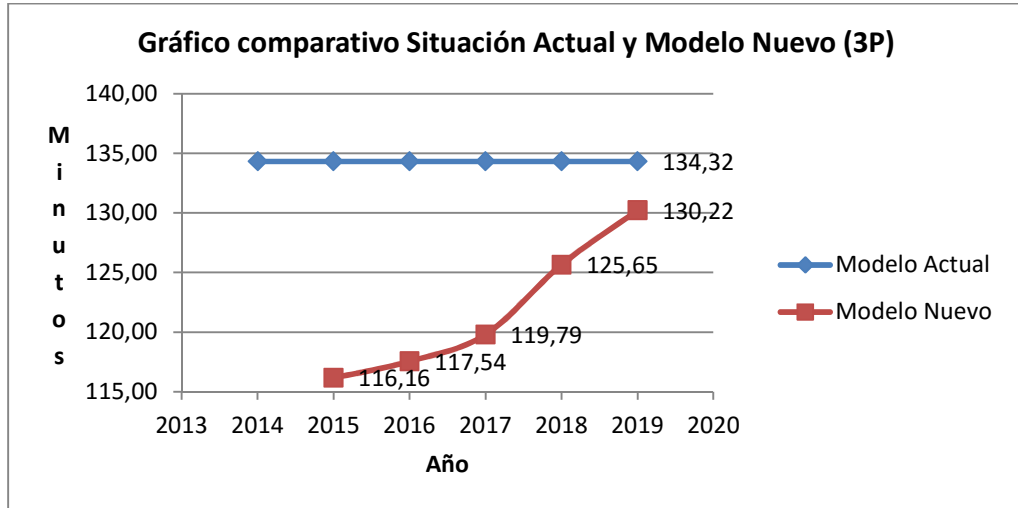


Gráfico 5: Comparación Situación Actual y Modelo Nuevo (3P).

- El Escenario N°2 resulta una buena propuesta, ya que comenzaría a partir del año en el cual estimamos que la congestión vehicular volvería a ocasionar problemas en los tiempos de viaje, es decir, tener el puente operando para el año 2018 ó 2019, traería muchos beneficios. De acuerdo a lo mostrado en el capítulo anterior (Ver Capítulo 4.9 Ejecuciones de Producción y Análisis, p.55 y 56), se realizó una proyección para los flujos en 2025 y recién en ese año podrían haber problemas de congestión como los que hay en la actualidad. A continuación, se deja un gráfico que ejemplifica lo anteriormente señalado:

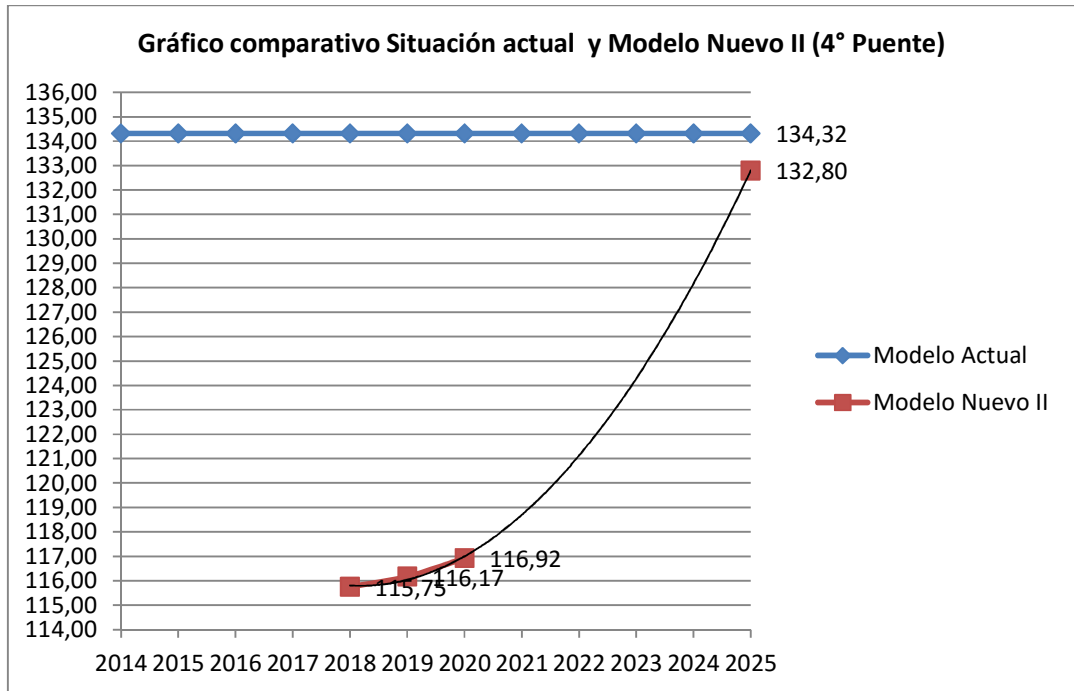


Gráfico 6: comparación Situación Actual y Modelo Nuevo II (4° Puente).

5.4 Generar una metodología de trabajo para la construcción de estudios de este tipo, que permita analizar proyectos viales antes de su puesta en marcha

Se estableció una Metodología Propuesta de Trabajo con base en la Metodología planteada por Jerry Banks para realizar Modelos de Simulación, que nos arrojó los resultados necesarios para poder ayudar a la toma de decisiones. Cabe destacar que esta Metodología apoyada con un sistema de información encargado de la generación de estadísticas respecto de los flujos vehiculares en puntos claves de las rutas, vale decir, que la entidad a cargo del tránsito tanto a nivel País, Regional o Comunal mantuviera una base de datos de los flujos vehiculares actualizada por lo menos cada uno o dos años definida por intervalos de tiempo, por ejemplo: punta mañana, fuera de punta, punta mediodía, punta tarde, etc., esta herramienta tendría un potencial muy alto de cara a la toma de decisiones en infraestructura logística.

6 CONCLUSIONES

El *software* Flexsim permite ejecutar estudios de tránsito, de encontrarse y ocuparse los elementos correctos que representen cada componente que es participe de una situación de tráfico vehicular. Gracias a la simulación desarrollada en este *software*, se pudo analizar y estimar el tiempo en que perdura la solución del Proyecto ‘Tercera Pista en la Ruta 160’ que busca disminuir la congestión vehicular que se genera en la Ruta 160 (Escenario N°1), más en específico, desde San Pedro de la Paz hasta los puentes de acceso a Concepción, si va dar abasto para absorber el flujo que está en constante crecimiento anualmente. El análisis desarrollado para el horario punta de la mañana (7:30 – 8:30) dio como resultado a tomar en consideración, que en el año 2018 comenzaría a notarse un aumento en el tiempo de viaje, con respecto a la gran disminución lograda en el año 2015 que oscilaba entre los 15 y 20 minutos, y que en los años 2016 y 2017 aún continuaba. Por lo tanto, se puede decir que el Escenario N°1 es viable pero solo hasta el año 2018 como tope máximo, ya que la simulación nos indicó que para el año 2019 todo el tiempo de viaje disminuido, aquí ya no existiría, volviendo prácticamente al mismo estado actual de congestión vehicular que hay con dos vías en la Ruta 160.

De acuerdo a la conclusión anterior, en el segundo Escenario Propuesto consistente en la suposición de un Proyecto que construiría un cuarto puente para vehículos pesados, en el cual se idealizó una situación que contempla un puente ya creado para el año 2018 o en su defecto 2019, es decir, mientras esté operando correctamente la solución temporal de la tercera pista en la Ruta 160, se estaría construyendo el supuesto puente (por eso se hace referencia a una idealización). De manera que en el año 2019 cuando en definitiva, se volvería a tener una congestión vehicular similar a la actual con dos pistas, se tendría el puente listo para absorber un flujo de vehículos pesados que logra descongestionar altamente la Ruta 160. Por lo tanto, se puede considerar como una opción bastante viable la creación de un cuarto puente para transporte pesado. Sujeto a la evaluación del costo de este Proyecto y de donde sería construido, que como se mencionó anteriormente en esta tesis es un proyecto que se viene estudiando del año 2009, y en el cual se habla de una posible ubicación en la Diagonal Biobío con salida en Av. Gran Bretaña, según el estudio

realizado por el MOP para el documento Estrategia para el Desarrollo Regional en Diciembre de 2009.

Adicionalmente, se deja abierta la posibilidad de que otros estudios de tránsito se puedan desarrollar en Flexsim, dado que se entrega una Metodología Propuesta que integra la Simulación, Ingeniería de Tránsito y uno que otro Estudio de Tiempo.

Para cerrar esta conclusión, se puede decir que al tratarse del primer estudio en su tipo que se ha realizado en el área trabajada, hubo ciertos pasos que no pudieron realizarse de la manera más óptima posible como lo es la Verificación, pero que en futuras instancias se podrán hacer ya que este documento entrega cifras que pueden servir de referencia ante cualquier investigación a futuro.

SUGERENCIAS

Se sugiere a las entidades pertinentes del tránsito mantener una base de datos actualizada, idealmente cada un año, pero que tal vez por motivos de costos esto no sería posible, por lo que se propone una idea de al menos cada dos años, y así contar con datos más continuos que permitan desarrollar algún tipo de pronóstico con mayor confiabilidad, ya que estudios de este tipo requieren de datos actualizados o por lo menos con una base histórica de referencia, y no datos discontinuos. Esta recomendación se plantea puesto que una herramienta de estas características, que sea capaz de simular el comportamiento de tráfico vehicular apoyado de datos oficiales y actualizados, puede llegar a ser de mucha ayuda a la hora de tomar decisiones en proyectos llevando a cabo un estudio de simulación previo, en paralelo con los demás estudios que se desarrollan para comprobar la factibilidad del proyecto.

Se recomienda a la Universidad volver a licenciar el *software* Flexsim, puesto que es un simulador muy completo que sirve para cualquier tipo de estudio, ya sea, procesos de manufactura, logística, manejo de materiales y de servicios, y por supuesto también de tránsito vehicular como lo fue el caso de esta tesis. Esta sugerencia se debe a que como

alumno tesista tuvo problemas para lograr la construcción de los modelos finales, pues al quitar la licencia del *software* que permitía trabajar con todos los elementos que quisiera, tuve que proceder a dividir los modelos en secciones y de esa manera trabajarlos por partes, ya que la versión de prueba es muy limitada en cuanto al número de objetos que se pueden utilizar.

Si se llegase a realizar un posterior estudio de comportamiento de tránsito vehicular en la zona trabajada, se recomienda utilizar este documento y la metodología aquí propuesta como base de referencia, y así manejar una idea general de cómo llevar a cabo el estudio. Además, usar los números aquí recopilados para completar fases como la de verificación, que en nuestro caso como se comentó anteriormente no se pudo realizar como se hubiera querido, ya que no había ninguna referencia respecto de algún estudio de este tipo, ni tampoco una base de datos que apoyara el trabajo y facilitara la obtención de información para la posterior construcción del modelo de simulación.

Como última sugerencia, cabe indicar que la aplicación de la Metodología Propuesta en este informe puede ser utilizada como una herramienta más, al momento de analizar las implementaciones de proyectos viales en cualquier lugar, pues tiene una clara explicación de los pasos a seguir en una simulación de tránsito vehicular, a fin de estudiar y tener una representación de lo que ocurrirá previo a la puesta en marcha de algún proyecto, sin tener que esperar a que las obras estén listas y en ejecución. Lo que en parte busca como objetivo esta tesis, es decir, desarrollar una herramienta ingenieril capaz de simular el comportamiento de tráfico de una red logística y de esa manera ayudar a la toma de decisiones en infraestructura logística.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D. (2005). Discrete Event System Simulation.
- [2] Cal, R., Reyes, M., & Cárdenas, J. (1994). Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones.
- [3] Pazos, J., Suárez, A., & Díaz, R. (2003). Teoría de colas y simulación de eventos discretos.
- [4] Shannon, R. (1998). Simulación de sistemas: diseño, desarrollo e implantación.
- [5] Panico, J. (1973). Teoría de colas.
- [6] Guasch, A., Piera, M., Casanova, J., & Figueras, J. (2003). Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios.
- [7] Guasch, A. (2011). La logística como motor de la competitividad en América Latina y el Caribe.
- [8] Coss, R. (2003). Simulación: Un enfoque práctico.
- [9] Ross, S. (1999). Simulación.
- [10] Cao, R. (2002). Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas.

LINKOGRAFÍA

http://www.sectra.gob.cl/indicadores_de_movilidad/Indicadores/flujo_vehicular.html

http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/transporte_y_comunicaciones/parquevehiculos.php

<http://www.inebiobio.cl>

<http://www.inebiobio.cl/archivos/files/pdf/ENFOQUES/ParqueVehicular%202013.pdf>

https://www.aduana.cl/estadisticas-regionales/aduana/2007-04-16/170042.html#vtxt_cuerpo_T1

<http://www.vialidad.cl/Paginas/default.aspx>

<http://www.mapas.mop.cl/cartas-camineras.html>

<http://www.cnid.cl/wp-content/uploads/2015/05/DT-Recomendaciones-para-fortalecer-la-plataforma-de-log%C3%ADstica-y-transporte-2010.pdf>

http://www.dirplan.cl/planes/plandirector/Documents/2009/08_Informe_Final__Region_Biobio.pdf

<https://www.google.com/maps>

<http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1957/1/Modelo%20De%20Simulaci%C3%B3n%20Log%C3%ADstico%20Para%20Transporte%20De%20Carga%20Terrestre%20En%20Un%20Corredor%20Vial%20De%20La%20Ciuda.pdf>

8 ANEXOS

Anexo A: Flujos vehiculares estimados y Tiempo entre llegadas (Tasas esperadas Θ)

R-160 Ar / Lo / Co	Límite Inf	Promedio	Límite Sup
Año 2010	1241	1688	2134
Año 2011	1340	1823	2305
Año 2012	1448	1968	2489
Año 2013	1563	2126	2688
Año 2014	1688	2296	2903
Año 2015	1823	2479	3136
Año 2016	1969	2678	3386
Año 2017	2127	2892	3657
Año 2018	2297	3123	3950
Año 2019	2481	3373	4266
Año 2020	2679	3643	4607

Tabla Anexo A. 1: Tasas esperadas Fuente R-160 Ar / Lo / Co de 2010 a 2020.

R-160 Ar / Lo / Co	Flujo TPyCo	Tasa esperada Θ	Flujo TC	Tasa esperada Θ
Año 2010	1767	2,037	367	9,809
Año 2011	1908	1,886	396	9,083
Año 2012	2061	1,747	428	8,410
Año 2013	2226	1,617	462	7,787
Año 2014	2404	1,498	499	7,210
Año 2015	2596	1,387	539	6,676
Año 2016	2804	1,284	582	6,182
Año 2017	3028	1,189	629	5,724
Año 2018	3271	1,101	679	5,300
Año 2019	3532	1,019	734	4,907
Año 2020	3815	0,944	792	4,544

Continuación Tabla Anexo A.1.

R-160 SP	Límite Inf	Promedio	Límite Sup	Flujo TPyCo	Tasa esperada Θ
Año 2010	2135	2903	3670	1536	2,344
Año 2011	2306	3135	3964	1659	2,170
Año 2012	2490	3385	4281	1792	2,009
Año 2013	2689	3656	4623	1935	1,861
Año 2014	2905	3949	4993	2090	1,723
Año 2015	3137	4265	5392	2257	1,595
Año 2016	3388	4606	5824	2437	1,477
Año 2017	3659	4974	6290	2632	1,368
Año 2018	3952	5372	6793	2843	1,266
Año 2019	4268	5802	7336	3070	1,172
Año 2020	4609	6266	7923	3316	1,086

Tabla Anexo A. 2: Tasas esperadas Fuente R-160 SP de 2010 a 2020.

R-156 y Chgte	Límite Inf	Promedio	Límite Sup	Tasa esperada Θ
Año 2010	1241	1688	2134	1,687
Año 2011	1340	1823	2305	1,562
Año 2012	1448	1968	2489	1,446
Año 2013	1563	2126	2688	1,339
Año 2014	1688	2296	2903	1,240
Año 2015	1823	2479	3136	1,148
Año 2016	1969	2678	3386	1,063
Año 2017	2127	2892	3657	0,984
Año 2018	2297	3123	3950	0,911
Año 2019	2481	3373	4266	0,844
Año 2020	2679	3643	4607	0,781

Tabla Anexo A. 3: Tasas esperadas Fuente R-156 y Chgte de 2010 a 2020.

Las Golondrinas	Límite Inf	Promedio	Límite Sup	Tasa esperada Θ
Año 2010	611	926	1240	2,903
Año 2011	660	1000	1339	2,688
Año 2012	713	1080	1446	2,489
Año 2013	770	1166	1562	2,305
Año 2014	831	1259	1687	2,134
Año 2015	898	1360	1822	1,976
Año 2016	970	1469	1968	1,830
Año 2017	1047	1586	2125	1,694
Año 2018	1131	1713	2295	1,569
Año 2019	1221	1850	2479	1,452
Año 2020	1319	1998	2677	1,345

Tabla Anexo A. 4: Tasas esperadas Fuente Las Golondrinas de 2010 a 2020.

Anexo B: Longitud y Velocidades para cada tramo del Modelo.

Tramos	Kilómetros	Metros	Velocidad estimada (km/h)	Velocidad Flexsim
Ruta 160 II Tramo 1 II	32	32000	60	1,667
Ruta 160 II Tramo 2 II	8,2	8200	45	1,250
Ruta 160 II Tramo 3 II	9	9000	45	1,250
Alternativa Coronel	10	10000	65	1,806
SP I	3	3000	55	1,528
SP II	5	5000	55	1,528
SP III	9	9000	55	1,528
Puente Juan Pablo II	2,8	2800	50	1,389
Pedro Aguirre Cerda (PAC)	1	1000	48	1,333
Puente Llacolén	2,2	2200	48	1,333
PAC + Puente Chacabuco	3	3000	50	1,389
Costanera II Tramo 1 II	1,2	1200	55	1,528
Costanera II Tramo 2 II	2,3	2300	55	1,528
Costanera II Tramo 3 II	6,9	6900	60	1,667
Gran Bretaña acceso Puertos	7,6	7600	60	1,667

Tabla Anexo B. 1: Velocidades estimadas y transformadas a unidades del Simulador para flujos libre.

Tramos	Kilómetros	Metros	Velocidad estimada (km/h)	Velocidad Flexsim
Ruta 160 II Tramo 1 II	32	32000	60	1,667
Ruta 160 II Tramo 2 II	8,2	8200	45	1,250
Ruta 160 II Tramo 3 II	9	9000	45	1,250
Alternativa Coronel	10	10000	65	1,806
SP I	3	3000	55	1,528
SP II	5	5000	55	1,528
SP III	9	9000	20	0,556
Puente Juan Pablo II	2,8	2800	50	1,389
Pedro Aguirre Cerda (PAC)	1	1000	20	0,556
Puente Llacolén	2,2	2200	48	1,333
PAC + Puente Chacabuco	3	3000	50	1,389
Costanera II Tramo 1 II	1,2	1200	55	1,528
Costanera II Tramo 2 II	2,3	2300	55	1,528
Costanera II Tramo 3 II	6,9	6900	60	1,667
Gran Bretaña acceso Puertos	7,6	7600	60	1,667

Tabla Anexo B. 2: Velocidades estimadas y transformadas a unidades del Simulador para flujos congestionados.

Anexo C: Porcentajes de distribución a Puertos.

Fuente	Entrada	Porcentaje
Transporte Particular y Colectivo		
TPyCo R-160 Ar / Lo / Co	Arauco	5%
TPyCo R-160 Ar / Lo / Co	Lota	25%
TPyCo R-160 Ar / Lo / Co	Coronel	55%
TPyCo R-160 Ar / Lo / Co	Alternativa Coronel	15%
TPyCo R-160 SP	San Pedro de la Paz	100%
TPyCo R-156 y Ch	Ruta 156	10%
TPyCo R-156 y Ch	Chiguayante	90%
TPyCo Las Golondrinas	Las Golondrinas	100%
Transporte de Carga		
TC R-160 Ar / Lo / Co	Arauco	30%
TC R-160 Ar / Lo / Co	Lota	20%
TC R-160 Ar / Lo / Co	Coronel	50%

Tabla Anexo C. 1: Porcentajes de distribución a puerto.

Fuente	Entrada	Porcentaje
SP III	Puente Juan Pablo II	35%
SP III	Puente Llacolén	55%
SP III	Puente Chacabuco	10%

Tabla Anexo C. 2: Distribución Salida de San Pedro de la Paz hacia Puentes.

Anexo D: Tabla de Resultados, tiempos promedios (segundos) luego de las 12 ejecuciones para cada Modelo simulado en Flexsim.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	7017,077	905,785	
2	7097,688	905,785	
3	7060,932	905,785	
4	7060,002	905,785	
5	7129,608	905,785	
6	7127,004	905,785	
7	7242,290	905,785	
8	7196,437	905,785	
9	7189,816	905,785	
10	7188,744	905,785	
11	7224,972	905,785	
12	7306,058	905,785	Tiempo de viaje Total
Promedio	7153,386	905,785	8059,171 (seg)

Tabla Anexo D. 1: Tiempo de viaje total estimado Modelo Actual año 2015.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6060,432	905,785	
2	6054,407	905,785	
3	6064,404	905,785	
4	6065,226	905,785	
5	6072,808	905,785	
6	6058,918	905,785	
7	6085,875	905,785	
8	6051,288	905,785	
9	6064,241	905,785	
10	6064,675	905,785	
11	6058,567	905,785	
12	6068,306	905,785	Tiempo de viaje Total
Promedio	6064,096	905,785	6969,880 (seg)

Tabla Anexo D. 2: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2015.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6141,396	906,807	
2	6142,547	906,807	
3	6157,407	906,807	
4	6141,572	906,807	
5	6114,197	906,807	
6	6144,940	906,807	
7	6208,359	906,807	
8	6206,135	906,807	
9	6139,192	906,807	
10	6107,486	906,807	
11	6141,447	906,807	
12	6105,564	906,807	Tiempo de viaje total
Promedio	6145,854	906,807	7052,660 (seg)

Tabla Anexo D. 3: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2016.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6234,351	910,182	
2	6213,970	910,182	
3	6266,745	910,182	
4	6318,650	910,182	
5	6284,926	910,182	
6	6230,355	910,182	
7	6326,334	910,182	
8	6273,203	910,182	
9	6329,727	910,182	
10	6266,417	910,182	
11	6311,266	910,182	
12	6273,288	910,182	Tiempo de viaje total
Promedio	6277,436	910,182	7187,618 (seg)

Tabla Anexo D. 4: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2017.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6668,872	910,323	
2	6739,558	910,323	
3	6651,960	910,323	
4	6611,065	910,323	
5	6661,594	910,323	
6	6610,872	910,323	
7	6700,036	910,323	
8	6601,966	910,323	
9	6641,678	910,323	
10	6513,243	910,323	
11	6529,871	910,323	
12	6615,326	910,323	Tiempo de viaje total
Promedio	6628,837	910,323	7539,160 (seg)

Tabla Anexo D. 5: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2018.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6947,506	910,889	
2	6936,804	910,889	
3	6936,086	910,889	
4	6852,408	910,889	
5	6959,160	910,889	
6	6997,678	910,889	
7	6861,468	910,889	
8	6928,183	910,889	
9	6818,336	910,889	
10	6855,263	910,889	
11	6922,334	910,889	
12	6810,228	910,889	Tiempo de viaje total
Promedio	6902,121	910,889	7813,011 (seg)

Tabla Anexo D. 6: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°1 proyección año 2019.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6030,411	910,323	
2	6032,308	910,323	
3	6037,042	910,323	
4	6039,889	910,323	
5	6024,916	910,323	
6	6054,810	910,323	
7	6023,622	910,323	
8	6036,880	910,323	
9	6036,222	910,323	
10	6039,380	910,323	
11	6040,865	910,323	
12	6022,372	910,323	Tiempo de viaje total
Promedio	6034,893	910,323	6945,216 (seg)

Tabla Anexo D. 7: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2018.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6037,158	910,889	
2	6068,603	910,889	
3	6048,786	910,889	
4	6060,564	910,889	
5	6101,250	910,889	
6	6044,715	910,889	
7	6045,901	910,889	
8	6104,492	910,889	
9	6038,070	910,889	
10	6066,221	910,889	
11	6050,811	910,889	
12	6045,725	910,889	Tiempo de viaje total
Promedio	6059,358	910,889	6970,247 (seg)

Tabla Anexo D. 8: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2019.

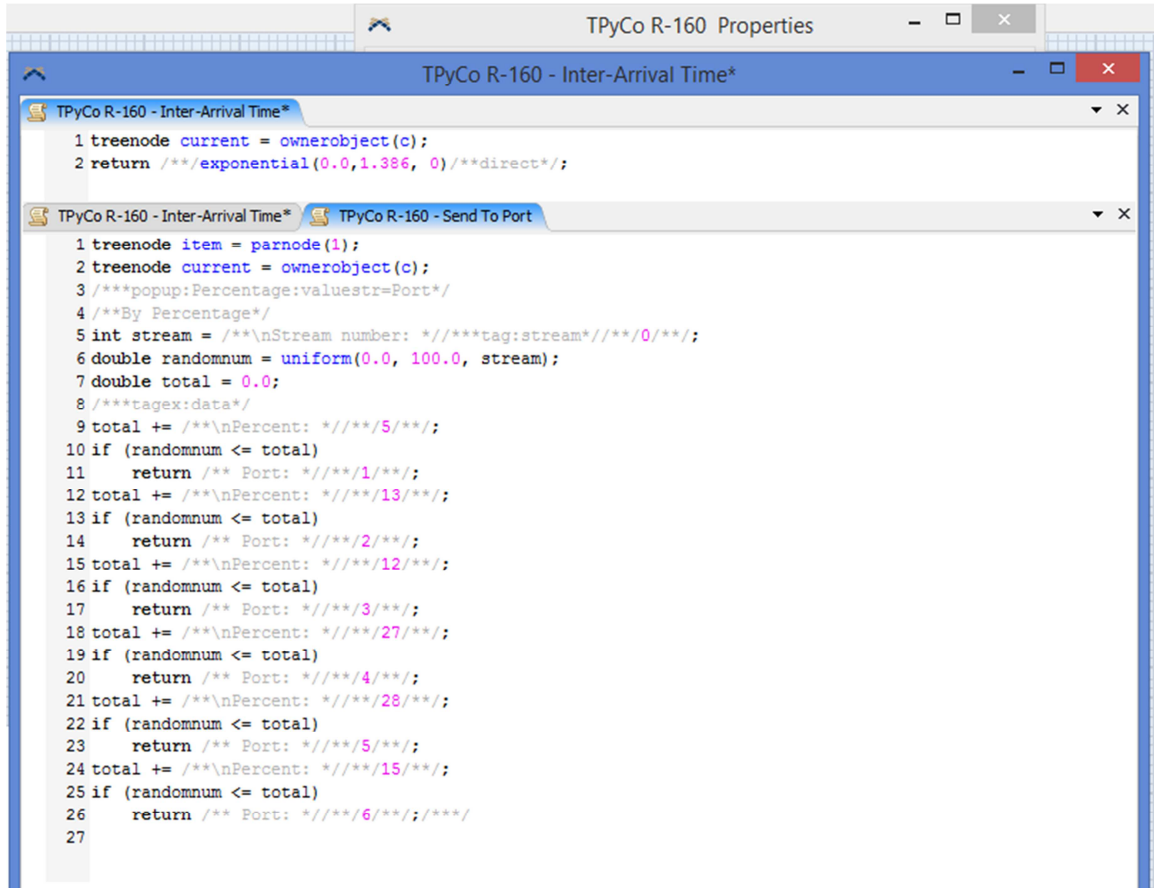
Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6101,652	911,324	
2	6090,476	911,324	
3	6131,504	911,324	
4	6123,315	911,324	
5	6097,477	911,324	
6	6135,875	911,324	
7	6101,010	911,324	
8	6096,479	911,324	
9	6085,864	911,324	
10	6098,857	911,324	
11	6090,845	911,324	
12	6094,847	911,324	Tiempo de viaje total
Promedio	6104,017	911,324	7015,341 (seg)

Tabla Anexo D. 9: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2020.

Corrida	Tiempo de viaje I	Tiempo de viaje II	
1	6974,931	1008,534	
2	7065,712	1008,534	
3	6962,372	1008,534	
4	6962,372	1008,534	
5	6957,044	1008,534	
6	6941,808	1008,534	
7	6966,727	1008,534	
8	6921,543	1008,534	
9	6965,929	1008,534	
10	6840,169	1008,534	
11	6934,472	1008,534	
12	7022,695	1008,534	Tiempo de viaje total
Promedio	6959,648	1008,534	7968,182 (seg)

Tabla Anexo D. 10: Tiempo de viaje total Modelo Escenario N°2 proyección año 2025.

Anexo E: Programación de Motores del Simulador.



```
TPyCo R-160 - Inter-Arrival Time*
1 treenode current = ownerobject(c);
2 return /**/exponential(0.0,1.386, 0)/**/direct*/;

TPyCo R-160 - Inter-Arrival Time* TPyCo R-160 - Send To Port
1 treenode item = parnode(1);
2 treenode current = ownerobject(c);
3 /**/popup:Percentage:valustr=Port*/
4 /**/By Percentage*/
5 int stream = /**/\nStream number: /**/tag:stream*//**/0/**/;
6 double randomnum = uniform(0.0, 100.0, stream);
7 double total = 0.0;
8 /**/tagex:data*/
9 total += /**/\nPercent: /***/5/**/;
10 if (randomnum <= total)
11     return /** Port: /***/1/**/;
12 total += /**/\nPercent: /***/13/**/;
13 if (randomnum <= total)
14     return /** Port: /***/2/**/;
15 total += /**/\nPercent: /***/12/**/;
16 if (randomnum <= total)
17     return /** Port: /***/3/**/;
18 total += /**/\nPercent: /***/27/**/;
19 if (randomnum <= total)
20     return /** Port: /***/4/**/;
21 total += /**/\nPercent: /***/28/**/;
22 if (randomnum <= total)
23     return /** Port: /***/5/**/;
24 total += /**/\nPercent: /***/15/**/;
25 if (randomnum <= total)
26     return /** Port: /***/6/**/;/***/
27
```

Figura Anexo E 1: Ejemplo programación de motores del simulador.