



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

SIMULACIÓN DE CONFLICTOS CAUSADOS POR LA OPERACIÓN DE  
CAMIONES EN PROXIMIDADES AL ACCESO PORTUARIO DE ARICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GABRIEL ANTONIO ARANEDA GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:  
CRISTIÁN EDUARDO CORTÉS CARRILLO

MIEMBROS DE LA COMISION:  
PABLO ANDRÉS REY  
ALEJANDRO AUGUSTO ALDEA SALAZAR

SANTIAGO DE CHILE  
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil con Mención  
Transporte  
POR: Gabriel Antonio Araneda González  
FECHA: Julio de 2018  
PROFESOR GUÍA: Cristián Eduardo Cortés Carillo

## **SIMULACIÓN DE CONFLICTOS CAUSADOS POR LA OPERACIÓN DE CAMIONES EN PROXIMIDADES AL ACCESO PORTUARIO DE ARICA**

Arica se localiza en el extremo norte de Chile, acogiendo uno de los puertos con mayor transferencia a nivel nacional. El acelerado crecimiento de la demanda del Puerto de Arica induce una actividad que impacta de manera relevante en su entorno, muy cercano al centro histórico, de comercio y actividades de la ciudad. Uno de los conflictos ocurre en la red vial inmediatamente próxima al acceso al recinto portuario, donde se forma una fila de espera para el ingreso a puerto. Como consecuencia, la ciudadanía en general considera el tráfico de camiones como una actividad indeseable en el contexto urbano, lo cual representa una disociación entre la visión de la ciudad y la actividad portuaria.

La presente Memoria se enfoca en el análisis de esta problemática mediante simulación, utilizando la interacción de los softwares Saturn y Aimsun. Se proponen alternativas de solución que permitan disminuir los conflictos viales producidos, sobre la base de indicadores de desempeño del sistema de transporte.

Se analizan dos alternativas de solución que han sido propuestas por la Empresa Portuaria con objeto de resolver los problemas causados por la fila de camiones: una relacionada con dotación de infraestructura de acceso exclusivo y otra con gestión de ingreso mediante un Antepuerto.

Se concluye que en el mediano plazo la nueva infraestructura sería insuficiente, por sí sola, de resolver la problemática de afectación del tráfico urbano causada por la fila de camiones. Ser hace necesario, entonces, contar con una solución de gestión del acceso portuario de cargas.

Dedicado a mi hijo Damián, mi lucecita. Somos Uno. Te abrazo siempre.

# Agradecimientos

A todas y todos quienes participaron de una u otra forma en el desarrollo de esta memoria. Especialmente agradecer a mis padres, Nelson y Patricia, por haberme apoyado siempre. A Constanza, por su amor y paciencia. A mi Profesor Guía, Cristián Cortés, por sus valiosos comentarios.

# Tabla de contenido

1.	Motivación .....	2
1.1	Antecedentes generales .....	2
1.1.1	Contexto físico de la red vial relevante .....	2
1.1.2	Accesibilidad Vial Urbana .....	4
1.2	Definición del problema .....	6
1.2.1	Introducción.....	6
1.2.2	Congestión general del sistema de transporte .....	7
1.2.3	Tránsito de camiones.....	8
1.2.4	Conflictos causados por la formación de una fila de camiones en el acceso portuario .....	10
1.3	Alcance .....	12
1.3.1	Introducción.....	13
1.3.2	Alcance .....	13
1.4	Área de Estudio.....	14
1.5	Periodos.....	15
1.6	Resultados esperados .....	15
1.7	Objetivos .....	16
1.7.1	Objetivo general .....	16
1.7.2	Objetivos específicos.....	16
2.	Marco conceptual.....	17
2.1	Introducción.....	17
2.2	Herramientas de simulación .....	18
2.3	Análisis comparativo de simuladores.....	19
2.4	Fundamentos teóricos de las herramientas de simulación ...	20
2.4.1	Fundamentos teóricos de Saturn.....	20
2.4.2	Fundamentos teóricos del modelo Aimsun .....	22
3.	Metodología .....	27
3.1	Metodología de análisis .....	27
3.2	Repeticiones o réplicas .....	30
4.	Desarrollo de la herramienta de simulación .....	31
4.1	Desarrollo de la asignación de tráfico.....	31
4.2	Codificación y calibración de la red vial a nivel táctico .....	32
4.3	Calibración de la red .....	34
4.4.1	Definición del Área de Estudio .....	38
4.4.2	Recopilar información operativa del Área de Estudio .....	39
4.4.3	Representación de la red en Aimsun .....	40
4.4.4	Caracterización de la demanda.....	42
4.4.5	Calibración de primer nivel.....	42
4.4.6	Calibración de segundo nivel.....	43
4.4.7	Validación .....	47
5.	Aplicación .....	49

5.1	Escenario general de simulación .....	49
5.2	Situación Base.....	49
5.3	Alternativas de solución .....	52
5.4	Alternativa 1: Acceso exclusivo para camiones.....	52
5.5	Alternativa 2: Operación de Antepuerto .....	54
5.6	Alternativa 3: Operación conjunta de acceso exclusivo y Antepuerto .....	55
6.	Resultados y conclusiones .....	56
7.	Bibliografía .....	61

# Índice de tablas

Tabla 1: Tránsito Diario De Camiones A Puerto .....	10
Tabla 2: Flujos De Saturación .....	33
Tabla 3: Grado De Ajuste Rutas Fijas.....	35
Tabla 4: Indicadores De Ajuste.....	35
Tabla 5: Variaciones En Volúmenes De Viajes.....	36
Tabla 6: Variaciones En Volúmenes De Viajes.....	36
Tabla 7: Indicador Geh.....	43
Tabla 8: Parámetros Del Escenario .....	44
Tabla 9: Resultados De Iteraciones .....	45
Tabla 10: Parámetros Calibrados .....	46
Tabla 11: Parámetros Para Camiones De Más De Dos Ejes .....	46
Tabla 12: Parámetros Para Vehículos Livianos .....	46
Tabla 13: Parámetros Para Taxibuses .....	47
Tabla 14: Resultados De Validación .....	48
Tabla 15: Proyección De Tránsito De Camiones.....	49
Tabla 16: Parámetros De Atención Garita De Acceso .....	50
Tabla 17: Indicadores De Operación Situación Base.....	56
Tabla 18: Indicadores De Operación Alternativa 1 .....	57
Tabla 19: Indicadores De Operación Alternativa 2 .....	58
Tabla 20: Indicadores De Operación Alternativa 3 .....	59

# Índice de ilustraciones

Figura 1. Localización De La Ciudad De Arica .....	3
Figura 2. Vista General De La Ciudad De Arica .....	4
Figura 3. Accesibilidad Vial Urbana .....	5
Figura 4. Elementos De Vialidad Urbana Estructurante .....	6
Figura 5. Principales Vías Urbanas Utilizadas Camiones .....	9
Figura 6. Localización De La Fila De Camiones Junto A Acceso Portuario .....	11
Figura 7. Fila De Camiones Junto A Acceso Portuario .....	11
Figura 8. Impacto De Fila De Camiones Junto A Acceso Portuario .....	12
Figura 9. Registro Fotográfico De La Fila De Camiones .....	12
Figura 10. Área De Estudio .....	15
Figura 11. Red Táctica Relevante .....	32
Figura 12. Red De Simulación Mesoscópica .....	33
Figura 13. Gráfico De Ajuste De Flujos Modelados Vs. Observados .....	37
Figura 14. Área De Estudio .....	39
Figura 15. Caracterización Del Plan De Control De Tránsito .....	41
Figura 16. Caracterización Física De La Red .....	42
Figura 17. Resultados De Iteraciones .....	45
Figura 18. Tramos De Validación .....	48
Figura 19. Representación De Garita .....	51
Figura 20. Representación De La Fila De Camiones .....	51
Figura 21. Red De Simulación Alternativa 1 .....	53
Figura 22. Fila De Camiones En Alternativa 1 .....	54
Figura 23. Localización Del Antepuerto .....	55
Figura 24. Velocidad Del Tráfico Urbano Sobre Máximo Lira En Sb .....	57
Figura 25. Velocidad Del Tráfico Urbano Sobre Máximo Lira En A1_2020 .....	58
Figura 26. Velocidad Del Tráfico Urbano Sobre Máximo Lira En A2_2020 .....	59
Figura 27. Velocidad Del Tráfico Urbano Sobre Máximo Lira Norte-Sur En A3_2020 .....	60





# **1. Motivación**

## **1.1 Antecedentes generales**

Arica se localiza en el extremo norte de Chile, constituyendo una importante puerta de entrada al País, un centro de servicios y comercio para la región. Desde la creación de la Región de Arica y Parinacota en del año 2007, la ciudad es capital regional y constituye la única concentración urbana de magnitud significativa en la región.

La ciudad acoge uno de los puertos con mayor transferencia a nivel nacional. El acelerado crecimiento de la demanda del Puerto de Arica induce una actividad que impacta de manera relevante en su entorno, muy cercano al centro histórico, de comercio y actividades de la ciudad.

Uno de los conflictos causados ocurre en la red vial inmediatamente próxima al acceso al recinto portuario, donde se forma una fila de espera para el ingreso a puerto.

Esto sucede en el entorno inmediato del recinto portuario, donde el tramo vial contempla dos pistas continuas para el sentido norte-sur. La fila de camiones suele superar los 300 metros de longitud y se desarrolla sobre la primera pista de la calzada poniente de la avenida Máximo Lira, que es una importante arteria del centro de la ciudad, generando una importante reducción de capacidad de dos pistas continuas a una.

Esta fila se comienza a generar en el período hora punta de la mañana, específicamente entre 7:45 hrs. y 8:45 hrs. momento en el que ocurre la mayor afluencia de camiones al puerto.

La presente Memoria analiza la problemática causada por la fila de camiones desde un enfoque de simulación de tráfico, con el objeto de proponer una solución que permita disminuir conflictos viales, aportando de este modo a la calidad de vida de la ciudad de Arica.

### **1.1.1 Contexto físico de la red vial relevante**

La ciudad se localiza en una planicie litoral limitada por formaciones montañosas. En el extremo sur-oeste de la ciudad se encuentra el llamado

Morro de Arica, formación ubicada prácticamente en el borde costero y que alcanza 200 metros de altura.

En la siguiente figura se muestra la localización de la ciudad en la región y sus principales rutas de accesibilidad interurbana: desde Bolivia la Ruta 11-CH y desde Perú la Ruta 5 Norte.



**Figura 1. Localización de la ciudad de Arica**

Fuente: Google

La estructura básica de la ciudad está dada por dos quebradas de importancia que cruzan esta planicie de oriente a poniente: el Río Lluta, al norte de la ciudad, y el Río San José, que atraviesa la zona centro-sur de la ciudad, desde el valle de Azapa hasta sus zonas consolidadas al sur de la Av. Diego Portales.

En la siguiente figura se destaca el emplazamiento de ambos ríos y del Morro:



**Figura 2. Vista general de la ciudad de Arica**  
Fuente: Google

### **1.1.2 Accesibilidad Vial Urbana**

La siguiente figura muestra la localización de la ciudad en la región y sus principales rutas de accesibilidad interurbana: desde Bolivia la Ruta 11-CH y desde Perú la Ruta 5 Norte.



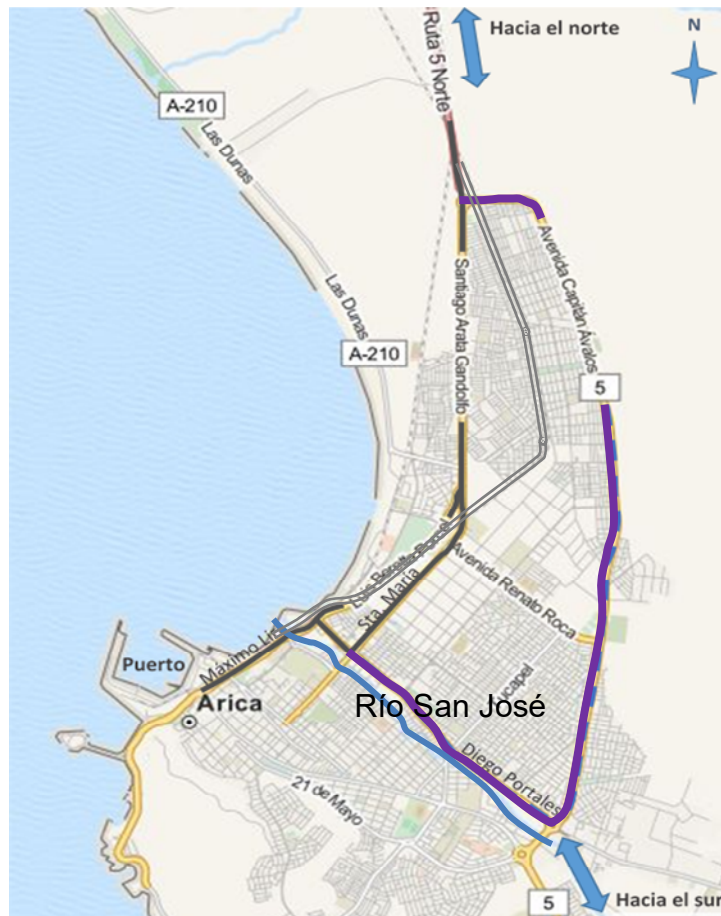
**Figura 3. Accesibilidad Vial Urbana**

Fuente: Google.

Los únicos ejes que permiten transitar la ciudad en sentido norte – sur de forma continua son la Av. Capitán Ávalos y la Av. Santiago Arata. Esta última se bifurca en las avenidas Santa María y Luis Beretta Porcel, las cuales convergen en el centro histórico.

El trazado del Ferrocarril Arica-La Paz (FCALP) atraviesa la ciudad de norte a sur presentando 17 cruces a nivel. Si bien no se encuentra operativo, su presencia plantea dificultades a la conectividad urbana en sentido oriente-poniente.

En la siguiente figura se muestran los elementos descritos.



**Figura 4. Elementos de vialidad urbana estructurante**

Fuente: Google

## 1.2 Definición del problema

### 1.2.1 Introducción

El principal generador de transporte de carga terrestre en la ciudad de Arica es el Puerto. Durante los primeros seis años de operación del Concesionario Terminal Puerto de Arica S.A. (TPA), el volumen de carga aumentó de 1,14 millones de toneladas en 2005 a casi 2,16 millones de toneladas en 2010, lo que representó un crecimiento del 90 %. En 2015 el Puerto movilizó más de 3 millones de toneladas, lo que representa un crecimiento del 160% en sus primeros 10 años de operación concesionada. En el año 2016, TPA movilizó 3,3 millones de toneladas, llegando a constituirse en el cuarto puerto estatal en transferencias luego de San Vicente/Talcahuano, San Antonio, y Valparaíso.

El acelerado crecimiento de la demanda portuaria induce una actividad que impacta de manera relevante en su entorno, debido a la operación de camiones de gran tamaño por vías próximas al centro histórico, de comercio y actividades de la ciudad.

Estos flujos de camiones causan conflictos en la red vial de acceso al recinto portuario, debido al proceso de registro de los camiones, la cual obliga a formar una larga fila de espera para el ingreso a puerto.

Esto se realiza en el entorno inmediato del recinto portuario, lo que implica el estacionamiento de los camiones sobre la primera pista de la calzada poniente de la avenida Máximo Lira.

Si se considera que la vialidad existente en el tramo contempla solo dos pistas para el sentido norte-sur, esto significa que la fila de camiones ocupando una de ellas genera una reducción de capacidad relevante en Avenida Máximo Lira, la cual es una importante arteria del centro de la ciudad.

Esta fila se comienza a generar en el período punta de la mañana, específicamente entre las 7:45 hrs. y las 8:45 hrs. momento en el que ocurre la mayor afluencia de camiones al puerto.

Como consecuencia, la ciudadanía en general considera el tráfico de camiones como una actividad indeseable en el contexto urbano, lo cual representa una disociación entre la visión de la ciudad y la actividad portuaria. Una evidencia de esto es que el Gobierno Regional ha iniciado estudios tendientes a reinstalar el puerto en alguna localización fuera de la ciudad, lo cual, sin embargo, según la Empresa Portuaria (EPA, 2014), no representaría una solución en el mediano plazo.

### **1.2.2 Congestión general del sistema de transporte**

La avenida Máximo Lira, donde ocurre el conflicto mencionado es una importante arteria urbana que confluye al centro histórico de la ciudad, el que también es el centro cívico, de comercio y servicios. Por este motivo, el problema que se genera en el acceso portuario afecta al resto del sistema vial del centro de la ciudad.

El problema de la congestión en Arica se ve incrementado durante el periodo Punta Mañana. Según el último estudio de diagnóstico del sistema de transporte urbano elaborado por la Subtrans (2015b), en el período Punta

Mañana existen 14 ejes que presentan grados de saturación superiores al 90% y se encuentran dispersos en toda la trama urbana.

Otro factor que explica los grados de congestión en la ciudad son los estacionamientos en el área céntrica, especialmente en el casco histórico, lo que incluye sectores próximos al acceso portuario.

Cabe mencionar que la tasa de motorización se duplicó durante las dos últimas dos décadas en Arica, superando los 280 vehículos cada 1000 habitantes, lo que resulta próximo a contar en promedio con un vehículo en cada hogar.

### **1.2.3 Tránsito de camiones**

Los flujos de camiones ingresan a la red vial urbana desde la Ruta 5 por la Av. Alcalde Santiago Arata Gandolfo y, en su gran mayoría, continúan por la Av. Luis Beretta Porcel en dirección al Puerto, donde comparten el espacio vial con vehículos livianos y transporte público.

En la siguiente figura se muestran las principales vías urbanas que utilizan los camiones hacia y desde el puerto.





**Figura 5. Principales vías urbanas utilizadas camiones**

Fuente: Google

La cantidad de camiones que accede al puerto se proyecta en base a información disponible en MOP (2015). A continuación se muestra la proyección del número de camiones estimada.

Tabla 1: Tránsito diario de camiones a puerto

<b>Año</b>	<b>Cantidad de camiones año</b>	<b>Cantidad de camiones día</b>
2017	167.389	558
2018	176.546	588
2019	186.290	621
2020	196.705	656
2021	207.760	693
2022	219.585	732
2023	232.201	774
2024	245.667	819
2025	260.049	867
2026	275.420	918
2027	291.855	973
2028	309.441	1.031
2029	328.270	1.094

Fuente: MOP (2015)

Según esta proyección, el flujo de camiones superaría los 700 camiones diarios hacia fines de esta década y los 1000 hacia fines de la siguiente.

Durante el período Punta Mañana se observa la mayor afluencia de camiones al puerto, alcanzando el 11% del flujo diario (MOP, 2015). Esto coincide con el periodo de mayor ocurrencia de episodios de congestión general del sistema de transporte urbano (Subtrans 2015b), dando lugar al peor caso de análisis de impactos del problema identificado: la fila de camiones.

#### **1.2.4 Conflictos causados por la formación de una fila de camiones en el acceso portuario**

Como se ha mencionado, es habitual observar una fila de espera de camiones inmediatamente aguas arriba del acceso portuario. Según el estudio MOP (2015) esta fila se establece especialmente durante en el periodo punta de la mañana sobre la avenida Máximo Lira en el tramo comprendido entre el acceso portuario del TPA y la calle Chacabuco, alcanzando extensiones normales de 370 metros.

En este sector, la calzada poniente de la Av. Máximo Lira se reduce de tres a dos pistas, por lo que en este sector la fila de camiones provoca que la

capacidad vial de esa calzada disminuya a la mitad, causando graves episodios de congestión.

A continuación se muestra una vista esquemática y fotografías de la fila de camiones.



**Figura 6. Localización de la fila de camiones junto a acceso portuario**

Fuente: Google



**Figura 7. Fila de camiones junto a acceso portuario**

Se extienden desde avenida Diego Portales hasta el sector de La Lisera

# Interminables filas de camiones

Transportes bolivianos esperan largas horas para poder ingresar al puerto

**Guillermo Salgado A.**  
@wica@gestelacv.cl

La situación ya sobrepasó todos los límites. Las filas de camiones bolivianos, que deben ingresar al puerto a buscar carga, se extienden desde Diego Portales por el norte hasta la avenida Comandante San Martín, por el sur, a la altura del sector de La Lisera.

A diario son cientos y cientos los camiones que deben esperar

pasadas las 18 horas.

## "NO DA ABASTO"

La representante de Transportes Bolivianos (Retrabol), Pamela Ortiz, dijo que la situación es inconcebible y que no depende de ellos, por el contrario, son ellos mismos que se ven perjudicados por la situación. "El puerto no da abasto (...), si bien es cierto tienen personal suficiente, no cuentan con la maquinaria adecuada ni necesaria para la alta demanda que existe".

La representante de Retrabol, que agrupa a 50 empresas de transporte de camiones bolivianos añade que los sistemas de



**Figura 8. Impacto de fila de camiones junto a acceso portuario**



**Figura 9. Registro fotográfico de la fila de camiones**

## 1.3 Alcance

### **1.3.1 Introducción**

La simulación de tráfico surge como una técnica de construcción y análisis de modelos en diferentes niveles de detalle. Los modelos de simulación de tráfico se pueden dividir en:

- Nivel Estratégico: se basan en el modelamiento del tráfico en base a parámetros tales como la resistencia, densidad, velocidad, conteos de flujo y las relaciones entre ellos. Se analizan mediante modelación macroscópica.
- Nivel Táctico: describen el estado del tráfico mediante funciones de distribución que estiman el número de vehículos por tipo, considerando variables su velocidad y posición. Se analizan mediante modelación mesoscópica.
- Nivel Operacional: modelan a nivel de detalle el comportamiento de los usuarios de una red vial determinada. Esto último suele hacerse mediante el uso de funciones de seguimiento de cada vehículo, teniendo en cuenta parámetros de infraestructura, flujos y comportamiento de cada conductor. Se analizan mediante modelación microscópica.

### **1.3.2 Alcance**

El alcance del análisis de la presente Memoria consiste en el análisis de los conflictos viales causados por la fila de camiones que se observa habitualmente junto al acceso portuario de Arica. Esta fila se establece a lo largo de Máximo Lira, la vía de acceso al puerto, restringiendo su capacidad en una de las dos pistas continuas que existen en dicho tramo.

El análisis de microsimulación se realiza mediante el software Aimsun y considera los siguientes tipos de vehículo: taxi-colectivo, taxibús, vehículo liviano particular, camión de 2 ejes y camión de más de 2 ejes.

Mediante este modelo se analizan dos proyectos que han sido propuestos por la EPA (2013) con objeto de resolver esta problemática:

- Alternativa 1: construcción de ramal de acceso exclusivo a puerto.
- Alternativa 2: habilitación de un Buffer Portuario que gestiona el ingreso de camiones.

En consideración de esto, se analiza el desempeño del sistema de transportes bajo los siguientes escenarios:

- a) Situación Base: camiones ingresan a Puerto desde Av. Máximo Lira en situación actual.
- b) Alternativa 1: camiones transitan por un nuevo ramal de acceso exclusivo a puerto.
- c) Alternativa 2: camiones acceden según programación de un Buffer Portuario que gestiona el ingreso.

La comparación se realiza en base a indicadores de congestión y tiempo de viaje de los usuarios del sistema.

#### **1.4 Área de Estudio**

El Área de Estudio está conformada por el sector más próximo al acceso portuario, es decir, el último tramo vial del recorrido de camiones, pues es en este tramo donde ellos forman la fila de espera.

Con el objeto de representar detalladamente los conflictos causados por la fila de camiones que se establece en las proximidades del acceso portuario, se define un área de influencia específica conformada por los arcos de la red vial urbana más próximos a dicho acceso, la cual se encuentra delimitada por las siguientes vías:

- Río San José al norte,
- Recinto portuario al poniente,
- Avenida Carlos Condell al sur,
- Avenida Máximo Lira al oriente.

A continuación se muestra una figura del Área de Estudio:





**Figura 10. Área de Estudio**

Fuente: Google

### **1.5 Periodos**

La información de demanda considerada corresponde al período punta de la mañana, es decir, entre las 7:45 hrs. y las 8:45 hrs. Dicha información es obtenida del estudio MOP (2015).

### **1.6 Resultados esperados**

Se analizará la situación provocada por la operación de camiones de gran tamaño sobre la red vial próxima al Puerto de Arica, identificando principales conflictos y problemáticas.

Se modelará el comportamiento del tráfico mediante herramientas de simulación táctica y microscópica, con el objeto de analizar conflictos viales provocados por la operación de camiones en las proximidades del Puerto de Arica.

Se priorizarán distintas alternativas de solución, en base a indicadores obtenidos de la simulación, además de otras consideraciones de carácter técnico.

## **1.7 Objetivos**

### **1.7.1 Objetivo general**

Proponer alternativas de solución que permitan disminuir los conflictos viales producidos por la operación de camiones que se mueven en las proximidades del acceso portuario de la ciudad de Arica, sobre la base de indicadores de desempeño del sistema de transporte que serán obtenidos mediante simulación.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

1. Identificar los problemas causados por el establecimiento de una fila de camiones en las proximidades del acceso portuario de Arica.
2. Simular a nivel operacional el sistema vial más próximo al acceso portuario y obtener indicadores de desempeño.
3. Identificar una alternativa de solución que permita resolver la problemática identificada.



## 2. Marco conceptual

### 2.1 Introducción

La simulación de tráfico surge de la necesidad de representar un sistema de transporte, comprender cómo se comporta y predecir su evolución a lo largo del tiempo. Los modelos establecen relaciones formales entre las diferentes componentes del sistema, es decir, planteando hipótesis que surgen de la comprensión del modelador sobre cómo se comporta el sistema. Dicha comprensión se traduce en la definición de relaciones lógicas respecto a cómo funciona; es decir, relaciones entre los atributos que caracterizan a las entidades que componen el sistema y las variables matemáticas que los representan formalmente.

Para esto se definen, por una parte, variables de decisión que representan aspectos controlables del problema, y por otra, variables no controladas. Estas últimas corresponden a conjuntos de parámetros que determinan las alternativas factibles para los cursos de acción. Se definen también funciones objetivo, las cuales miden el grado de logro de los objetivos del tomador de decisiones (Barceló, 2010).

El proceso de construcción del modelo se puede describir en tres componentes principales:

- a) Aspectos estables: estructuras físicas, edificios, equipos, propiedades lógicas del comportamiento, etc.
- b) Aspectos del proceso: elementos que se encuentran en estado de cambio.
- c) Relaciones entre estructura y proceso y relaciones entre procesos.

Los modelos de simulación de tráfico se dividen en macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos. Los modelos macroscópicos se basan en el modelamiento del tráfico en base a parámetros tales como la resistencia, densidad, velocidad, conteos de flujo y las relaciones entre ellos. Los modelos mesoscópicos describen el estado del tráfico mediante funciones de distribución que estiman el número de vehículos por tipo, considerando su rapidez y posición. Los modelos microscópicos representan de manera

detallada el comportamiento de los usuarios de una red vial determinada. Esto último suele hacerse mediante el uso de modelos seguimiento vehicular, teniendo en cuenta parámetros de infraestructura, flujos y comportamiento de cada conductor.

La simulación de tráfico, en síntesis, surge como una técnica de construcción y análisis de modelos que permite analizar una amplia variedad de estudios de tráfico y transporte. La elección del enfoque de simulación dependerá del problema que se pretenda abordar.

## **2.2 Herramientas de simulación**

Existen ventajas y limitaciones propias a cada proceso de modelamiento. En la mayoría de los modelos de tipo mesoscópico, por ejemplo, la capacidad se reproduce modificando los flujos de saturación de la red, es decir, la cantidad de vehículos que pueden pasar sin interrupción a través de una intersección. Debido a lo anterior, existen fenómenos detallados que no son posibles de representar adecuadamente mediante simulación mesoscópica.

En cambio, en un modelo microscópico la capacidad será el resultado de la modelación explícita de los diversos fenómenos que ocurren. Esto considera la interacción de muchos parámetros de modelación e información de terreno. Por esto, el proceso de calibración es bastante más complejo y requiere de mayor cantidad de información.

La simulación microscópica consiste en estimar los movimientos de los vehículos individuales sobre la base de su interacción con otros vehículos. Estas simulaciones se basan en modelos matemáticos que consideran una gran cantidad de parámetros asociados a la red vial, los tipos de vehículos y el comportamiento de los conductores.

Debido a su construcción, los modelos de microsimulación entregan resultados que son muy dependientes de los valores que adquieren la gran cantidad de parámetros físicos y de comportamiento (Casas et al., 2010). En la práctica, se ha observado que existen diversas combinaciones de dichos parámetros con los que se podrían obtener resultados similares, siendo difícil discernir cuáles son más adecuadas para predecir correctamente la operación bajo condiciones diferentes de oferta y demanda sobre la misma red (Subtrans 2015a).

Por este motivo, surge la inquietud de que pequeñas variaciones de ciertos parámetros podrían producir significativos cambios en la simulación, lo cual aporta incertidumbre a un aspecto muy sensible del proceso de evaluación

de proyectos, ya que los resultados pueden diferir significativamente frente a pequeños cambios de parámetros.

Por otra parte, los parámetros que representan variables difíciles de observar, como por ejemplo de comportamiento, suelen calibrarse para reproducir cierta operación observada, pero no siempre se cuenta con un rango de valores válido (Subtrans 2015a).

Existe una variedad de herramientas de simulación tanto a nivel mesoscópico (Saturn, Dynamit, Transims, Transyt) como operacional (Aimsun, Corsim, Dracula, Paramics, Vissim). Sin embargo, para efectos de esta Memoria, se utilizará una herramienta a nivel mesoscópico, tomando como ejemplo el software Saturn, y a nivel operacional tomando como ejemplo el software Aimsun.

### **2.3 Análisis comparativo de simuladores**

Si bien se reconocen distinciones entre los diferentes niveles de simulación, no existe mucho conocimiento práctico respecto a la aplicación comparada de uno y otro a un mismo sistema.

Con el objeto de ganar mayor experiencia respecto a este aspecto, la Subtrans (2015a) realiza un análisis comparativo de los resultados que se derivaron del uso de dos herramientas de modelación: Saturn y Aimsun, aplicadas en los mismos proyectos. Se revisan diversas técnicas de análisis y simulación del comportamiento del sistema de transporte.

Como primera observación, se establece que al aplicar ambas herramientas, una de tipo mesoscópico y otra microscópica, a las distintas modelaciones y calibraciones realizadas para diversas áreas de estudio, se obtienen niveles de ajuste similares. Esto para todas las áreas de estudio y períodos modelados, lo cual muestra una importante consistencia a nivel de calibración.

Sin embargo, en varios casos la asignación mesoscópica resulta mucho más consistente y realista que la asignación microscópica. El estudio sugiere que se obtienen mejores resultados considerando una asignación mesoscópica previa, para luego reproducir dichas elecciones de ruta con el modelo microscópico.

En contextos de redes viales saturadas, Aimsun requiere considerables esfuerzos tanto para la calibración como para la simulación de las situaciones con proyecto. Esto es provocado por lo sensible que actúan los

modelos internos de comportamiento ante mínimas diferencias de flujos en algunos arcos.

Debido a las diferencias de flujos y tiempos que se producen entre los métodos de asignación de Aimsun y Saturn para un mismo proyecto, se recomienda usar cada uno para los fines principales que fueron creados. En el caso del modelo microscópico Aimsun, su función es la simulación de la operación de los movimientos de flujos de vehículos y personas ante intervenciones de la oferta de transporte, más que una herramienta predictiva para la evaluación de proyectos. En el caso de Saturn, se reconocen ventajas en su uso con fines predictivos.

En relación con la estimación de consumo de recursos (tiempo, combustible y otros costos de operación), se observa que los resultados que entregan ambos programas para la evaluación de algunos proyectos tampoco son similares. Esto porque los consumos de tiempo de algunos tipos de vehículos, si bien no difieren significativamente al simular una hora, sí presentan diferencias importantes cuando se expanden al año. Por ello la evaluación económica de un proyecto podría diferir fuertemente.

Se concluye a modo general que al escoger una herramienta de simulación, debe tenerse en cuenta el fin principal con el que fue creada. En el caso del modelo microscópico Aimsun, su función es la simulación de la operación de los movimientos de flujos de vehículos y personas ante intervenciones de la oferta de transporte, más que una herramienta predictiva para la evaluación de proyectos. En el caso de Saturn, éste sí tiene como objetivo importante su uso con fines predictivos.

La presente memoria plantea una metodología basada en esta experiencia, es decir, se realiza primero la asignación de flujos a nivel mesoscópico, para luego reproducir dicha configuración a nivel operacional.

Esto no descarta que existan enfoques alternativos de análisis y asignación basados exclusivamente en microsimulación.

Para representar el nivel operacional detallado se utiliza el software de microsimulación Aimsun. Para obtener información de asignación se utiliza un modelo mesoscópico existente desarrollado en Saturn (MOP, 2015).

## **2.4 Fundamentos teóricos de las herramientas de simulación**

### **2.4.1 Fundamentos teóricos de Saturn**

Saturn es un software de modelamiento que contiene conjunto de módulos de análisis de redes desarrollados en el Instituto de Estudios del Transporte de la Universidad de Leeds. Según el manual de usuario (2012), cuenta con seis funciones básicas:

- a) Modelo combinado de simulación y asignación de tráfico para el análisis de planes de inversión vial desde planes de gestión del tráfico en redes relativamente localizadas (del orden de 100 a 200 nodos) hasta grandes mejoras de infraestructura (hasta más de 1000 nodos).
- b) Modelo de asignación de tráfico para el análisis de redes.
- c) Modelo de simulación de uniones individuales.
- d) Editor de red, base de datos y sistema de análisis.
- e) Paquete de manipulación de matrices.
- f) Modelo de demanda de matriz de viaje que cubre los elementos básicos del viaje distribución, partición modal.

Es un modelo combinado de simulación y asignación con una amplia gama de opciones de asignación, tales como asignación de costo generalizado, todo o nada y asignación de equilibrio de Wardrop, entre otros.

El software Saturn resuelve el problema de asignación de una matriz de distribución de viajes a una red vial mediante un enfoque estocástico, asumiendo que los usuarios eligen rutas de mínimo costo. Dicho costo puede ser descrito por funciones que representan la percepción que tienen los viajeros respecto al costo del viaje, las que a su vez incluirían una componente aleatoria o estocástica.

Dicha componente surge de reconocer que cada usuario percibe los costos del viaje de manera distinta, por lo que podría escoger rutas diferentes. Luego, el costo de viaje de cada ruta es una variable aleatoria asociada a alguna función de probabilidad.

La solución de este problema se realiza a través de un algoritmo conocido como Método de los Promedios Sucesivos. Se utiliza como fundamento teórico lo demostrado por Sheffi (1981) relativo a la convergencia del Método de los Promedios Sucesivos converge hacia la solución del problema estocástico.

Saturn permite la definición de dos tipos de representaciones de la malla:

- Red interna o *Inner*: simula movimientos vehiculares que se realizan en los nodos. Permite análisis detallados como los que se producen en los estudios tácticos, permitiendo la simulación de las demoras y colas en las intersecciones de la red.
- Red externa o *Buffer*: simula con una lógica más agregada de arco. Se utiliza para el análisis estructural de la red a nivel de rutas.

El proceso de calibración consiste básicamente en un proceso iterativo, donde se retroalimentan los niveles de servicio de la red vial y la matriz de viajes.

La calibración de la matriz de viajes realiza mediante el ajuste de matrices en base a una matriz a priori que contiene los flujos observados en diversos arcos de la red, estimando una matriz de viajes cuyas celdas permiten reproducir los flujos observados. Esto se realiza por resolución matemática del problema conocido como minimización de la entropía, el que converge a la matriz más probable, es decir, la que más se parece a una matriz a priori que satisface los flujos observados.

#### **2.4.2 Fundamentos teóricos del modelo Aimsun**

En la presente Memoria se simula mediante el software Aimsun, que es un software de modelamiento microscópico. Se enfoca en la descripción del comportamiento del sistema de transporte a través de la simulación de las entidades discretas individuales (vehículo, peatón, ciclista, etc.) que interactúan unas con otras, basados en diversos modelos de decisión individual: seguimiento vehicular, cambio de pista, aceptación de brechas, etc.

Según Casas et al. (2010), se considera que cada vehículo (conductor) recorre su ruta tomando decisiones individuales de velocidad, de cambio de pista, de adelantamiento, etc., en función de las condiciones prevalecientes, la regulación de las vías e intersecciones y la interacción con otros vehículos y con otros usuarios de la red, los cuales pueden ser modelados en forma explícita. Del mismo modo, pueden modelarse la operación del transporte público, incluidas sus paradas, y diversas otras situaciones que ocurren en la vialidad y que afectan la circulación.

Los tipos de vehículo se simulan a partir de:

- Características físicas de los vehículos,
- Características de operación,
- Características de los conductores, etc.

Para calibrar una red codificada en Aimsun se establecen dos fases:

- Caracterizar de los vehículos y las variables de comportamiento: establecer valores de los parámetros de los vehículos y las variables de comportamiento, algunas de las cuales pueden ser medidas, pero otras solo inferidas, de manera tal de reproducir un fenómeno particular observado.
- Representar adecuadamente las características de la red: reproducir operativamente los diversos fenómenos que suceden localmente en dicho acceso y que resultan en dicha capacidad: composición del flujo, movimientos por pista, operación de paraderos, programación del semáforo, etc.

Existe una gran cantidad de parámetros que se requieren para realizar una simulación. Si bien el modelo posee valores por defecto, muchos de ellos no reflejan las condiciones y características de vehículos y conductores locales, por lo que resulta imprescindible disponer de valores que las representen adecuadamente a nivel local.

El diseño de la red vial analizada debe reproducir flujos, capacidades, demoras, tiempos de viaje, colas, etc.

Aimsun cuenta con los siguientes modelos de comportamiento.

a) Seguimiento vehicular:

Considerando que para todo vehículo  $n$ ,  $v_n(t)$  es su velocidad en el instante  $t$ ,  $v_n^{des}$  es su velocidad deseada,  $a_n^{max}$  es su máxima aceleración y  $T$  es su tiempo de reacción o paso de simulación, entonces la máxima velocidad que un vehículo puede alcanzar durante un intervalo de tiempo será el máximo entre las siguientes dos ecuaciones:

Máxima velocidad alcanzable:

$$v_n(t+T) = v_n(t) + 2,5 * a_n^{max} * T * \left(1 - \frac{v_n(t)}{v_n^{des}}\right) * \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{v_n^{des}}} \quad (1)$$

Velocidad en presencia de otros vehículos con quienes comparte la vía:

$$v_n(t+T) = d_n^{max}T + \sqrt{(d_n^{max}T)^2 - d_n^{max}T \left[ 2(x_{n-1}(t) - S_{n-1} - x_{n-1}(t)) - v_n(t)T - \frac{v_n(t)^2}{\bar{d}_{n-1}} \right]} \quad (2)$$

Donde  $d_n$  es su desaceleración,  $x_n(t)$  es su posición,  $x_{n-1}(t)$  y  $S_{n-1}$  son la posición y la longitud del vehículo precedente.

Entonces, la posición de un vehículo está dada por la siguiente expresión:

$$x_n(t+T) = x_n(t) + v_n(t+T)T \quad (3)$$

Dependiendo de la composición del tráfico el vehículo subestimaré la desaceleración del vehículo antecesor, volviéndose más agresivo y disminuyendo la brecha, o la sobreestimaré volviéndose más cuidadoso, incrementando la brecha.

Cuando un vehículo circula a lo largo de una sección, se considera la influencia de vehículos que circulan más lento en una pista adyacente. Básicamente, el modelo determina una nueva velocidad máxima deseada que será utilizada en el modelo de seguimiento para esa sección.

b) Cambio de pista:

La decisión para el cambio de pista sigue el modelo de Gipps (1986) y responde en primer lugar a la necesidad del cambio de pista, lo cual depende de varios factores, como la necesidad de virajes, distancia al siguiente viraje y condiciones de tráfico de la pista actual. En segundo lugar se responde si es deseable cambiar de pista, para lo cual se verifica si habrá una mejora en las condiciones de tráfico al cambiar de pista. En tercer lugar se analiza si es posible cambiar de pista, lo cual depende de la brecha que existe para realizar el cambio. Para esto se calculan las condiciones de frenado del vehículo precedente de la nueva pista y las condiciones de frenado impuestas a los vehículos aguas arriba de la nueva pista.

c) Modelos de elección de ruta:



El proceso de asignación se realiza determinando las rutas alternativas de menor costo y luego aplicando alguna de las opciones de modelos de elección disponibles en el software. La asignación se hace a través de un proceso dinámico, en donde se define un intervalo denominado "feedback time", en que se recalculan los costos de cada ruta disponible entre todos los pares origen destino. Luego, el modelo selecciona las rutas de menor costo entre cada par OD y luego distribuye los viajes.

Existe un período inicial llamado "warm up" en el cual se llena la red, se computan los costos de cada red y se obtienen las rutas alternativas. Posteriormente, una vez iniciada la simulación, se recalculan las variables de la red en cada intervalo elegido en función de los costos en la red en los ciclos anteriores. Esto no significa que las rutas pueden cambiar en cada intervalo.

Existen 4 opciones de modelos de elección de ruta, todos con un enfoque estocástico:

- Binomial: se escoge la ruta  $k$  según las rutas definidas en intervalos previos, siguiendo la distribución:  $P(x) = \binom{k-1}{x} p^x (1-p)^{k-1-x}$ , donde  $P(x)$  es la probabilidad de elegir la ruta  $x$  entre otras  $k-1$  alternativas y  $p$  es la probabilidad de éxito.
- Proporcional: se escoge la ruta  $k$  según su menor costo  $C_k$  siguiendo la distribución:  $P_k = \frac{C_k^{-\alpha}}{\sum_i C_i^{-\alpha}}$  donde  $\alpha$  es un parámetro de comportamiento.
- Logit Multinomial: la probabilidad de elegir una ruta  $k$  depende de su menor costo  $C$  según la siguiente distribución:  $P_k = \frac{e^{-\gamma C_k}}{\sum_i e^{-\gamma C_i}}$ , donde  $\gamma$  es un factor de escala inversamente proporcional a la varianza entre alternativas
- C-logit: la probabilidad de elegir una ruta  $k$  se expresa como:  $P_k = \frac{e^{-\gamma(V_k - CF_k)}}{\sum_i e^{-\gamma(V_i - CF_i)}}$ , donde  $V_k$  es un factor de escala que representa la utilidad percibida por la ruta y  $CF$  representa un factor traslape de la ruta  $k$  respecto de las otras alternativas, es decir, rutas similares llevarán a valores más grandes de  $CF$  y por ende menor utilidad. Esto permite que el modelo distinga entre alternativas que poseen un alto

grado de traslape, haciendo que haya menos cambios de ruta o "saltos" a lo largo de la simulación.

- También existe la posibilidad que el usuario defina su propio modelo de elección de ruta.

En síntesis, se entiende que Aimsun entrega resultados de asignación que dependen directamente de los valores escogidos para sus parámetros (Casas et al., 2010).

Siguiendo la experiencia y recomendaciones realizadas por Subtrans (2015a), el presente trabajo se considera un modelo de asignación mesoscópico existente, para luego simular dichas elecciones de ruta con un modelo microscópico construido en Aimsun.

Esto no descarta que existan enfoques alternativos de análisis y asignación basados exclusivamente en microsimulación.

## 3. Metodología

### 3.1 Metodología de análisis

Con objeto de analizar los problemas específicos del sector inmediatamente próximo al acceso portuario de la ciudad de Arica, se plantea una metodología que combina los niveles de simulación mesoscópica y operacional-microscópica. Para obtener información de asignación se utiliza un modelo mesoscópico existente desarrollado en Saturn (MOP, 2015). Para representar el nivel operacional detallado se utiliza el software de microsimulación Aimsun.

El proceso de construcción de la red de simulación a nivel táctico sigue las siguientes etapas:

- a) Definición del área de estudio: conformada por el sector próximo al acceso portuario, es decir, el último tramo vial del recorrido de camiones donde forman la fila de espera. Se encuentra delimitada por las siguientes vías:
  - Intersección de las avenidas Santa María y Luis Beretta Porcel al norte,
  - Avenidas Santa María y Vicuña Mackenna al oriente,
  - Avenidas Héroes del Morro y Carlos Condell al sur,
  - Avenidas Luis Beretta Porcel, Pedro Montt y Máximo Lira al poniente.
- b) Construcción de la red: consiste en recortar y ajustar la red disponible en MOP (2015), reproduciendo las características geométricas de los arcos e intersecciones de la red vial: arcos, intersecciones, conectores, etc.
- c) Calibración de la matriz de viajes de transporte privado: consiste en obtener una matriz origen destino que permita reproducir la matriz de viajes desarrollada por el modelo táctico. Este proceso de estimación se realiza con el método de máxima entropía en Saturn.
- d) Codificación de rutas fijas: consiste en reproducir los flujos de transporte público y de camiones calibrados del modelo táctico del MOP (2015), sobre la nueva red recortada.

Posteriormente se construye una red de microsimulación que permite analizar efectos sobre el entorno más próximo al acceso portuario. El

proceso de construcción del modelo microscópico se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- a) Definición del Área de Estudio: consiste en definir la red de arcos que conectan el Puerto de Arica con los flujos de camiones que vienen desde el norte, con foco en el último tramo más próximo al acceso portuario. Esta red ha sido descrita anteriormente en el punto 1.4 Área de y se encuentra delimitada por los siguientes ejes:
  - Río San José al norte,
  - Recinto portuario al poniente,
  - Avenida Carlos Condell al sur,
  - Avenida Máximo Lira al oriente.
- b) Recopilar información operativa del Área de Estudio: esta información se obtiene principalmente del modelo Inner desarrollado en el estudio MOP (2015), junto con información complementaria que fue levantada personalmente en terreno.
- c) Representación de la red: se chequea la velocidad máxima de cada sección, números de pistas en cada arco, uso de pistas para cada movimiento en las intersecciones, rutas de buses y camiones, ubicación de paraderos, etc.
- d) Calibración de la red de microsimulación: este procedimiento se define en dos niveles que deben ser revisados durante la calibración:
- e) Ajuste de la demanda: se verifica que los flujos simulados repliquen los niveles de flujo observados, que en este caso son los flujos del modelo táctico. Para la calibración de la demanda se utilizara el estadístico GEH que se muestra a continuación:

$$GEH^a = \sqrt{\frac{2 \cdot (q_{sat}^a - q_{aim}^a)^2}{(q_{sat}^a + q_{aim}^a)}} \quad (4)$$

Donde  $q_{sat}$  es el flujo vehicular obtenido de Saturn y  $q_{aim}$  es el flujo vehicular simulado en Aimsun. En general, se considera que el 85% de los arcos con un GEH inferior a 5 es un ajuste satisfactorio.

- f) Calibración de la capacidad: se calibran los parámetros vehiculares y de comportamiento de los usuarios con el objeto de representar el comportamiento de cada tipo de vehículo en diferentes condiciones. Para esto se considera el indicador de largo de cola en intersecciones, representado por el indicador variable “Máxima longitud de cola” de Aimsun, tal como se muestra a continuación:

$$I. D. = \sum_t \text{accesos} \left( \left( \frac{\text{cola}_{aim,i} - \text{cola}_{sat,i}}{\text{cola}_{sat,i}} \right) * \frac{\text{cola}_{sat,i}}{\text{cola}_{sat,red}} \right) \quad (5)$$

Donde  $\text{cola}_{sat,i}$  corresponde a la cola obtenida en Saturn en el acceso  $i$  y  $\text{cola}_{aim,i}$  es la cola obtenida en Aimsun en el acceso  $i$ .  $\text{cola}_{sat,red}$  es la cola total en todos los accesos.

En base a la minimización de este indicador se ajustan parámetros globales y específicos del modelo.

- g) Validación: se considera como parámetro de validación el tiempo de viaje promedio a lo largo del eje Máximo Lira, por donde transitan los camiones. Se valida comparando los tiempos de viaje promedio simulados en Saturn con los resultados de Aimsun.
- h) Representación de la fila de camiones en acceso al recinto portuario: se representa la fila de camiones que se forma junto al acceso portuario mediante Aimsun. Esto se realiza mediante la definición de una parada que simula la operación de la garita de acceso al recinto portuario, junto a la definición de una línea de camiones mediante un tratamiento como si fueran buses, aunque usando parámetros de comportamiento propio de los camiones. El flujo de camiones se obtiene de proyecciones del puerto disponibles en el estudio Subtrans (2015b).
- i) Construcción de escenarios y alternativas de solución: se simulan alternativas de solución.
- j) Re-asignación mesoscópica: para identificar si las alternativas de solución generan efectos de red y reasignaciones de tráfico, se cargan las alternativas de solución en el modelo mesoscópico. Con esto se obtienen flujos de entrada al modelo micro de cada alternativa.
- k) Obtención de resultados del modelo de microsimulación: se analizan y comparan variables de desempeño del sistema de transportes de cada alternativa de solución, destacando ventajas y limitaciones de aplicación.

### **3.2 Repeticiones o réplicas**

Debido a las interacciones propias de los submodelos existentes en Aimsun, los resultados pueden ser diferentes entre una corrida y otra. Por este motivo, es necesario hacer un número adecuado de corridas bajo un mismo escenario, para obtener resultados que sean estadísticamente significativos.

Siguiendo las recomendaciones de DPTI (2013), es deseable contar con al menos 10 réplicas del modelo para cada período. Para efectos del presente trabajo, se realizan 30 repeticiones de cada escenario simulado.

# 4. Desarrollo de la herramienta de simulación

## 4.1 Desarrollo de la asignación de tráfico

La asignación de viajes a la red se realiza mediante un modelo Saturn existente en MOP (2015). De esta forma se determina el nivel de flujo de los arcos de la red.

Para esto se define una red amplia que permite analizar las externalidades causadas por la fila de camiones. Dicha red se encuentra limitada por las siguientes vías:

- Intersección de las avenidas Santa María y Luis Beretta Porcel al norte,
- Avenidas Santa María y Vicuña Mackenna al oriente,
- Avenidas Héroes del Morro y Carlos Condell al sur,
- Avenidas Luis Beretta Porcel, Pedro Montt y Máximo Lira al poniente.

A continuación se muestra una figura del Área de Estudio de la red de simulación mesoscópica:



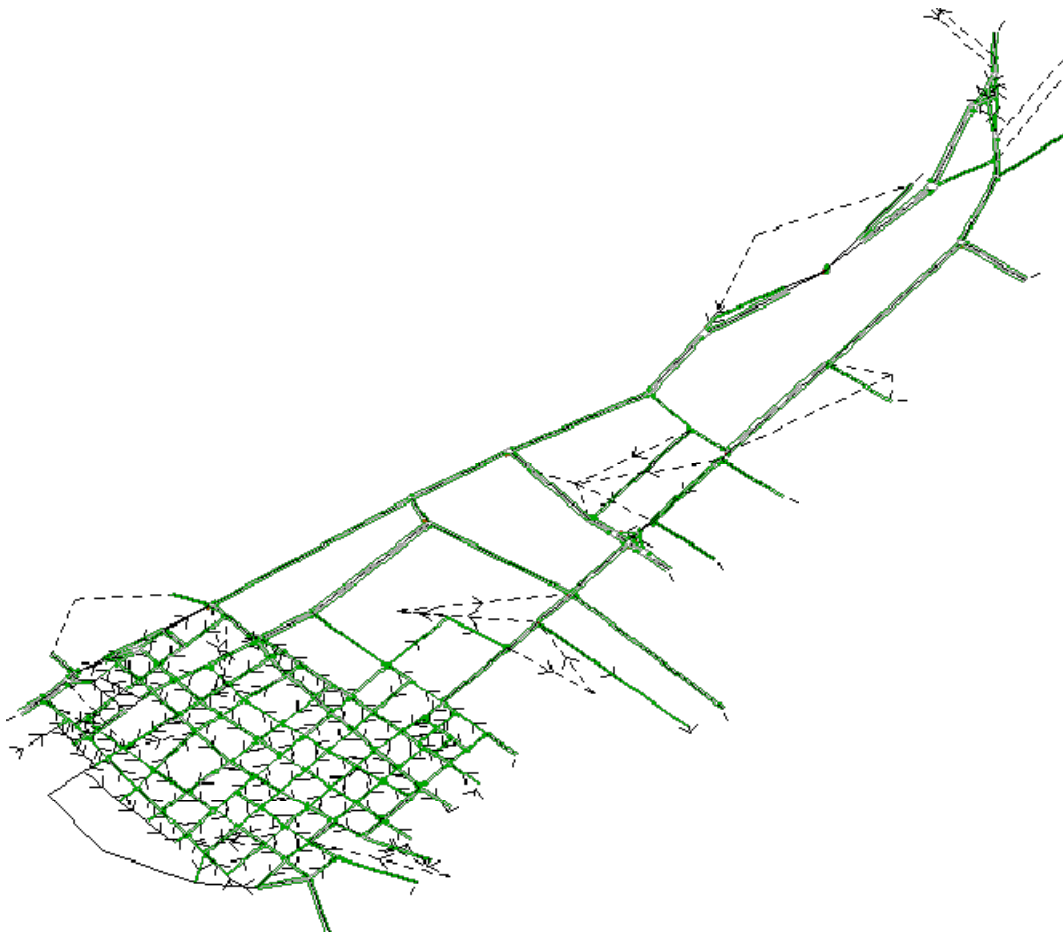


Movimiento	Flujo de Saturación [ADE*/H – Pista]
Directo	1600
Viraje Derecha	1280
Viraje Izquierda	1390

\*ADE: abreviatura de Auto Directo Equivalente, es decir, cuyo movimiento en la intersección es directo (no vira)

Fuente: MOP (2015)

En la siguiente figura se muestra la red de simulación mesoscópica.



**Figura 12. Red de simulación mesoscópica**

Fuente: Saturn

### **4.3 Calibración de la red**

El proceso de calibración de la red táctica de modelación se describe en el estudio MOP (2015). Los vehículos considerados en la calibración de rutas fijas son los siguientes:

- Buses y Taxibuses.
- Taxis Colectivos.
- Buses Interurbanos.
- Camión de 2 ejes.
- Camión de más de 2 ejes.

Las líneas identificadas presentan un conjunto de frecuencias operacionales catastradas por período y corresponden a los valores iniciales en el proceso de calibración.

La determinación de las frecuencias definitivas por línea y período se realiza contrastando la sumatoria de frecuencias por línea en arcos donde existen flujos observados para cada modo.

A continuación se minimiza el módulo de la diferencia entre flujos observados y frecuencias iniciales agregadas por arco, en un conjunto acotado de arcos de la red.

Las restricciones corresponden a que la frecuencia modelada de cada línea debe ser no negativa y menor que un cierto umbral o frecuencia máxima.

Se definen los puntos de acceso a la red de modelación, tanto desde las zonas externas como internas del modelo. A modo preliminar, se establecen las velocidades a flujo libre, es decir, sin considerar demoras, en los arcos de la red interna.

A continuación se muestra el ajuste de la calibración de rutas fijas, obtenido de información disponible en el estudio MOP (2015).

Tabla 3: Grado de Ajuste Rutas Fijas

	Bondad de Ajuste R <sup>2</sup>			
	Punta Mañana	Fuera de Punta	Punta Mediodía	Punta Tarde
Buses y taxibuses	0,87	0,87	0,89	0,84
Taxis Colectivos	0,85	0,84	0,84	0,83
Buses interurbanos	0,88	0,82	0,82	0,88
Camión de 2 Ejes	0,77	0,80	0,80	0,78
Camión de más de 2 Ejes	0,93	0,82	0,82	0,85
Buses y taxibuses	0,87	0,87	0,89	0,84
Taxis Colectivos	0,85	0,84	0,84	0,83

Fuente: MOP (2015)

Con el objetivo de lograr un mejor ajuste de las matrices a los conteos observados, se procedió a realizar un proceso de estimación de matrices empleando para ello rutinas internas del modelo Saturn. Los resultados obtenidos en dicho proceso de estimación son los siguientes:

Tabla 4: Indicadores de Ajuste

Indicadores	Valor R <sup>2</sup>
$Y = a + B*X$	0,9
$Y = B*X$	0,9
$Y = X$	0,9
Error Promedio por Arco (%)	2,30
GEH	3,45

Fuente: MOP (2015)

En el cuadro anterior, se aprecia que los resultados del proceso de calibración son satisfactorios, ya que se alcanzaron índices de ajuste en términos del R<sup>2</sup> superiores a 0.9 para todas las formas funcionales y períodos. Estos resultados se complementan con los bajos valores del error promedio por arco y GEH.

Tabla 5: Variaciones en Volúmenes de Viajes

Indicador	Valor
Matriz a Priori	17.182
Matriz Final	16.784
Diferencia	398
Variación Porcentual	2,32%

Fuente: MOP (2015)

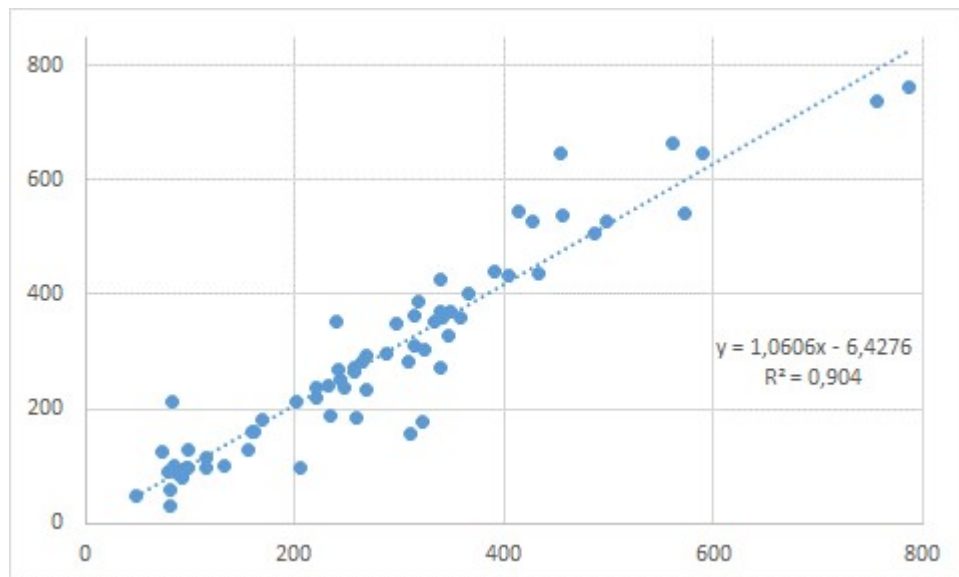
Interesa ajustar los parámetros de la red de manera de lograr un adecuado ajuste entre flujos periódicos observados y modelados. Para la representación de la red vial del área se modeló cada intersección considerando los movimientos permitidos, el número y uso de las pistas de cada acceso.

Tabla 6: Variaciones en Volúmenes de Viajes

Ubicación	Arco	Obs	Mod	Dif	%	GEH
Av. Santiago Arata / Av. Santa María- Av. Luis Beretta	745-747- 748	457	538	-81	18%	3,6
	745-747- 749	573	541	32	6%	1,3
	748-722- 723	248	236	12	5%	0,8
	721-722- 723	392	439	-47	12%	2,3
Av. Santa María- Av. Diego Portales	291-265- 264	115	98	17	14%	1,6
	291-265- 5710	234	189	45	19%	3,1
	291-266- 270	83	213	-130	56%	10,7
	266-265- 291	81	31	50	62%	6,7
	266-265- 264	205	95	110	53%	8,9
	5710-265- 291	315	309	6	2%	0,4
	5710-265- 264	366	400	-34	9%	1,8
	261-264- 291	156	129	27	17%	2,2
	264-265- 5710	323	179	144	45%	9,1

	264-265-266	315	363	-48	15%	2,6
San Ignacio Loyola-Rafael Sotomayor	28006-28003	349	371	-22	6%	1,2
	28031-28003	162	159	3	2%	0,3
18 de Septiembre-Maipú	48003-22010	241	268	-27	11%	1,7
	48001-48002	309	281	28	9%	1,6
Máximo Lira-Chacabuco	5700-4008	562	666	-104	19%	4,2
	4009-4008	324	302	22	7%	1,3
	91005-4008	341	360	-19	6%	1,0
Máximo Lira-Acceso Puerto	4008-2002	428	527	-99	23%	4,5
	2003-2002	201	212	-11	6%	0,8
	2010-2002	159	159	0	0%	0,0

Fuente: MOP (2015)



**Figura 13. Gráfico de ajuste de flujos modelados vs. observados**

Fuente: MOP (2015)

## **4.4 Calibración del modelo de microsimulación**

El principal objetivo de la fase de calibración es replicar de manera realista el movimiento del tráfico observado en el simulador.

### **4.4.1 Definición del Área de Estudio**

En esta etapa inicial se define la red de arcos que conectan el Puerto de Arica con los flujos de camiones que provienen desde el norte, con el foco en representar los conflictos identificados en las proximidades del acceso portuario. Dicha red se conforma por los arcos de la red vial urbana delimitada por las siguientes vías:

- Río San José al norte,
- Recinto portuario al poniente,
- Avenida Carlos Condell al sur,
- Avenida Máximo Lira al oriente.

A continuación se muestra una figura del área de estudio de microsimulación:



**Figura 14. Área de estudio**

Fuente: Google

Con objeto de describir el comportamiento del sistema, la red se modela en Aimsun incorporando la interacción propia entre usuarios e incluyendo elementos físicos. La herramienta de simulación permite realizar un análisis detallado de la operación de los vehículos en la red y analizar alternativas de diseño de proyectos. Del mismo modo, el modelo permite analizar el comportamiento y operación del transporte de carga mayor, incluida la fila de camiones que se establece frente al acceso portuario.

#### **4.4.2 Recopilar información operativa del Área de Estudio**

En esta etapa se recopila información disponible de longitud de cada arco y número de pistas, chequeando que la longitud de las pistas de viraje y anchos de cada pista sean correctos, indicando los movimientos prohibidos.

También se recopila la velocidad máxima de cada sección, números de pistas en cada sección de arco, uso de pistas para cada movimiento en las intersecciones, rutas de buses y camiones, ubicación de paraderos, etc.

Esta información se obtiene principalmente del estudio MOP (2015), junto con información complementaria levantada personalmente en terreno.

#### **4.4.3 Representación de la red en Aimsun**

Se obtiene información mediante una base cartográfica, la cual será utilizada para crear la red en el modelo microscópico. De esta forma se asegura que las distancias entre las intersecciones tienen las dimensiones correctas.

Se generan los arcos e intersecciones en el simulador, contando con una base geométrica importada desde la cartografía OpenStreetMap sobre la cual se construyen las distintas vías.

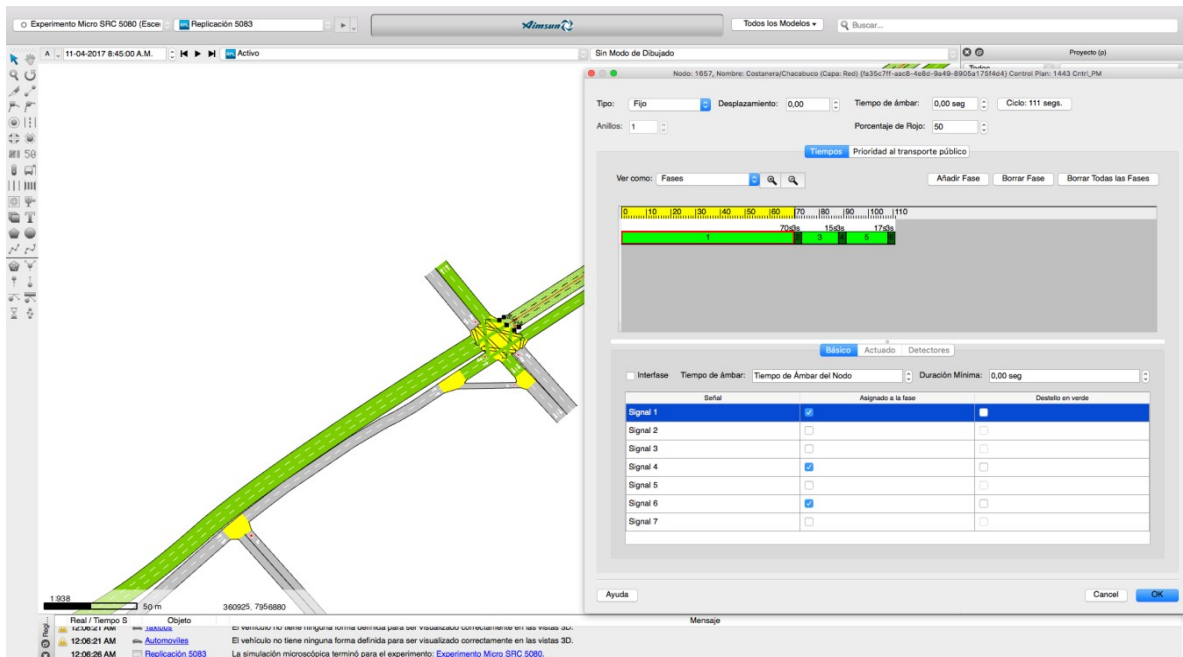
Esta base cartográfica contiene el detalle geométrico de las calles e intersecciones, al igual que el uso de pistas para realizar los diferentes movimientos.

En esta etapa también es necesario caracterizar las velocidades máximas permitidas en cada una de las vías, al igual que el tipo de regulación en los cruces. Esta información es obtenida del estudio MOP (2015).

Se recalca la importancia de reportar como operan los vehículos a pesar de las demarcaciones o señalizaciones existentes. De esta manera, se pueden encontrar casos donde los vehículos utilizan más de una pista para el viraje, o se forman más de una cola por pista definida. Se define la regulación de cada intersección, ya sea semaforizada o con señal de prioridad.

En la siguiente figura se muestra la caracterización del plan de control de tránsito de una de las intersecciones consideradas en el Área de Influencia.



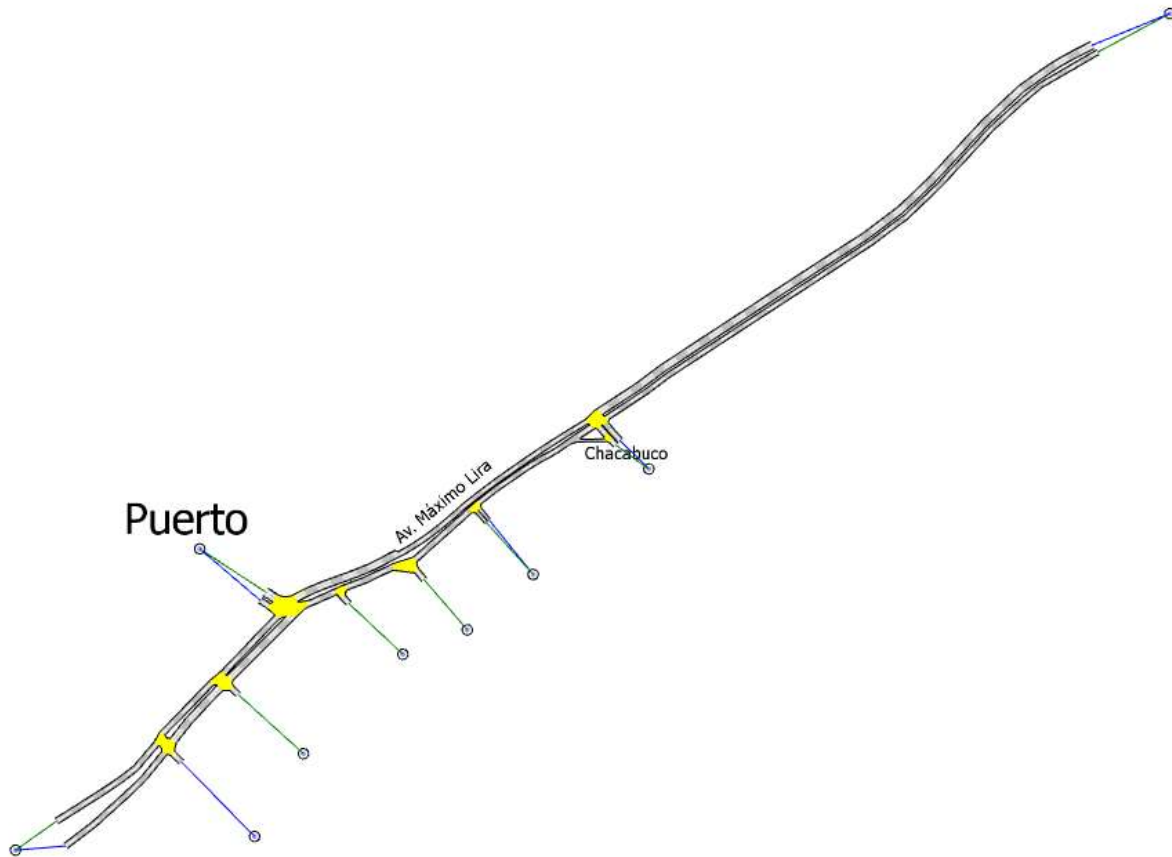


**Figura 15. Caracterización del plan de control de tránsito**

Fuente: Aimsun

Cada arco entre dos intersecciones puede estar compuesta por más de una sección. Cada sección tiene características propias de uso, como número de pistas y ensanches al final o al comienzo de la sección.

En la siguiente figura se muestra la caracterización física de la red de microsimulación en Aimsun.



**Figura 16. Caracterización física de la red**

Fuente: Aimsun

#### **4.4.4 Caracterización de la demanda**

Los flujos vehiculares se representan en forma de matrices de tráfico. Para cada intersección de ingreso, se cargan en el modelo los porcentajes de viraje de los movimientos permitidos. De esta forma existe una continuidad de flujos en el modelo, por esto los datos también deben reflejar este hecho para representar la situación observada.

#### **4.4.5 Calibración de primer nivel**

Para calibrar la demanda se comparan los flujos vehiculares simulados por el modelo táctico con los de microsimulación. Aquí se calibran parámetros a nivel de red y se seleccionan aquellos valores de parámetros que minimicen el GEH promedio global a nivel de red, exigiendo que además el 85% de la muestra de flujos en arcos tengan un GEH inferior a 5.

A continuación se muestra el indicador GEH:

$$GEH^a = \sqrt{\frac{2 \cdot (q_{sat}^a - q_{aim}^a)^2}{(q_{sat}^a + q_{aim}^a)}} \quad (6)$$

$q_{sat}$  es el flujo vehicular obtenido de Saturn y  $q_{aim}$  es el flujo vehicular simulado en Aimsun.

Tabla 7: Indicador GEH

Parámetro	Acceso	Flujo Saturn [veh/h]	Flujo Aimsun [veh/h]	GEH
Máximo Lira / Puerto	Máximo Lira (oriente)	428	420	0,38
	Máximo Lira (poniente)	201	198	0,21
	Puerto	159	150	0,72
Máximo Lira / Chacabuco	Máximo Lira (norte)	562	557	0,21
	Máximo Lira (sur)	324	320	0,22
	Chacabuco (oriente)	341	335	0,32
GEH promedio				0,35

Fuente: Aimsun

Se concluye que la calibración de primer es satisfactoria, lo cual es previsible debido a que los mismos flujos del modelo táctico se están cargando en la red de microsimulación. Las diferencias son leves y obedecen a aleatoriedades en la generación de resultados del modelo Aimsun.

#### 4.4.6 Calibración de segundo nivel

A continuación deben ingresarse al modelo las características físicas y operacionales de cada tipo de vehículo, describiendo los parámetros diferentes vehículos que circulan en la red de tráfico.

El modelo incluye valores por defecto para las diferentes variables operacionales de cada tipo de vehículo, lo cual representa sus respectivas características físicas y operacionales.

En esta etapa se busca ajustar los valores por defecto para que reflejen las condiciones y características de vehículos y conductores locales.

Este ajuste se realiza mediante la minimización de las diferencias del indicador de desempeño de longitud máxima de cola, que busca representar

el comportamiento de cada tipo de vehículo y de comportamiento de los usuarios en diferentes condiciones.

En base a los resultados de esta etapa, se ajustan parámetros globales y específicos del modelo.

A continuación se presentan los valores iniciales utilizados:

Tabla 8: Parámetros del escenario

Nombre	Valor	Unidad
Velocidad de formación de cola	1,0	[m/s]
Velocidad de disipación de cola	4,0	[m/s]
Tiempo de Reacción	0,80	[s]
Tiempo de Reacción en parada	1,30	[s]
Tiempo de Reacción en semáforo	1,50	[s]

Fuente: Aimsun

Se realiza un procedimiento iterativo en cuya primera iteración se ingresan los parámetros indicados. En las siguientes iteraciones se chequea cada parámetro, se varía su valor y se calcula el índice de desempeño, afinando progresivamente los valores para obtener un menor índice de desempeño (I.D.). La formulación del indicador se muestra a continuación:

$$I.D. = \sum_i^{accesos} \left( \left( \frac{cola_{aim,i} - cola_{sat,i}}{cola_{sat,i}} \right) * \frac{cola_{sat,i}}{cola_{sat,red}} \right) \quad (7)$$

Donde  $cola_{sat,i}$  corresponde a la cola obtenida en Saturn en el acceso  $i$  y  $cola_{aim,i}$  es la cola obtenida en Aimsun en el acceso  $i$ .  $cola_{sat,red}$  es la cola total en todos los accesos obtenida en Saturn.

A continuación se presentan los resultados de las iteraciones correspondientes.

Tabla 9: Resultados de iteraciones

<b>Iteración</b>	<b>Índice de desempeño (I.D.)</b>
1	73,3%
2	32,5%
3	27,1%
4	21,4%
5	17,2%
6	14,8%
7	13,1%
8	12,5%
9	12,1%
10	11,7%

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados se muestran de manera gráfica en la siguiente figura:



**Figura 17. Resultados de iteraciones**

Fuente: Elaboración propia

Como resultado se obtienen valores calibrados de parámetros para el caso local, que reemplazan a los parámetros indicados anteriormente.

Tabla 10: Parámetros calibrados

Nombre	Valor por defecto	Valor calibrado	Unidad
Velocidad de formación de cola	1,0	1,2	[m/s]
Velocidad de disipación de cola	4,0	5	[m/s]
Tiempo de Reacción	0,80	1,0	[s]
Tiempo de Reacción en parada	1,30	1,30	[s]
Tiempo de Reacción en semáforo	1,50	1,30	[s]

Fuente: Aimsun

Los parámetros para cada tipo de vehículo se señalan a continuación:

Tabla 11: Parámetros para camiones de más de dos ejes

<b>Nombre</b>	<b>Media</b>	<b>Desv</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Unidad</b>
Largo	14	3,0	13	17	Metros
Ancho	2,3	0,5	2	2,5	Metros
Velocidad máx. deseada	60,0	0,0	60,0	60,0	Km/h
Aceleración máx.	1,0	0,5	0,6	1,8	m/s <sup>2</sup>
Desaceleración normal	1,0	0,5	0,8	1,5	m/s <sup>2</sup>
Desaceleración máx.	3,0	1,0	2,0	4,0	m/s <sup>2</sup>
Aceptación de Velocidad	1,0	0,0	1,0	1,0	
Distancia mín. entre veh.	1,5	0,5	1,0	2,5	Metros

Fuente: Aimsun

Se asumen los mismos parámetros para todos los vehículos livianos.

Tabla 12: Parámetros para vehículos livianos

<b>Nombre</b>	<b>Media</b>	<b>Desv</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Unidad</b>
Largo	4,2	0,5	4,0	4,5	Metros
Ancho	2,0	0,0	2,0	2,2	Metros
Velocidad máx. deseada	60,0	0,0	60,0	60,0	Km/h

Aceleración máx.	2,8	0,4	2,4	2,8	m/s <sup>2</sup>
Desaceleración normal	4,0	0,5	3,5	4,5	m/s <sup>2</sup>
Desaceleración máx.	6,0	0,0	6,0	6,0	m/s <sup>2</sup>
Aceptación de Velocidad	1,0	0,0	1,0	1,0	
Distancia mín. entre veh.	1,0	0,0	1,0	1,0	Metros

Fuente: Aimsun

Tabla 13: Parámetros para taxibuses

<b>Nombre</b>	<b>Media</b>	<b>Desv</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Unidad</b>
Largo	8,29	0,2	7,73	8,8	Metros
Ancho	2,33	0,0	2,0	3,0	Metros
Velocidad máx. deseada	60,0	0,0	60,0	60,0	Km/h
Aceleración máx.	1,72	0,59	1,11	4,17	m/s <sup>2</sup>
Desaceleración normal	2,85	0,64	1,94	4,72	m/s <sup>2</sup>
Desaceleración máx.	6,0	2,0	4,5	6,0	m/s <sup>2</sup>
Aceptación de Velocidad	1,0	0,0	1,0	1,0	
Distancia mín. entre veh.	1,4	0,7	1,0	2,0	Metros

Fuente: Aimsun

#### 4.4.7 Validación

Como indicador de validación se utiliza el tiempo de viaje promedio en ruta, incluyendo tiempos de detención en diferentes tramos, y se procede a comparar los resultados del modelo táctico con los de la microsimulación.

Los tramos en los que se mide esta diferencia se muestran a continuación:



**Figura 18. Tramos de validación**

Fuente: Google

A continuación se presentan los resultados.

Tabla 14: Resultados de validación

Nombre	TV promedio Saturn [seg/veh]	TV promedio Aimsun [seg/veh]	Diferencia [%]
Máximo Lira entre Río San José y Chacabuco N-S	122	114	7%
Máximo Lira entre Chacabuco y garita Puerto N-S	63	58	8%

Fuente: Aimsun

En función de estos resultados, se cumple la condición recomendada de que las diferencias se encuentran por debajo del 10%, por lo que acepta la validación del modelo.



## 5. Aplicación

### 5.1 Escenario general de simulación

La información de demanda considerada en la Situación Base se construye para el corte temporal 2020, mediante una proyección disponible en MOP (2015).

El periodo considerado corresponde a la punta mañana (PM), es decir, entre las 7:45 hrs. y las 8:45 hrs., según la periodización obtenida en MOP (2015).

El escenario de demanda de viajes se construye en base a factores de crecimiento de flujos vehiculares obtenidos de MOP (2015). También se cuenta con las proyecciones del Puerto de Arica reportadas en MOP (2015), respecto a la cantidad de vehículos de carga mayor que operarán con el Puerto en el año de corte.

En la tabla siguiente se muestra la proyección de los camiones.

Tabla 15: Proyección de tránsito de camiones

<b>Año</b>	<b>Cantidad camiones hora punta</b>
2017	61
2020	72

Fuente: MOP (2015)

### 5.2 Situación Base

La Situación Base incorpora una representación de la fila de camiones que se establece inmediatamente junto al acceso del recinto portuario. En el periodo punta de la mañana, esta fila presenta extensiones promedio de 370 metros a lo largo de Máximo Lira hasta llegar a la Av. Chacabuco (MOP, 2015). Como se ha dicho antes, esta situación restringe la capacidad de la Av. Máximo Lira en una de las dos pistas continuas que existen a lo largo de dicho tramo.

Cabe mencionar que el efecto de la formación de la fila de camiones no es captado por el modelo mesoscópico original calibrado en MOP (2015), sino que el tramo vial entre Chacabuco y el acceso portuario fue modelado como

un arco único de dos pistas continuas disponibles. Se hace necesario, entonces, modificar la red táctica restringiendo el número de pistas disponibles a una.

Esta modificación sobre el modelo de nivel táctico, permite analizar posibles re-asignaciones del flujo vehicular que transita sobre el eje Máximo Lira y su entorno urbano, que serían causadas durante periodos en los que se forma la fila de camiones junto al acceso.

La fila se representa en Aimsun mediante la herramienta de construcción de líneas de transporte público, usando intervalos y parámetros propios del comportamiento de los camiones de gran tamaño.

Para simular la operación de la garita de acceso al recinto portuario se construye y especifica una parada. Esto fuerza a los camiones a esperar durante el tiempo de atención de la garita, formando como consecuencia una fila que reproduce los largos observados.

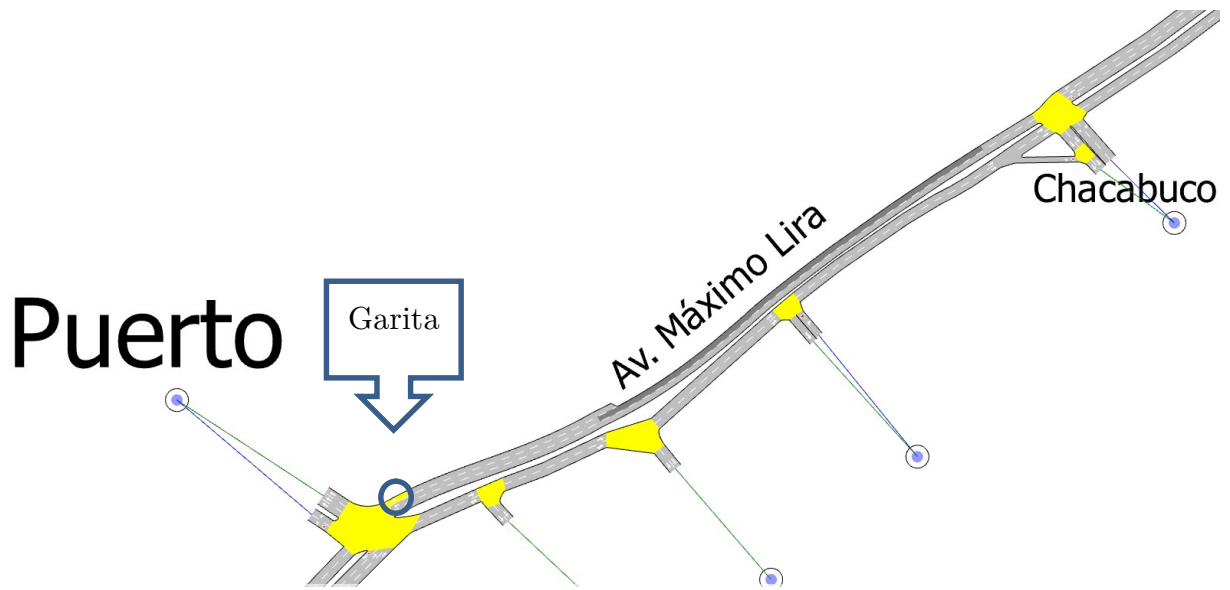
Los parámetros de atención de la garita de acceso fueron medidos en terreno durante el periodo Punta de la Mañana en un día normal, obteniéndose los siguientes valores:

Tabla 16: Parámetros de atención garita de acceso

<b>Parámetro</b>	<b>Tiempo [seg]</b>
Intervalo de tiempo entre salida camiones	50
Tiempo de atención garita	180

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se destaca la ubicación del elemento de detención que simula la garita de acceso.



**Figura 19. Representación de garita**  
Fuente: Aimsun

En la siguiente figura se muestra un detalle de la simulación de la fila de camiones (color verde) que se forma en espera de atención de la garita de acceso.



**Figura 20. Representación de la fila de camiones**  
Fuente: Aimsun

### **5.3 Alternativas de solución**

Se construyen dos alternativas de solución que han sido propuestas por EPA (2013) con objeto de resolver los problemas causados por la fila de camiones. La primera se encuentra asociada a la provisión de nueva infraestructura de acceso exclusivo para camiones. La segunda consiste en una medida de gestión del tránsito de camiones mediante un Antepuerto, que funcionaría en coordinación con los tiempos de atención de la garita de acceso a puerto. En tercer lugar se analiza la operación conjunta de estas dos soluciones.

Las alternativas en análisis son las siguientes:

- 1) Acceso exclusivo para camiones.
- 2) Operación de Antepuerto.
- 3) Operación conjunta de acceso exclusivo y Atepuerto.

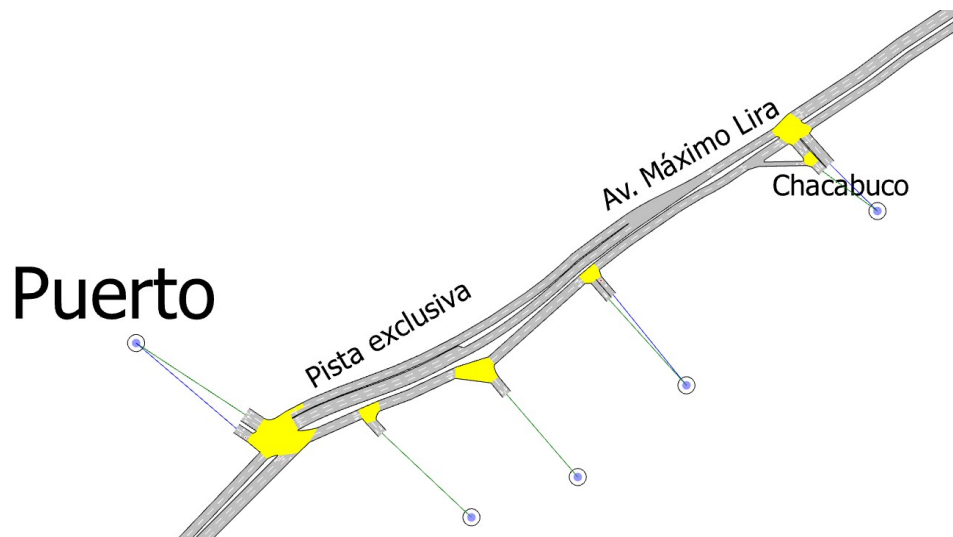
### **5.4 Alternativa 1: Acceso exclusivo para camiones**

Se modifica la red táctica agregando un nuevo arco dedicado exclusivamente al acceso de camiones a puerto. Según la propuesta del Puerto (2013), este acceso consiste en una doble pista con extensión de 275 metros.

Cabe señalar que ésta es la extensión máxima factible de esta vialidad debido a la presencia del trazado de la línea del Ferrocarril de Arica – La Paz (FCALP), ubicada muy próxima sobre el costado poniente de la calzada de Máximo Lira. El FCALP debe cumplir las obligaciones asumidas por el país en el Tratado de 1904 con Bolivia, por lo que, como mínimo, la vía férrea debe mantenerse operativa y no es factible intervenir su trazado.

El objetivo establecido por EPA para esta obra de infraestructura consiste en reordenar la operación de camiones en inmediaciones del acceso portuario, aminorando los conflictos causados por la fila de espera que forman en el acceso.

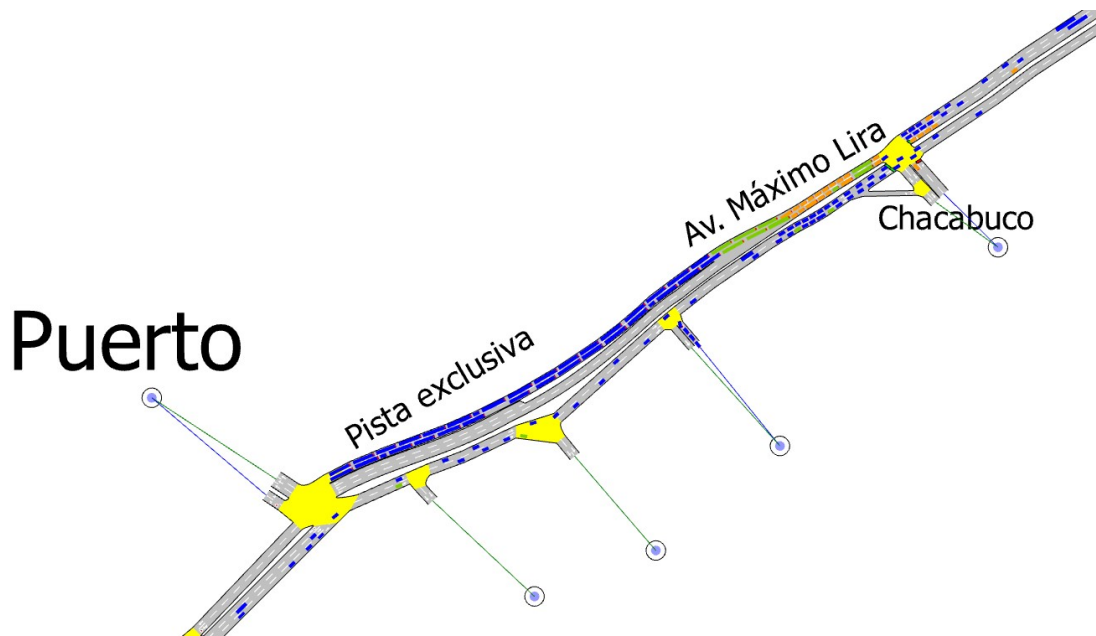
A continuación se muestra la red de simulación para esta alternativa:



**Figura 21. Red de simulación Alternativa 1**  
Fuente: Aimsun

Se simula el corte temporal 2020 en la situación con acceso exclusivo, resultando que la fila de camiones no es totalmente contenida dentro de la nueva vialidad, sino que persiste la afectación del tránsito debido a la formación de la fila. Esto significa que la nueva infraestructura provista no es suficiente para contener todos los camiones que arriban durante el periodo PM, reproduciendo el mismo problema de bloqueo sobre Máximo Lira que se pretende resolver.

A continuación se muestra una vista del instante en que la fila de camiones excede la capacidad del acceso exclusivo.



**Figura 22. Fila de camiones en Alternativa 1**  
Fuente: Aimsun

Se estima que la efectividad de esta solución propuesta por EPA es muy limitada, pues si bien aumenta la capacidad vial del sistema, no es capaz, por sí sola, de mejorar efectivamente los tiempos de viaje de los vehículos que transitan por la Av. Máximo Lira durante PM.

### **5.5 Alternativa 2: Operación de Antepuerto**

La Empresa Portuaria cuenta con un recinto de 21,4 hectáreas de superficie, ubicado a 11 kilómetros del Puerto en el Parque Industrial Puerta América. Este terreno colinda con la ruta 11-CH, que es el camino público que transitan normalmente los camiones bolivianos desde y hacia la frontera.

En dicho recinto se pondrá en marcha un Antepuerto de uso obligatorio que controlará la afluencia de camiones al Puerto, mediante la gestión de los periodos y volúmenes de entrada.

En esta situación la fila de camiones se reduciría a su mínima expresión, eliminando la afectación del tráfico urbano.

A continuación se muestra la localización del Antepuerto.



**Figura 23. Localización del Antepuerto**

Fuente: Subtrans (2015b)

La red de simulación considerada en esta alternativa es similar a la considerada en la Situación Base. Se simula el corte temporal 2020, coordinando el intervalo de despacho de camiones desde el Antepuerto con la tasa de atención de la garita de acceso.

Esta configuración tiene la característica de “aplanar” la demanda de tráfico de camiones hacia el Puerto, alcanzando a atender un máximo de 20 camiones. Los 52 camiones que no alcanzan a ser atendidos quedan acumulados en el Antepuerto.

### **5.6 Alternativa 3: Operación conjunta de acceso exclusivo y Antepuerto**

En tercer lugar se simula la operación conjunta del acceso exclusivo para camiones y del Antepuerto, que es el escenario propuesto efectivamente por el EPA (2013).

Para esto se unifican los intervalos de despacho de los camiones hacia puerto y las frecuencias de atención de la garita de acceso en el corte temporal 2020, adicionando un ramal de dos pistas de acceso exclusivo para camiones.

## 6. Resultados y conclusiones

El análisis del presente trabajo se centra en la afectación del tránsito urbano causada por la formación de una fila de camiones junto al acceso portuario de Arica, lo cual, según Subtrans (2015b), se percibe como como contrario al interés ciudadano.

Se analiza mediante simulación, la formación de la fila de camiones sobre el eje Máximo Lira, junto al acceso del Puerto de Arica. Se simula la operación de la garita de acceso al recinto portuario mediante una parada que fuerza a los camiones a esperar, reproduciendo los largos de fila estimados por el Puerto.

En la siguiente tabla se presentan los indicadores obtenidos para esta simulación:

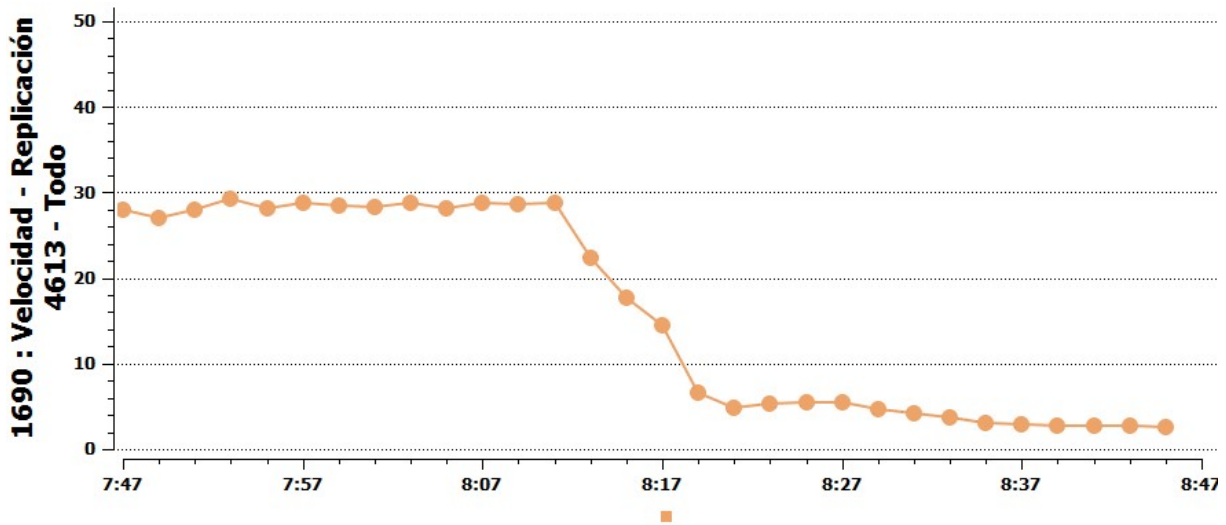
Tabla 17: Indicadores de Operación Situación Base

<b>Indicador</b>	<b>SB</b>
Velocidad Promedio [km/hr]	28,14
Cola Media – Automóviles [veh]	32,32
Tiempo Total de Viaje Promedio [h]	156,33
Tiempo Demora Promedio [seg/km]	36,02

Fuente: Aimsun

A continuación se muestra la evolución cronológica de la velocidad del tráfico urbano simulada específicamente sobre el eje Máximo Lira.





**Figura 24. Velocidad del tráfico urbano sobre Máximo Lira en SB**  
Fuente: Aimsun

Se observa que la velocidad de los vehículos que circulan por el eje Máximo Lira se ve afectada a partir del momento en que la fila de camiones comienza a bloquear la primera pista de la avenida.

A continuación se simula la provisión de nueva infraestructura de acceso portuario para camiones en el corte temporal 2020. En la siguiente tabla se muestran los principales indicadores de operación.

Tabla 18: Indicadores de Operación Alternativa 1

<b>Indicador</b>	<b>A1_2020</b>
Velocidad Promedio [km/hr]	29
Cola Media – Automóviles [veh]	35,33
Tiempo Total de Viaje Promedio [h]	128,32
Tiempo Demora Promedio [seg/km]	25,27

Fuente: Aimsun

A continuación se muestra la evolución cronológica de la velocidad del tráfico urbano simulada específicamente sobre el eje Máximo Lira.



**Figura 25. Velocidad del tráfico urbano sobre Máximo Lira en A1\_2020**

Fuente: Aimsun

Se observa que la efectividad de esta solución propuesta por el Puerto es muy limitada. Si bien se aumenta la oferta vial, a partir del año 2020 el acceso se verá sobrepasado por la afluencia de camiones en el periodo PM. Esto deja sin resolver el problema de afectación del tráfico urbano causado por la fila junto al acceso portuario durante la PM.

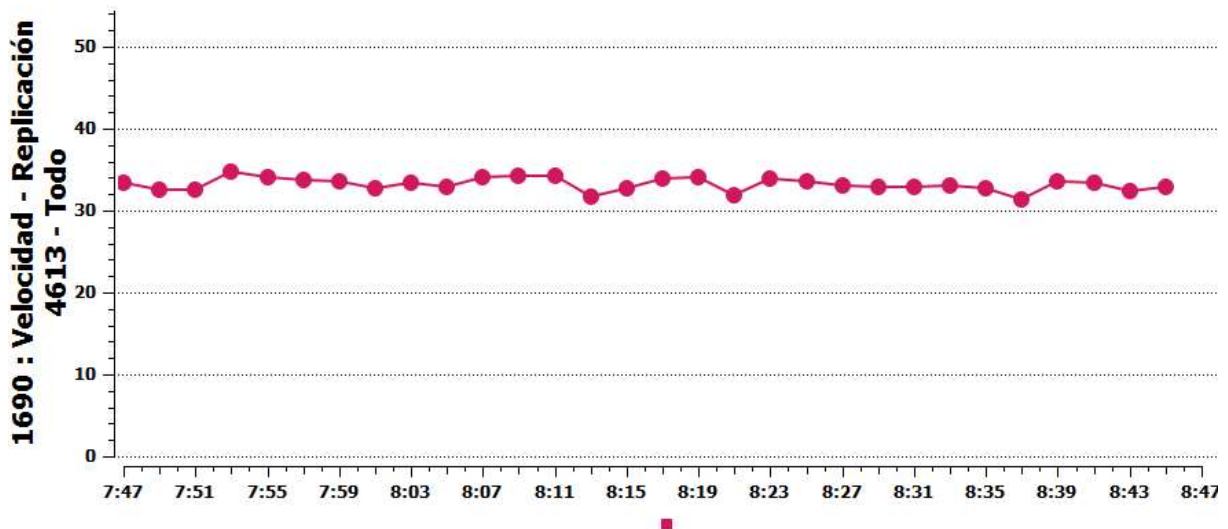
A continuación se analiza un aspecto operativo del Antepuerto mediante la simulación de una nueva estrategia de coordinación del acceso de camiones a puerto. Para esto se unifican los intervalos de despacho de los camiones hacia puerto y las frecuencias de atención de la garita de acceso en el corte temporal 2020. En la siguiente tabla se muestran los principales indicadores de operación.

Tabla 19: Indicadores de Operación Alternativa 2

<b>Indicador</b>	<b>A2_2020</b>
Velocidad Promedio [km/hr]	34,3
Cola Media – Automóviles [veh]	8,03
Tiempo Total de Viaje Promedio [h]	125,86
Tiempo Demora Promedio [seg/km]	22,76

Fuente: Aimsun

A continuación se muestra la evolución cronológica de la velocidad del tráfico urbano simulada específicamente sobre el eje Máximo Lira.



**Figura 26. Velocidad del tráfico urbano sobre Máximo Lira en A2\_2020**

Fuente: Aimsun

Se observa que el Antepuerto contribuirá efectivamente a minimizar la fila de camiones que se forma junto al recinto portuario, aumentando la velocidad promedio de los flujos que transitan sobre la avenida Máximo Lira.

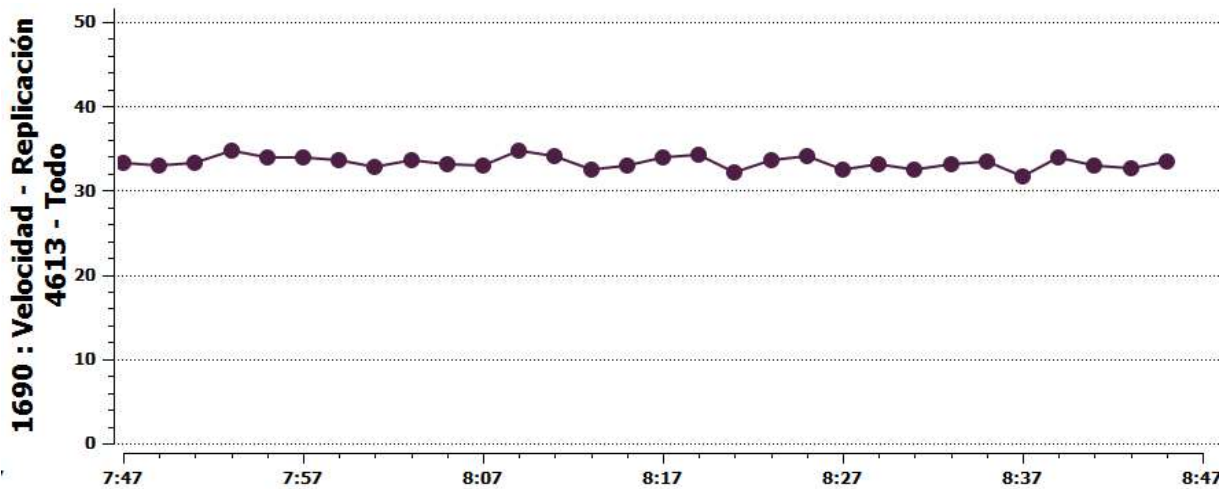
A continuación se analiza el escenario que es efectivamente el previsto por el Puerto (2013), consistente en la realización conjunta de las alternativas 1 y 2. Para esto se unifican los intervalos de despacho de los camiones hacia puerto y las frecuencias de atención de la garita de acceso en el corte temporal 2020, adicionando una doble pista de acceso exclusivo para camiones. En la siguiente tabla se muestran los principales indicadores de operación.

Tabla 20: Indicadores de Operación Alternativa 3

<b>Indicador</b>	<b>A3_2020</b>
Velocidad Promedio [km/hr]	34,31
Cola Media – Automóviles [veh]	6,01
Tiempo Total de Viaje Promedio [h]	124,1
Tiempo Demora Promedio [seg/km]	19,6

Fuente: Aimsun

A continuación se muestra la evolución cronológica de la velocidad del tráfico urbano simulada específicamente sobre el eje Máximo Lira.



**Figura 27. Velocidad del tráfico urbano sobre Máximo Lira nortesur en A3\_2020**

Fuente: Aimsun

Se observa que el éxito de la nueva infraestructura portuaria propuesta por EPA, al menos durante el horario PM, depende estrechamente de la implementación conjunta del Antepuerto.

Además de disminuir la fila de camiones junto al acceso, se espera que el efecto del Antepuerto lleve al mínimo el tiempo que los camiones deben permanecer en el espacio público dentro de la ciudad.

Si bien en la operación conjunta se observa una leve mejora respecto a los indicadores de la alternativa 2, resultan prácticamente idénticas las velocidades simuladas tanto en el eje de acceso como en el resto del eje Máximo Lira.

Un escenario contemplado por EPA (2013) en el que resulta clave contar con infraestructura redundante, consiste en el caso en que los transportistas bolivianos no aceptan la obligatoriedad de utilizar el Antepuerto.

Se pone en relieve la importancia de apoyar la toma de decisiones con el apoyo de herramientas de simulación, antes de implementar inversiones. En particular, se reconoce la conveniencia de complementar análisis a nivel táctico con el apoyo de herramientas de microsimulación.

## 7. Bibliografía

- Barceló J. (2010) Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation. En Barceló J. (Ed.) (2010) *Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 145*. Springer, Nueva York.
- Casas, J., Ferrer, J., Garcia, D., Perarnau, J. y Torday, A. (2010) Traffic Simulation with Aimsun. En Barceló J. (Ed.) (2010) *Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 145*. Springer, Nueva York, NY.
- DPTI (2013) *Aimsun Traffic Simulation Model Development Manual*. Adelaide, Australia: Department of Planning, Transport and Infrastructure, Government of South Australia.
- MOP (2012) Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Pasada Urbana Ruta 5 en Arica, Sector El Agro - Avda. Capitán Ávalos - Limite urbano Norte y Mejoramiento Pasada Urbana A-27, Sector Rotonda A. Arenas - Loteo Montalvo, Región de Arica y Parinacota. Arica, Chile: Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.
- MOP (2015) Preinversión, Mejoramiento, Accesibilidad y Conectividad al Puerto de Arica. Arica, Chile: Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.
- EPA (2013) *Iniciativas para la Contribución al Desarrollo Integral y a la Descongestión del Flujo de Camiones del Puerto de Arica*. Empresa Portuaria Arica, Sistema de Empresas SEP, Arica.
- EPA (2014) *Plan de Desarrollo Portuario Puerto Arica*. Empresa Portuaria Arica, Sistema de Empresas SEP, Arica.
- ITS (2012) *Simulation and Assignment of Traffic in Urban Road Networks Manual - Version 11*. Londres, Inglaterra: Universidad de Leeds.
- Ley N° 19.542 Moderniza el Sector Portuario Estatal. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 09 de diciembre de 1997. Recuperado de <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=82866>.

- Pinochet, T. (2012) Análisis de modelos de capacidad y demora en intersecciones prioritarias (Tesis). Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Sheffi, Y. y Powell. A. (1981) Comparison of Stochastic and Deterministic Traffic Assignment Over Congested Networks. *Transportation Research*, 15B(1):53-64.
- Subtrans (2011) Análisis de la Competitividad entre el Transporte Caminero y Ferroviario respecto del Acceso a Puertos. Santiago, Chile: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- Subtrans (2014) *Plan Nacional de Desarrollo Portuario*. Santiago, Chile: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- Subtrans (2015a) *Análisis comparativo de metodologías de modelación de nivel táctico*. Santiago, Chile: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- Subtrans (2015b) *Actualización Diagnóstico del STU de la Ciudad de Arica*. Santiago, Chile: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- Vormann, B. (2014) *Global Port Cities in North America: Urbanization Processes and Global Production Networks*. Nueva York, Routledge.