

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Patricio Álvarez M.MSc.PhD



## **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONGESTIÓN NO RECURRENTE EN REDES DE TRANSPORTE URBANO”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Civil

KATHERINNE ELIZABETH REYES LATORRE

Concepción, Junio del 2014

*A mi padre Roberto Gastón Reyes Fernández (Q.E.P.D) por todo el apoyo, esfuerzo y amor durante toda su vida para que sus hijos sean grandes personas y profesionales.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

Quiero agradecer a mis padres por el gran apoyo, confianza y esfuerzo durante estos 6 años de estudio para lograr este gran sueño en mi vida. A mis hermanos Roberto, Luis Javier por cariño y apoyo durante toda la carrera. Agradecer mi hermano Christian por ser mi gran ejemplo, ya que sin el yo quizás que hubiese estudiado, por todo su material de las asignatura que me guardo, su calculador, amistad, compañía y protección durante toda mi vida.

Agradecer a Carlos albornoz por su amor, confianza, compañía durante estos años juntos y paciencia durante este proyecto. A mis sobrinos Matias, Agustín, Emilia y Gabriela por ser la mejor distracción entre tanto trabajo.

Dar las gracias a mis compañeros y amigos Rodolfo Troncoso, Álvaro Olivares, Mariano Ortega, Valentina Sáez, Felipe Vallejos, Tamara Zúñiga, Constanza Tapia y Manuel Venegas que hicieron que esta etapa de mi vida fuera espectacular.

Además agradecer al Profesor Patricio Álvarez, por el tiempo, por la gran disposición que tuvo durante todo este proyecto, por todo lo que me enseñó sobre microsimulación y ingeniería de transporte.

Finalmente agradecer a todos los profesores y funcionarios del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental por haberme brindado todas las herramientas para ser una gran profesional.

## **NOMENCLATURA.**

HCM 2000: Highway Capacity Manual 2000.

PM: Punta mañana.

PT: Punta Tarde.

Sit Base: funcionamiento de la red sin incidentes de tránsito.

Berma 15 min: incidente en la berma durante 15 minutos.

Berma 30 min: incidente en la berma durante 30 minutos.

Berma 45 min: incidente en la berma durante 45 minutos.

1p + b 15 min: incidente en la berma más una pista durante 15 min.

1p + b 30 min: incidente en la berma más una pista durante 30 min.

1p + b 45 min: incidente en la berma más una pista durante 45 min.

2p + b 15 min: incidente en la berma más dos pista durante 15 min.

2p + b 30 min: incidente en la berma más dos pista durante 30 min.

2p + b 30 min: incidente en la berma más una pista durante 45 min.

T.V: Tiempo de viaje.

C.C: Consumo de combustible.

E.G: Emisiones de gases.

**INDICE GENERAL.**

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS. ....	iii
NOMENCLATURA. ....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS. ....	vii
ÍNDICE DE TABLAS. ....	viii
RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN. ....	4
1.1. Justificación del proyecto.....	6
1.2. Alcances del proyecto. ....	6
1.3. Objetivos del proyecto. ....	7
1.3.1. <i>Objetivo General.</i> .....	7
1.3.2. <i>Objetivos Específicos.</i> ....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Capacidad.....	8
2.2. Congestión vehicular.....	8
2.3. Incidentes de tránsito. ....	9
2.3.1. <i>Tipos de incidentes de tránsito.</i> .....	9
2.3.2. <i>Parámetros de los incidentes de tránsito.</i> .....	10
2.3.3. <i>Impacto asociado a los incidentes de tránsito.</i> ....	11
3. MODELOS DE SIMULACIÓN. ....	13
3.1. Clasificación de los modelos de simulación. ....	13
3.1.1. <i>Elección del microsimulador.</i> ....	15
3.2. Microsimulador AIMSUN. ....	15
3.2.1. <i>Resultados entregados por AIMSUN.</i> ....	15
3.2.2. <i>Modelación de incidentes en AIMSUN 8.0.</i> ....	17

4.	METODOLOGÍA.....	18
4.1.	Construcción del Modelo.....	18
4.2.	Determinación de las características del parque vehicular.....	18
4.3.	Capacidad y demandas.....	18
4.4.	Consumo de combustible y emisiones de gases.....	19
4.5.	Calibración del modelo sin incidentes de tránsito.....	19
4.6.	Calibración del modelo con incidentes de tránsito.....	20
4.6.1.	<i>Parámetros del incidente a modelar.....</i>	20
4.6.2.	<i>Calibración del modelo con incidente en la berma.....</i>	21
4.6.3.	<i>Calibración del modelo con incidente en una pista más berma.....</i>	22
4.6.4.	<i>Calibración del modelo con incidente en dos pistas más berma.....</i>	22
4.7.	Estrategias y eventos modelados.....	23
4.8.	Cálculo de costos debido a incidentes de tránsito.....	23
5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	25
5.1.	Estimación del costo del tiempo de viaje debido a incidentes.....	25
6.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	28
6.1.	Costos de incidente de tránsito durante PM para Concepción durante todo un año...	29
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31
	BIBLIOGRAFIA.....	33
	ANEXOS.....	35
	ANEXO A.....	35
	ANEXO B.....	43
	ANEXO C.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1 : Formato de salidas de AIMSUN 8.....	16
Figura 2 : Detectores antes del incidente y en el lugar del incidente .....	17
Figura 3 : Frecuencia de severidades y duraciones durante todo un año .....	21
Figura 4 : Procedimiento para el cálculo de costos debido a incidentes de tránsito.....	24
Figura 5 : Vías a evaluar y área según prefectura de carabinero de Concepción. ....	28

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 : Origen de la congestión no recurrente.....	9
Tabla 2 : Salidas globales de AIMSUN .....	16
Tabla 3 : Características del parque vehicular.....	18
Tabla 4: Parámetros del consumo de combustible .....	19
Tabla 5 : Valores calibrados para el Gran Concepción. ....	19
Tabla 6 : Capacidad disponible producto la presencia de un incidente de tránsito .....	20
Tabla 7 : Calibración de reducción de capacidad debido a incidentes .....	22
Tabla 8 : Tiempo de viaje (seg/km).....	25
Tabla 9 : Tiempo de viaje (\$/km) .....	25
Tabla 10 : Costos del tiempo de viaje para cada incidente de tránsito. ....	26
Tabla 11 : Costo de cada parámetro debido a incidentes de tránsito durante un año .....	27
Tabla 12 : Características de las a vías a evaluar .....	30
Tabla 13 : Costos de los incidentes para el Gran Concepción durante un año en PM .....	30

## **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONGESTIÓN NO RECURRENTE EN REDES DE TRANSPORTE URBANO**

**Katherine Reyes Latorre.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.  
kereyeslatorre@gmail.com

**Patricio Álvarez M.MSc.PhD.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.  
palvarez@ubiobio.cl

### **RESUMEN**

Producto de los incidentes de tránsito se reduce la capacidad lo que se traduce en un incremento de los tiempos de viaje, consumo de combustible, contaminación atmosférica y otros costos de operación.

La congestión no recurrente ocurre de manera irregular, como es el caso de un incidente de tránsito, faenas constructivas o climas adversos y no depende de la demanda. A diferencia de la congestión recurrente los procesos de generación, localización, frecuencia y duración no son del todo bien comprendidos y por ende no existen antecedentes suficientes que permitan estimar los costos de estas externalidades.

Por ello para evaluar los incidentes de tránsito se comparó el funcionamiento de un carril sin incidentes, con diferentes combinaciones de severidades y duraciones, los cuales producen diferentes reducciones de capacidad. Estos son propuestos por el HCM 2000. Para dichos incidentes de tránsito fue necesaria la calibración del modelo con y sin incidentes mediante distintas técnicas de simulación para lograr replicar las reducciones propuesta por la HCM 2000.

Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es proponer una metodología que permita evaluar los impactos de la congestión no recurrente, concluyendo que la congestión no recurrente

tiene un gran impacto sobre la capacidad y genera la gran necesidad de aplicar un plan de manejo de incidentes.

Palabras Claves: congestión, congestión no recurrente, incidentes de tránsito, simulación de tránsito.

Palabras =  $5499 + 250 * 18 = 9999$  Palabras.

## **EVALUATION OF THE IMPACT NO RECURRING CONGESTION IN URBAN TRANSPORT NETWORKS**

**Katherinne Reyes Latorre**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.  
[kereyeslatoore@gmail.com](mailto:kereyeslatoore@gmail.com)

**Patricio Álvarez M.MSc.PhD.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.  
palvarez@ubiobio.cl

### **ABSTRACT**

Revenue from traffic incidents capacity is reduced, resulting in increased travel times, fuel consumption, air pollution and other operating costs.

The non-recurring congestion occurs irregularly as in the case of a traffic incident, constructive tasks or adverse climates and does not depend on demand. Unlike recurrent congestion generation processes, location, frequency and duration are not entirely well understood and therefore there is not enough history to estimate the costs of these externalities.

Therefore to evaluate traffic incidents running a rail without incident with different combinations of severities and durations compare incidents, which produce different capacity reductions, which are proposed by the HCM 2000. Transit to such incidents was necessary model calibration with and without simulation through different techniques to achieve replicate incidents given by the HCM 2000 reductions.

Therefore the aim of this project is to propose a methodology to assess the impact of non-recurring congestion, concluding that the non-recurring congestion has a major impact on the capacity and generates the great need for an incident management plan.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La congestión de tránsito ha ido en aumento en gran parte del mundo y todo indica que seguirá agravándose, constituyendo un peligro cierto que se cierne sobre la calidad de vida urbana. La situación se ve agravada por problemas de diseño y conservación de la vialidad de las ciudades, el explosivo aumento del parque de automóviles y el indiscriminado deseo de usar los automóviles por razones de comodidad o estatus, generando gran presión sobre la capacidad de las vías públicas existentes.

Los efectos perjudiciales de la congestión recaen directamente sobre los usuarios del sistema de transporte (peatón, automóviles, transportista de carga, operadores y pasajeros del transporte público). Estos últimos, generalmente son personas de ingresos menores, que no solo se ven retrasados en sus viajes, sino que a causa de la congestión se incrementan los costos del transporte.

La congestión recurrente se refiere a una situación donde la demanda por usar cierta infraestructura de transporte excede la capacidad de la misma. En general este tipo de congestión tiende a concentrarse en periodos cortos de tiempo, por lo tanto es un fenómeno repetitivo y predecible, por ende este tipo de congestión ha sido bien estudiada al igual que su costo. Se ha estimado que este tipo de congestión recurrente corresponde a un 40%-50% (Álvarez y Vargas, 2013) de la congestión que afecta al sistema de transporte en países desarrollados y comúnmente es analizada por medio de procesos de planificación con metodologías probadas y bien conocidas en el ámbito nacional.

Por otro lado la congestión no recurrente se refiere a un tipo de congestión que ocurre de manera irregular, generalmente asociada a eventos que reducen la capacidad del sistema de transporte y que eventualmente suceden independientemente del aumento de la demanda. Este tipo de congestión es el resultado de accidentes de tránsito, malas prácticas de conducción (estacionar doble fila, etc.), vehículos en “panne”, actividades de mantención del sistema de transporte (bacheos, mantención de semáforos, etc.), faenas constructivas, actividad policial, climas adversos, en general cualquier actividad que afecte la normalidad

del sistema de transporte. En países desarrollados se dice que la congestión no recurrente corresponde a un 60% (Álvarez y Vargas, 2013) de la congestión y esta cifra podría aumentar con los años.

Las causas mencionadas anteriormente se denominan incidentes de tránsito se pueden agrupar en 3 categorías principalmente: faenas constructivas que representa entre el 15%-25% de la congestión, incidentes de tránsito que representa el 25% y finalmente climas adversos que son un 10% (Álvarez y Vargas, 2013) de la congestión que afecta a los sistemas de transporte.

Estimar los costos de este tipo de congestión se hace complejo al no existir antecedentes suficientes sobre los procesos de generación, localización, frecuencia y duración ya que son variables poco estudiadas. Por ello una forma de disminuir los costo y los efectos de la congestión no recurrente es utilizando planes de manejo de incidentes tales que el costo de esta implementación sea inferior a los ahorros obtenidos productos de la operación de dichos planes. Dichos planes de manejo (técnicas, equipos y experiencia) ya han sido probados a nivel mundial y están disponibles en la literatura, sin embargo, la problemática de la congestión no recurrente no ha sido estudiada en Chile.

De acuerdo a esto, el objetivo de este proyecto de título es proponer una metodología que permita evaluar impactos de la congestión no recurrente en redes de transporte urbano, considerando para ellos diferentes tipos de incidentes de tránsito, considerando las características propias de la infraestructura del transporte local, así como también las características de generación, localización, frecuencia y duración de los incidentes observados. Para ello se considera el uso de técnicas de simulación de tráfico

### **1.1. Justificación del proyecto.**

Al existir poca información en Chile sobre el impacto de la congestión no recurrente es necesario evaluar el impacto sobre la capacidad de una vía a partir de técnicas de simulación. Además al conocer los costos de producto a los incidentes de tránsito podría ayudar a justificar el uso de un plan de control de incidentes que reduzca el impacto de los incidentes.

### **1.2. Alcances del proyecto.**

El flujo utilizado para evaluar los efectos de los incidentes de tránsito corresponde solo a vehículos livianos, el flujo estudiado será ininterrumpido y para el proceso de calibración se utilizarán como base investigaciones anteriores para la ciudad de Concepción.

### **1.3. Objetivos del proyecto.**

#### *1.3.1. Objetivo General.*

Evaluar los efectos de la variabilidad de la capacidad producto de la ocurrencia de incidentes de tránsito.

#### *1.3.2. Objetivos Específicos.*

- Identificar los parámetros para caracterizar los incidentes de tránsito.
- Verificar la aplicabilidad de diferentes modelos de simulación para modelar incidentes de tránsito.
- Seleccionar un modelo de simulación que permita evaluar los efectos de la variabilidad de la capacidad producto de la ocurrencia de incidentes de tránsito.
- Aplicar técnicas de simulación para estudiar la variabilidad del tiempo de viaje, emisiones de gases, consumo de combustible, etc. para un corredor teórico.
- Proponer una metodología para evaluar los costos de la congestión no recurrente.

## **2. MARCO TEÓRICO.**

El presente capítulo tiene la finalidad de entregar información relevante sobre los conceptos de capacidad, incidentes de tránsito y parámetros para caracterizar incidentes.

### **2.1. Capacidad.**

La definición de capacidad más empleada en la actualidad, pertenece al “Manual de Capacidad para Carreteras HCM-2000”, (Transportation Research Board, 2000, p. 5-2) es la siguiente:

“Capacidad es el máximo número de peatones o vehículos que de manera razonable se pueda esperar pasen por un punto o tramo uniforme de una pista o calzada durante un período de tiempo dado, en condiciones imperantes o prevalecientes de vía, tránsito y control”.

La capacidad se puede referir no solamente a vehículos, sino también a peatones. No es un valor instantáneo e inesperado, sino es el volumen máximo promedio esperado durante un período de tiempo que es generalmente de 15 minutos.

### **2.2. Congestión vehicular.**

Existen dos tipos de congestión vehicular, las cuales dependen del evento al cual está sometida la infraestructura vial. Estos dos tipos de congestión son: congestión recurrente y congestión no recurrente.

La congestión recurrente se produce cuando la capacidad de una vía se ve sobrepasada por la demanda en periodos cortos del día, siendo un suceso predecible y repetitivo. Mientras que la congestión no recurrente ocurre de manera irregular como es el caso de faenas constructivas, climas adversos y accidentes de tránsito, los cuales son denominados incidentes de tránsito.

### 2.3. Incidentes de tránsito.

La reducción de la capacidad debido a incidentes de tránsito depende de la cantidad de pistas bloqueadas en el lugar del incidente y el comportamiento de los conductores en el lugar del accidente, ya que los conductores en el lugar del incidente están más atento a los cambios de velocidad, conducen a distancias menores, además está presente el siguiente factor:

- Rubberneck: Representa la reducción de la capacidad debido a la reducción de la velocidad de los vehículos en el punto del incidente que se encuentran en carriles distintos de los bloqueados, estos pueden ser en la misma dirección o incluso en dirección opuesta.

#### 2.3.1. Tipos de incidentes de tránsito.

Los distintos tipos de incidentes afectan de diferente manera a la reducción de la capacidad, estos tipos de incidentes se definan a continuación:

Origen de la congestión no recurrente	Descripción
<b>Faenas constructivas</b>	Las reducciones de capacidad debido a actividades de construcción pueden dividirse en zonas de trabajo de corto plazo (mantención de semáforos, limpieza de sumideros, mantención de demarcaciones, etc.) y de largo plazo de construcción (construcción de pistas exclusivas, reparación de pavimentos, etc).
<b>Accidentes de tránsito</b>	El efecto sobre la capacidad depende de la proporción de calzada bloqueada y la cantidad de pista que tiene la calzada, Además la reducción de la capacidad es mayor a la porción de calzada bloqueada por el efecto de rubberneck.
<b>Climas adversos</b>	a) Lluvia: Reduce la capacidad cuando su duración es extendida y se acumula agua considerable en el pavimento. b) Nieve: fuertes intensidades de nieve afectan la capacidad de la vía c) Niebla: reduce la velocidad de flujo libre entre 5 a 6 km/hr.

**Tabla 1 : Origen de la congestión no recurrente  
(Fuente: HCM 2000)**

### 2.3.2. *Parámetros de los incidentes de tránsito.*

Un incidente de tránsito sin importar su origen se caracteriza por tres parámetros.

a) Frecuencia: Este parámetro se refiere a la posibilidad de que ocurra un incidente de tránsito o no. Los estudios realizados han centrado su atención en identificar las causas basales o factores determinantes de la frecuencia de incidentes a partir de diferentes niveles de severidad, tales como daños a la propiedad, heridos y fatalidades o considerando diferentes clasificaciones del lugar de los incidentes como por ejemplo que ocurra en una intersección o a mitad de cuadra. Existen varios estudios sobre este parámetro pero todos del extranjero como es el caso de Hamerslag, et.al (1982) que estudio la relación funcional entre el número esperado de incidentes, las características de la infraestructura y el volumen del tráfico. En otro trabajo, okomoto y koshi (1989) relacionaron por medio de regresiones lineales las tasas de ocurrencia de incidentes y las características geométricas de la infraestructura, Hadi et.al (1995) empleo un análisis de regresión binomial negativa para estimar los efectos de los elementos de la sección transversal de la infraestructura en la tasa de accidentes. Así como karlaftis and tarko (1998), lee y manning (1999) y teng y Qi (2002) estudiaron la frecuencia de incidentes.

b) Duración: Este parámetro se define como el periodo de tiempo que transcurre entre el momento exacto que ocurre el incidente hasta que se desbloquea la pista. La duración de un incidente se compone de 3 etapas claramente diferenciables: detección, respuesta, despeje de las vías. Golob, et al. (1987). Estudio la duración de incidentes que involucran la presencia de camiones, en su estudio consideró la hipótesis que la extensión de cada fase era función o estaba influenciada por la etapa anterior, en el estudio se concluyó que la distribución de la duración total de un incidente se puede modelar como una distribución lognormal, que con el paso de los años distintos autores reafirmaron esta conclusión. Ozbay y kachroo (1999) proporcionaron antecedentes para modelar el tiempo requerido para despejar un incidente utilizando regresiones lineales. De la misma forma garib, et al (1998) también considero regresiones lineales para predecir la duración de incidentes de tránsito.

c) Severidad: La severidad de los incidentes de tránsito se refiere a la proporción de la calzada transitada que está bloqueado por los vehículos detenidos. HCM 2000 hizo un estudio sobre la reducción de la capacidad dependiendo de la cantidad de carriles totales y la cantidad de pistas bloqueadas, llegando a la conclusión que la disminución de la capacidad es mayor a la capacidad entregada por aquella pista bloqueada debido al factor de rubberneck. Qin y Smith (2001) estimó los porcentajes de reducción en la capacidad con un solo carril y dos bloqueos de carril de un total de tres carriles a 63% y 77%, respectivamente.

### *2.3.3. Impacto asociado a los incidentes de tránsito.*

Los incidentes de tránsito pueden introducir cambio en dos aspectos de la operación del sistema de transporte. Por un lado pueden cambiar las características físicas del sistema de transporte mientras al mismo tiempo pueden cambiar algunos aspectos del comportamiento de los usuarios del sistema. Las características físicas se refieren a la reducción de la capacidad del sistema, esto es producto al bloqueo temporal de pistas u otras acciones propias del manejo del incidente (vehículos de emergencia, grúas, etc.). Por otro lado el cambio del comportamiento del conductor se puede ver afectado por las características microscópicas del conductor (tácticas y operacionales). En este sentido, se han observado cambios en la propensión a cambiarse de pista (lane-changing), cambios en la distancia que los conductores están dispuestos a mantener entre vehículo (car-following), cambio en la velocidad y el intervalo de tiempo que los conductores aceptan como seguro para maniobrar por mencionar las más importantes. Adicionalmente los incidentes de tránsito pueden modificar algunas decisiones de carácter estratégico, por ejemplo, elección del modo de transporte y eventualmente la decisión si viajar o no.

Hay un número limitado de estudios que han investigado el impacto de los incidentes de tráfico. Estos estudios se centraron principalmente en los impactos sobre las medidas de tráfico macroscópicas tales como la reducción de la capacidad y no en parámetros de tráfico microscópicos tales como lane-changing y el parámetros car-following. La razón es que los impactos sobre las medidas macroscópicas se pueden evaluar más fácilmente utilizando las

tecnologías actuales de recolección de datos. En el anexo B se incluye la revisión de los estudios disponibles sobre el tema.

### **3. MODELOS DE SIMULACIÓN.**

Los adelantos en la tecnología han permitido el desarrollo de simuladores de tránsito que poseen la capacidad de representar de forma aproximada la realidad.

Las técnicas de simulaciones entregan una serie de ventajas, entre las cuales se puede destacar, tiempos bajísimos en el análisis del sistema, es decir, simular en segundos o minutos el comportamiento de horas, días o meses. También se puede destacar la posibilidad de visualizar detalladamente comportamientos de los o la reacción del sistema ante cambios en la red. En síntesis una de las mayores virtudes de los modelos de simulación es lograr entregar información detallada frente a los posibles cambios del sistema.

#### **3.1. Clasificación de los modelos de simulación.**

Dentro de la ingeniería en general, se han generado una gran cantidad de herramientas computacionales para el análisis de diversos problemas y datos. Para la ingeniería de transporte existen distintos tipos de clasificación para los modelos de simulación que dependiendo de las características de los modelos que son consideradas como relevantes para realizar la clasificación.

Considerando el tiempo como variable relevante, surge la siguiente clasificación de modelos de simulación:

1. Continuo: Describe cómo los elementos de un sistema cambian de estado continuamente en el tiempo como respuesta a estímulos continuos.
2. Discreto: Realiza los cambios de estado en forma abrupta en ciertos momentos. Hay dos tipos de modelos discretos, que son aplicables según las características que quieren ser representadas: tiempo y evento.

2.1. Tiempo: El tiempo está dividido en segmentos por medio de intervalos conocidos, en cada uno de ellos el modelo registra actividades que cambian de estado.

2.2. Evento: Los cambios se realizan en forma abrupta, produciéndose eventos y actualizándose la información cada vez que uno de ellos sucede.

Una distinta clasificación surge al considerar el nivel de detalle:

➤ Macroscópico: Esta basado en relaciones determinista de flujo, velocidad y densidad del flujo de tráfico. Ejemplos de modelos macroscópicos son ESTRAUS, SATURN.

➤ Mesoscópico: Combinan las propiedades de los modelos de simulación, tanto microscópicos y macroscópicos, como en los modelos microscópicos, los vehículos modelados individualmente, sin embargo, los movimientos de los vehículos se modelan mediante la utilización de modelos macroscópicos. Ejemplos de modelo mesoscópico es TRANSYT.

➤ Microscópico: Simulan el movimiento de vehículos de forma individual basado en los modelos de lane-changing y car-following. Ejemplos de modelos microscópicos son PARAMICS, AIMSUN NG, NETSIM, SIGSIM, CORSIM o TSIS.

Si bien para este proyecto es conveniente utilizar tanto modelos mesoscópico como microscópicos para modelar el tramo teórico, se presentan las siguientes razones para elegir un modelo microscópico:

➤ El objetivo principal de los programas microscópicos es simular diferentes situaciones y permiten modelar correctamente las reducciones en la capacidad de las carreteras que se deben a incidentes.

➤ Tienen un enfoque más detallado, flexible y más preciso para evaluar los impactos de los incidentes.

Dada estas razones se propone utilizar un modelo microscópico para modelar un corredor teórico en condición de incidentes de tránsito, considerando además que estos modelos entregan resultados muy eficientes en término de costos, además son flexibles al momento de analizar diseños o alternativas de gestión. La revisión de los microsimuladores se encuentra en el ANEXO C.

### *3.1.1. Elección del microsimulador.*

A partir de un estudio realizado por HADI (2007), donde investigo la capacidad de 3 microsimuladores (VisSim, Corsim, AIMSUN) concluyó que estos tres programas permiten al usuario simular bloqueos de pistas debido a incidentes ya sea de forma explícita o mediante el uso de otros eventos que tiene efectos similares en las operaciones, además de existir varias investigaciones sobre calibración del microsimulador AIMSUN para el Gran Concepción. Se selecciono el microsimulador AIMSUN ya que está basado en una serie de modelos conocidos dentro del ambiente académico de la Ingeniería de Transporte, conociéndose así el funcionamiento y el fundamento del comportamiento de cada uno de los vehículos simulados. Es una herramienta utilizada en varios proyecto de la secretaria de transporte (SECTRA), además que la universidad del BÍO-BÍO posee la licencia de este programa.

## **3.2. Microsimulador AIMSUN.**

La descripción, modelos utilizados y parámetros de entrada de AIMSUN se encuentran en el ANEXO C.

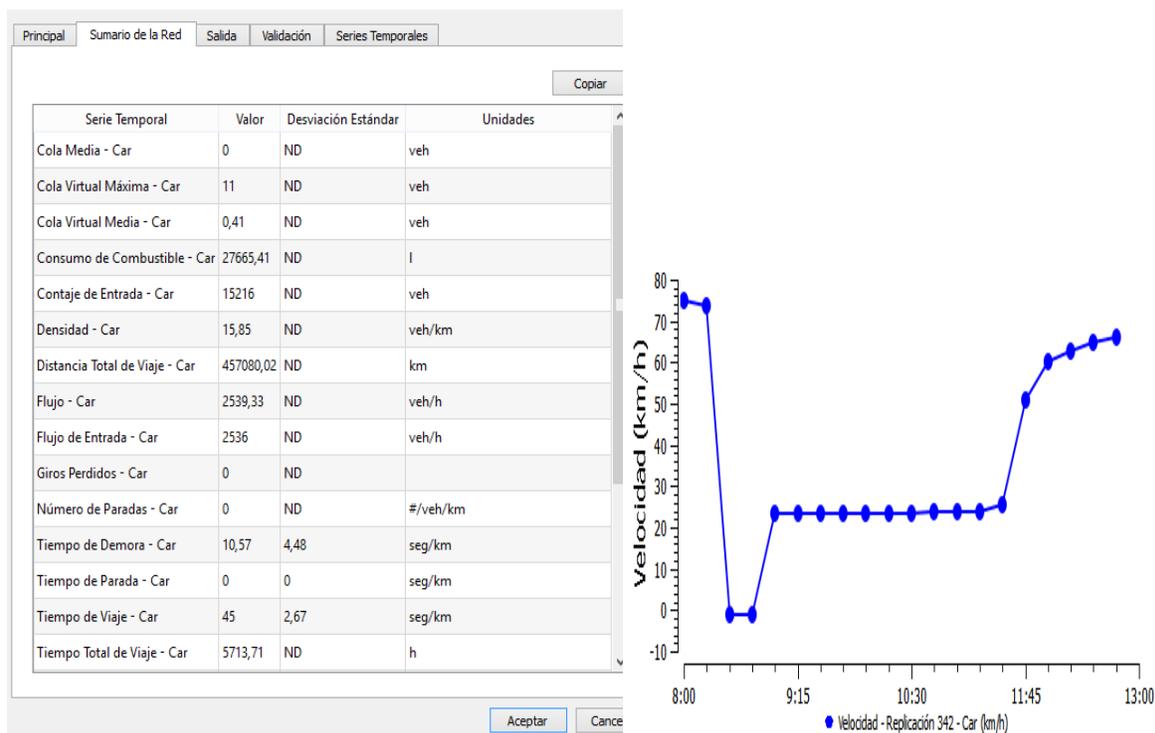
### *3.2.1. Resultados entregados por AIMSUN.*

El software brinda un conjunto de salidas numéricas y gráficas tras la ejecución de la simulación. AIMSUN puede entregar resultados en los diferentes niveles de segregación definidas por el usuario (toda la red, por sección, giro o conjuntos de secciones), además de la información basada en rutas de origen-destino e información de las líneas de transporte

público. La definición de todas las salidas globales se encuentran en el ANEXO C, a continuación se definen las más relevantes.

Parámetro	Definición
<b>Flujo</b>	Número promedio de vehículos por hora que han pasado por la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al salir de la red a través de una sección de salida.
<b>Velocidad</b>	La velocidad promedio para todos los vehículos que han abandonado el sistema. Esto se calcula con la velocidad comercial media de cada vehículo.
<b>Tiempo de viaje</b>	Tiempo promedio necesario para que un vehículo se desplace en un kilómetro dentro de la red. Esta es la media de todos los tiempos individuales de viaje (tiempo de salida - hora de entrada) para todos los vehículos que ha cruzado la red, convertida en el tiempo por kilómetro.
<b>Consumo de combustible</b>	Litros totales de combustible consumido por todos los vehículos que se han cruzado en la red.
<b>Emisión de contaminantes</b>	Para cada contaminante, kilogramos totales de la contaminación emitida por los vehículos que se han cruzado en la red.

**Tabla 2 : Salidas globales de AIMSUN**  
(Fuente: Elaboración propia)



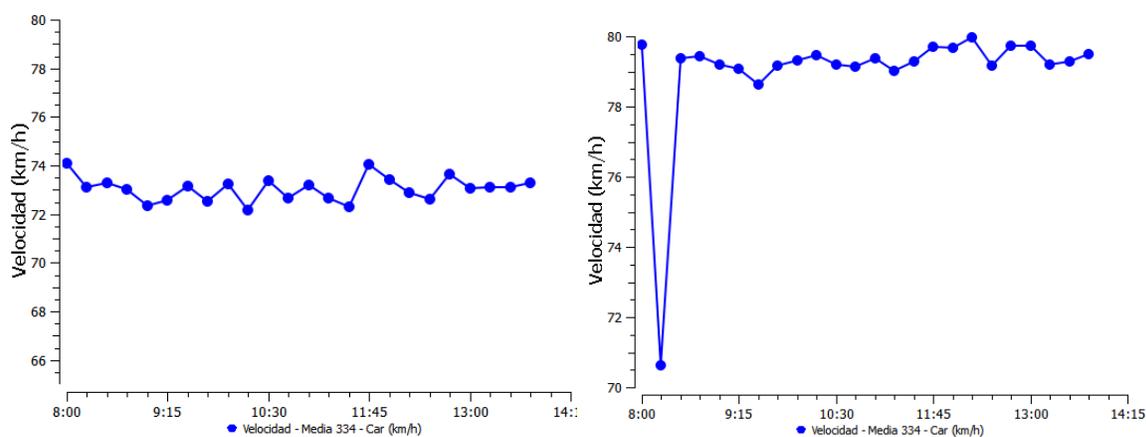
**Figura 1 : Formato de salidas de AIMSUN 8**  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.2. Modelación de incidentes en AIMSUN 8.0.

AIMSUN permite activar distintas políticas en un tramo de la red durante un periodo de tiempo. Estas políticas son: cierre de carril, cambio velocidad, incidente en sección, forzar giro, entre otras, y estas pueden ser activadas al mismo tiempo. Para insertar incidentes se deben seguir los siguientes pasos.

- I. Crear una política en gestión de tráfico, la cual requiere el tiempo de inicio de esta política y su duración.
- II. Ingresar un incidente en la sección dentro de esta política, se requiere la cantidad de pistas bloqueada, distancia de visibilidad, longitud y ubicación del incidente de tránsito.
- III. En algunos casos es necesario ingresar además un cambio de velocidad en el lugar del incidente para disminuir la capacidad en el lugar de incidente, los parámetros que requiere son nueva velocidad y los carriles a los cuales se le realizará este cambio de velocidad.
- IV. Una vez creadas estas políticas, se deben activar donde se realizan las simulaciones.

Ahora para detectar los cambios de capacidad debidos a incidentes se disponen dispositivos antes y después del incidente. La figura muestra dos detectores uno antes del incidente y otro en el lugar del incidente y se puede ver el cambio de velocidad producido por la presencia de un incidente de 15 min de duración que bloquea 1 pista.



**Figura 2 : Detectores antes del incidente y en el lugar del incidente**

(Fuente: Elaboración propia)

## 4. METODOLOGÍA.

Esta etapa se construye el modelo del microsimulador y se calibra para su funcionamiento sin presencia de incidentes y con incidentes de tránsito.

### 4.1. Construcción del Modelo.

El carril teórico contará con un largo de 30 km para que el largo de la cola, en el caso más desfavorable simulado, quede dentro del modelo. Contará con dos pistas de 3,5 metros de ancho, velocidad máxima de circulación de 90 km/h y flujo ininterrumpido.

### 4.2. Determinación de las características del parque vehicular.

Otro de los parámetros importantes del proceso de simulación, corresponde a la caracterización del parque vehicular presente en el carril teórico. Se optó por utilizar los datos de González (2005), ya que el calibre AIMSUN para flujo ininterrumpido en la ciudad de Concepción.

Parámetro	valor	desviación	Min	Max
Longitud (m)	4.32	0.30	3.73	4.98
Ancho (m)	2.00	0.00	2.00	2.00
Máx. Aceleración (m/s <sup>2</sup> )	2.72	0.34	2.13	3.61
Normal deceleración (m/s <sup>2</sup> )	4.00	0.00	4.00	4.00
Máx. Deceleración (m/s <sup>2</sup> )	8.00	0.00	8.00	8.00

**Tabla 3 : Características del parque vehicular  
(Fuente: González R., 2005)**

### 4.3. Capacidad y demandas.

Para el carril teórico se trabajará con una capacidad de 1700 veh/pista ya que es una capacidad promedio observada en el Gran Concepción, además para poder simular incidentes de tránsito durante diferentes horas de funcionamiento (PM, PT, etc.). Todos los eventos se estudiaron para diferentes grados de saturación, estos son 75%, 83%, 90%, 100% y 110%, siendo la demanda para 100% de 3400 veh/hr.

#### 4.4. Consumo de combustible y emisiones de gases.

Para obtener las tasas de consumo son necesario 6 parámetros los cuales son mostrados en la Tabla 4, (el significado de cada abreviación se encuentra en el anexo C, en atributos del vehículo, consumo de combustible). Para obtener las tasas de emisiones de gases se selecciono el modelo Panis con sus parámetros por defecto.

Ratio de consumo	Valor
<b>Fi ( reposo)</b>	0,300 (ml/s)
<b>F1 ( a 90 km/hr)</b>	5,1 (L/100km)
<b>F2 ( a 120 km/hr)</b>	7,0 (L/100km)
<b>C1 ( acelerando)</b>	0,900 (ml/s)
<b>Fd ( desacelerando)</b>	0,280 (ml/km)
<b>Vm</b>	64,000 (km/hr)

**Tabla 4: Parámetros del consumo de combustible**  
(Fuente: Mespivu)

#### 4.5. Calibración del modelo sin incidentes de tránsito.

Mediante la calibración del modelo se busca replicar la situación existente en el Gran Concepción. Por ello se decidió utilizar los parámetros propuestos por González (2005), y que se detallan en la tabla 5.

Parámetro	valor	desviación	Min	Max
<b>Límite de velocidad pista derecha</b>	80			
<b>% adelantamiento</b>	0,99			
<b>% recuperación</b>	0,99			
<b>aceptación de velocidad</b>	1,1	0,2	0,85	1,5
<b>Máxima velocidad deseada</b>	100	20	85	150
<b>Aceleración máxima</b>	2,72	0,34	2,13	3,61
<b>Largo del Vehículo</b>	4,32	0,3	3,73	4,98

**Tabla 5 : Valores calibrados para el Gran Concepción.**  
(Fuente: González R., 2005)

Además se debió calibrar la capacidad máxima por pista ya que González utilizó una capacidad aprox. de 1950 veh/hr. Para ello se ingresó una demanda de 5000 veh/hr para

medir la cantidad máxima de vehículo que pasan. Luego de un proceso iterativo del tiempo de reacción, se llegó a un tiempo de 1,21 seg para llegar a 1700 veh/pista.

#### 4.6. Calibración del modelo con incidentes de tránsito.

Las reducciones de capacidad debido incidentes de tránsito serán las propuesta en el HCM 2000. La Tabla 6 muestra la capacidad disponible a partir de un incidente de tránsito según pista disponibles y pistas bloqueadas.

Number of freeway lanes by direction	Shoulder disablement	Shoulder accident	One lane Blocked	Two lane blocked	Three lanes blocked
2	0.95	0.81	0.35	0.00	N/A
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00
4	0.99	0.85	0.58	0.25	0.13
5	0.99	0.87	0.65	0.40	0.20
6	0.99	0.89	0.71	0.50	0.26
7	0.99	0.91	0.75	0.57	0.36
8	0.99	0.93	0.78	0.63	0.41

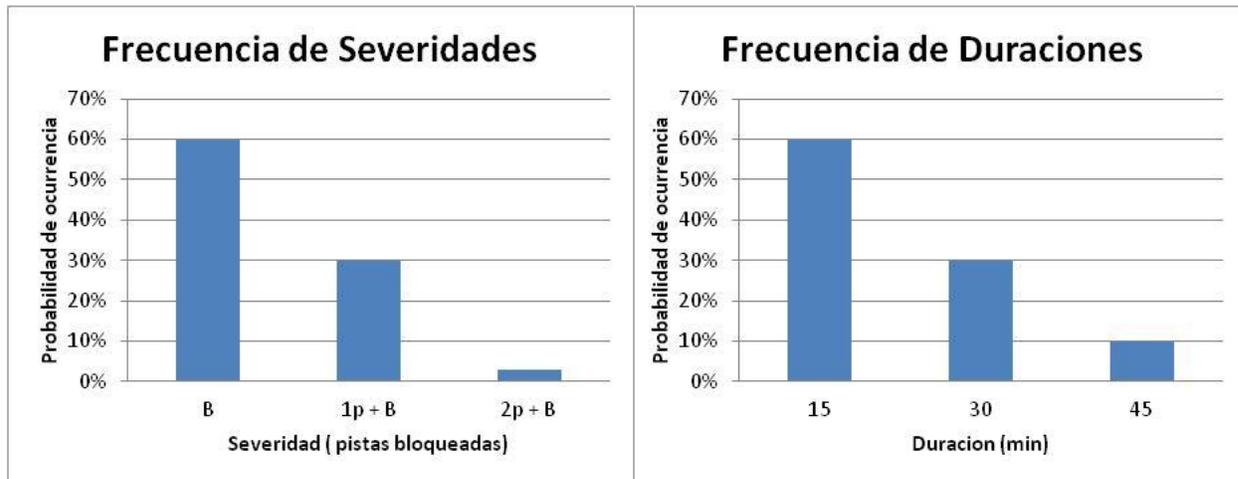
**Tabla 6 : Capacidad disponible producto la presencia de un incidente de tránsito (Fuente: HCM 2000)**

AIMSUN permite al analista introducir incidentes con diversas características de bloqueo de pista. Sin embargo, la capacidad de simular en condiciones de incidentes tiene que ser calibrada. De acuerdo al siguiente procedimiento es posible simular incidentes con las reducciones de capacidad propuesta en el HCM 2000.

##### 4.6.1. Parámetros del incidente a modelar.

Antes de calibrar el modelo se debe tener en cuenta las características del incidente a modelar. El incidente contará con un largo de 15 metros, con una distancia de visibilidad del incidente de 200 metros y su ubicación será de 200 metros antes de que termine el carril de prueba. Además se proponen las siguientes severidades, duraciones y frecuencias para evaluar incidentes.

- ✓ Severidad: Berma bloqueada, 1 pista bloqueada y dos pistas bloqueadas.
- ✓ Duración: 15 min, 30 min y 45 min.
- ✓ Frecuencias: Al no poder ser un parámetro simulado, se considerara una probabilidad de ocurrencia estimada de cada severidad y duración.



**Figura 3 : Frecuencia de severidades y duraciones durante todo un año**

**(Fuente: Elaboración propia)**

Estas probabilidades de ocurrencia se propusieron ya que en Chile no se cuenta con información de incidentes de tránsito. Estas se seleccionaron según el impacto que tenían sobre una calzada, ya que es más recurrente que durante todo un año se produzcan mayor cantidad de incidentes en la berma a que se bloqueen dos pista. El mismo criterio se utilizó para las duraciones ya que es poco probable que ocurra un incidente por un tiempo mayor. Estos parámetros son un dato muy conservador y educado según la literatura extranjera.

#### 4.6.2. Calibración del modelo con incidente en la berma.

AIMSUN permite bloquear desde una pista, debido a esto se debió buscar una forma de replicar la reducción propuesta en el HCM 2000. Por ello se decidió introducir un incidente que bloquee una pista que por defecto disminuye la capacidad al 50% por un tiempo menor que haga que el promedio de la reducción de la capacidad durante los 15, 30 y 45 min sea

del 19 %. Luego de un proceso iterativo, los tiempos para reducir la capacidad a 19% son ilustrados en la Tabla 7

4.6.3. *Calibración del modelo con incidente en una pista más berma.*

La reducción de la capacidad al ingresar un incidente en una pista en AIMSUN es de un 50% (porción de calzada bloqueada) y no considera el efecto de rubberneck (reducción de la velocidad en las pistas no bloqueadas), por ello se modificará la velocidad en el incidente para lograr la reducción propuesta por la HCM 2000. Luego de un proceso iterativo, las velocidades en el lugar del incidente para reducir la capacidad a 35 % son ilustrados en la Tabla 7.

	<b>Berma bloqueada</b>	<b>Una pista bloqueada</b>
<b>Duración</b>	tiempo de bloqueo de una pista	Velocidad en el incidente
<b>15 min.</b>	6 min 35 seg	32 km/hr
<b>30 min.</b>	13 min 30 seg	31 km/hr
<b>45 min.</b>	20 min	31 km/hr

**Tabla 7 : Calibración de reducción de capacidad debido a incidentes (Fuente: Elaboración propia).**

4.6.4. *Calibración del modelo con incidente en dos pistas más berma.*

Para un incidente que bloquee las dos pistas no es necesario realizar dicha calibración, ya que al ingresar el incidente la capacidad remanente es 0% por la duración del incidente.

#### **4.7. Estrategias y eventos modelados.**

Ya con el modelo calibrado, se efectuaron diferentes experimentos que nos permitirán analizar la variabilidad de la capacidad a partir de diferentes tipos de incidentes. La duración de todas las simulaciones será de 6 horas, ya que en ese tiempo para el caso más desfavorable se disipan completamente los efectos del incidente. Todos los casos se hacen para los 5 grados de saturación, a saber:

- Caso 1: Sin incidentes de tránsito
- Caso 2: Incidente en berma con una duración de 15, 30 y 45 min.
- Caso 3: Incidente en 1 pista más berma con una duración de 15, 30 y 45 min.
- Caso 4: Incidente en 2 pista más berma con una duración de 15, 30 y 45 min.

Cada simulación se realizará con 10 semillas diferentes.

#### **4.8. Cálculo de costos debido a incidentes de tránsito.**

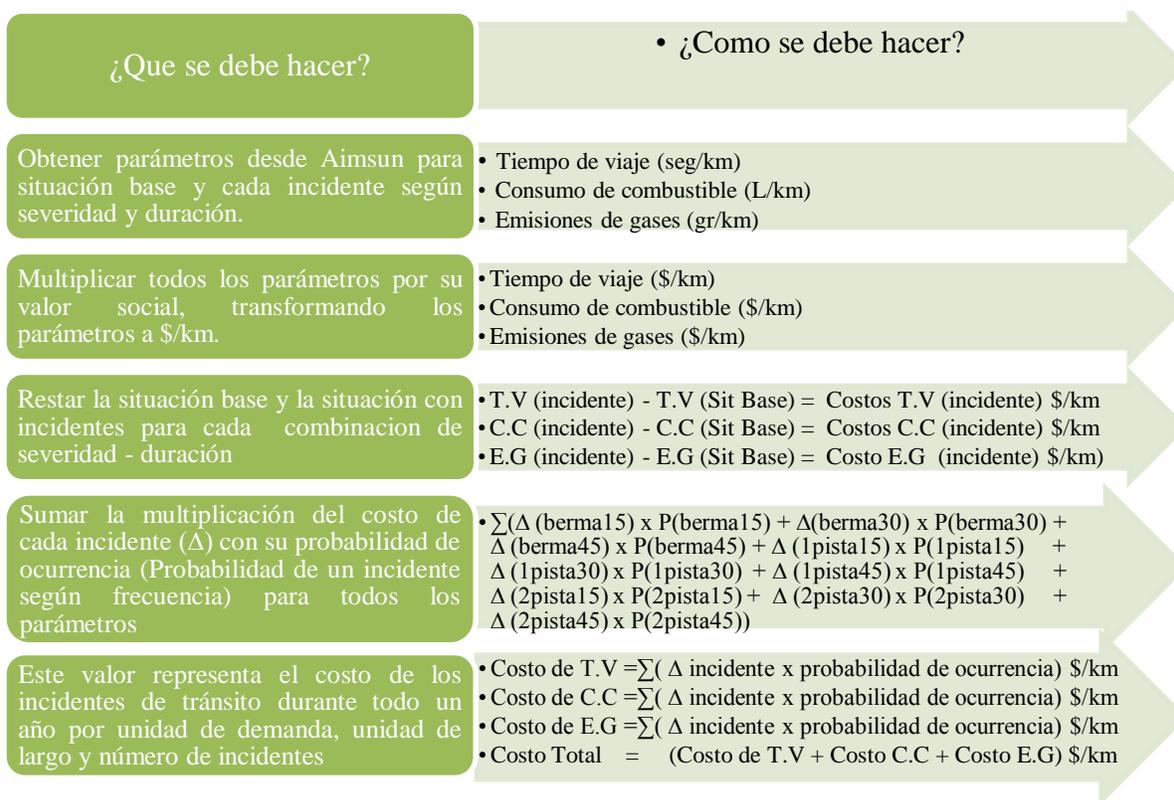
Los parámetros que se consideraron para cuantificar los costos de incidentes son tiempo de viaje, consumo de combustible y emisiones de gases. Los valores sociales son los utilizados por Mespivu y son los siguientes:

- Tiempo de viaje: 1.416 \$/hora
- Consumo de combustible: 851 \$/litro.
- Emisiones de CO<sub>2</sub>: 0.00879 \$/gramo emitido.
- Emisiones de NO<sub>x</sub>: 0.586 \$/gramo emitido.
- Emisiones de VOC: 0.1275 \$/gramo emitido.
- Emisiones de PM: 0.00879 \$/gramo emitido.

Para lograr cuantificar los costos de incidentes de tránsito se realizaron todas las estrategias antes mencionadas en AIMSUN la cual se guardo en una base de datos de cada incidente y grado de saturación. Todos estos parámetros se debieron transformar a \$/km, ya que

AIMSUN entrega el valor en seg, litro y gramos, esto se hace multiplicando cada parámetro por su valor social, logrando así dejar todos los parámetros en \$/km.

Para estimar los efectos de los incidentes se debe restar los costos de la situación base y la situación con incidentes para cada combinación de severidad y duración. Finalmente se multiplican los costos de cada incidente por su probabilidad de ocurrencia (se obtiene de las frecuencia propuesta para cada incidente), este último valor representa el costo de los incidente de tránsito durante todo un año por unidad de demanda, unidad de largo y número de incidentes totales. Este procedimiento se debe hacer para el tiempo de viaje, consumo de combustible y emisiones de gases para los 5 grados de saturación. El costo total será la sumatoria de todos los parámetros. En la figura 4 se encuentra un resumen del procedimiento.



**Figura 4 : Procedimiento para el cálculo de costos debido a incidentes de tránsito (Fuente: Elaboración propia)**

## 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

En este capítulo se ilustra la metodología para el parámetro tiempo de viaje. Los resultados para los otros parámetros se encuentran en el Anexo A ya que su procedimiento es similar.

### 5.1. Estimación del costo del tiempo de viaje debido a incidentes.

La Tabla 8 muestra los seg que se demoran en recorren un km un vehículo para la situación sin incidente y las distintas combinaciones de severidad-duraciones para los distintos grado de saturación.

V/C	Sit. Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	46,2	46,3	46,5	46,8	53,5	55,5	55,6	56,1	64,4	81,3
83%	47,2	47,3	47,7	48,5	59,5	63,1	64,2	64,9	78,6	104,4
90%	48,0	48,3	48,7	49,7	82,7	82,7	82,8	85,9	118,3	148,3
100%	53,2	54,7	60,0	67,2	124,2	124,5	124,6	120,2	135,9	160,3
110%	58,1	58,9	64,4	78,7	126,0	132,5	135,9	137,4	157,1	179,9

**Tabla 8 : Tiempo de viaje (seg/km)**  
(Fuente: elaboración propia)

Se debe generar la tabla 9 ya que AIMSUN no entrega los resultados en pesos, por ello se multiplico los parámetros de la Tabla 8 por su valor social en este caso todos los resultados se multiplicaron por 0,39 \$/seg (tiempo de viaje según Mespivu).

V/C	Sit. Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	18,2	18,2	18,3	18,4	21,0	21,8	21,9	22,1	25,3	32,0
83%	18,6	18,6	18,8	19,1	23,4	24,8	25,2	25,5	30,9	41,1
90%	18,9	19,0	19,2	19,5	32,5	32,5	32,6	33,8	46,5	58,3
100%	20,9	21,5	23,6	26,4	48,8	49,0	49,0	47,3	53,5	63,1
110%	22,8	23,2	25,3	30,9	49,6	52,1	53,5	54,0	61,8	70,8

**Tabla 9 : Tiempo de viaje (\$/km)**  
(Fuente: elaboración propia)

Para estimar los efectos de los incidentes se debe restar los costos de la situación base y la situación con incidente para cada combinación de severidad-duración para el mismo grado de saturación.

Es decir, para obtener el costo del parámetros T.V para un incidente en la berma de 15 min para un v/c= 75%, se debe restar el costo del parámetro T.V para un incidente en la berma durante 15 min y la situación sin incidente para el mismo grado de saturación, lo que da como resultado 0.03 \$/km

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,03	0,10	0,22	2,86	3,63	3,67	3,88	7,15	13,80
83%	0,05	0,20	0,52	4,83	6,25	6,68	6,96	12,36	22,51
90%	0,10	0,28	0,66	13,65	13,66	13,67	14,90	27,64	39,46
100%	0,61	2,68	5,53	27,93	28,07	28,08	26,38	32,56	42,16
110%	0,33	2,51	8,10	26,74	29,28	30,63	31,19	38,97	47,93

**Tabla 10 : Costos del tiempo de viaje para cada incidente de tránsito.**

**(Fuente: Elaboración propia)**

Conocidos los costos o delta de cada incidente de tránsito, se procede a calcular los costos para todo un año para cada grado de saturación, esto es la sumatoria de la multiplicación del costo de cada incidente de tránsito por su probabilidad de ocurrencia. Los resultados para todos los parámetros se muestran en la Tabla 11 y el procedimiento para los otros parámetros se encuentra en el anexo A. Para ejemplificar de mejor manera, se muestra como se obtuvo el tiempo de viaje para un v/c de 75% (las probabilidades de ocurrencia son según las frecuencia de cada evento para un año de funcionamiento).

$$\text{Costo T.V} = 0.03 \times 0.36 + 0.1 \times 0.18 + 0.22 \times 0.06 + 2.86 \times 0.18 + 3.63 \times 0.09 + 3.67 \times 0.03 + 3.88 \times 0.06 + 7.15 \times 0.03 + 13.8 \times 0.01 = 1.58 \text{ \$/km}$$

v/c	Tiempo de viaje (\$/km)	Consumo combustible (\$/km)	Emisiones de CO2 (\$/km)	Emisiones de Nox (\$/km)	Emisiones de PM (\$/km)	Emisiones de VOC (\$/km)	Costo total Incidentes
<b>75%</b>	\$1,58	\$17,8	\$0,1	\$0,02	\$0,0001	\$0,001	\$19,46
<b>83%</b>	\$2,73	\$25,6	\$0,1	\$0,02	\$0,0002	\$0,002	\$28,51
<b>90%</b>	\$6,34	\$47,0	\$0,2	\$0,02	\$0,0003	\$0,003	\$53,54
<b>100%</b>	\$12,41	\$56,4	\$0,2	\$0,03	\$0,0004	\$0,004	\$69,04
<b>110%</b>	\$12,94	\$59,0	\$0,2	\$0,04	\$0,0005	\$0,004	\$72,18

**Tabla 11 : Costo de cada parámetro debido a incidentes de tránsito durante un año  
(Fuente: Elaboración propia)**

## 6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

En este capítulo se aplicará la metodología a un caso de estudio en el Gran Concepción durante la punta mañana. Se seleccionaron 5 carriles que se asemejaran al carril teórico por ello se seleccionó la red estructural de Concepción que mayormente tuviera flujo ininterrumpido. La figura 5 muestra los carriles seleccionados y el área de la prefectura de Concepción.

A las vías seleccionadas se le calculará cuanto es el costo que se produjeran incidentes de tránsito durante todo un año de funcionamiento para la punta mañana. Para realizar este cálculo son necesarios los siguientes datos:

- Grado de saturación: Para conocer seleccionar el costo de cada parámetro, ya que cambia según el grado de saturación.
- Largo de la vía: Para conocer el costo en toda la vía, ya que los parámetros están en \$/km. Estos largo fueron obtenidos del programa google earth
- Demanda: Para conocer el costo para todos los vehículos dentro de la red ya que los parámetros están para un vehículo según el grado de saturación
- N° de incidentes: Todos los parámetros están para un incidente al año, por ello es necesario ingresar la cantidad total de incidentes en cada vía.



**Figura 5 : Vías a evaluar y área según prefectura de carabinero de Concepción.**  
(Fuente: Elaboración propia)

Al poseer poca información sobre el número de incidentes de tránsito, utilizaremos como base los accidentes reportados en la prefectura de Carabineros de Concepción. Como se sabe que no todos los incidentes son reportados, asumiremos que estos representan el 40% (incidentes en 1 y 2 pistas) de los incidentes totales para Concepción, por lo tanto los incidentes totales para el gran Concepción se estiman en 5475 durante todo un año. Estos al dividirlos por la cantidad total de km que cubre la prefectura de Concepción (146 km) obtendremos los incidentes por km, obteniéndose 38 incidentes durante todo un año por km. Pero como evaluaremos PM estos 38 incidentes los dividiremos por 24 y obtendremos 1,57 incidentes al año por hora. Ahora como la PM dura dos hora el resultado final serán 3 incidentes por hora por kilometro durante un año. Finalmente para estimar la cantidad de incidentes para las vías seleccionadas la multiplicaremos por su largo.

Ya conocidos la cantidad de incidentes para cada vía, es necesario conocer el grado de saturación con que se trabaja durante la PM. Por ello mediante visitas a terreno se concluyo que el tramo de lomas coloradas a la entrada de puente Llacolén está saturada por lo que se dijo que trabajaba a un  $v/c=1$ , el tramo del puente Llacolén mediante mediciones de flujo se obtuvo que es  $v/c=0,9$ . Para los demás tramos se decidió utilizar un  $v/c=0,75$  para obtener un valor como base de los costos, sin decir que puede ser mayores.

Las demandas de cada vía serán las relacionadas con el grado de saturación que trabaja la vía, ya que no se cuenta con mediciones actuales de flujo.

### **6.1. Costos de incidente de tránsito durante PM para Concepción durante todo un año.**

Ya recolectados todos los datos necesarios para conocer los costos durante la PM para Concepción. Esto es multiplicando el costos de cada parámetros según el grado de saturación con que trabaja la vía por su largo (parámetros están en \$/km), por la demanda (parámetro están para un vehículo) y por el número de incidentes totales para la vía (parámetros están obtenidos para un incidente al año). En la Tabla 12 se muestra un resumen de cada vía.

Ruta	Lomas coloradas Pte. Llacolén	Autopista Thno Pte. Juan Pablo II	Autopista Thno Gral. Bonilla	Penco Gral. Bonilla	Chiguayante Costanera
Largo	8,7	9,52	7,84	10,4	10,7
V/C	1	0,75	0,75	0,75	0,75
N° incidentes	27	30	25	33	34
demanda	3400	2550	2550	2550	2550
Largo	2,157				
V/C	0,90				
N° incidentes	7				
demanda	3060				

**Tabla 12 : Características de las a vías a evaluar  
(Fuente: Elaboración propia)**

Para mostrar mejor la metodología obtendremos el valor tiempo de viaje para el tramo Chiguayante- costanera, esto es:

$$T.V = \Delta tv \text{ (según v/c) } \times \text{largo} \times \text{n}^\circ \text{ de incidentes} \times \text{demanda}$$

$$= 1.58 \text{ \$/km} \times 10.7 \text{ km} \times 34 \times 2550 \text{ veh}$$

Costo del tiempo de viaje para la punta mañana en el tramo de Chiguayante- Costanera es \$1.449.431

Ruta	Tiempo de viaje (\$/km)	Consumo de combustible (\$/km)	Emisión de CO2 (\$/km)	Emisión de NOx (\$/km)	Emisión de PM (\$/km)	Emisión de VOC (\$/km)	Total
Lomas coloradas Pte. Llacolén	\$10.416.665	\$48.107.398	\$203.382	\$29.049	\$374	\$3.118	\$58.759.986
Autopista Thno-Pte. Juan Pablo II	\$592.412	\$6.660.551	\$32.949	\$6.142	\$50	\$320	\$7.292.424
Autopista Thno- Gral. Bonilla	\$402.200	\$4.521.974	\$22.370	\$4.170	\$34	\$217	\$4.950.964
Penco Gral. Bonilla	\$1.369.294	\$15.395.116	\$76.158	\$14.196	\$116	\$739	\$16.855.619
Chiguayante Costanera	\$1.449.431	\$16.296.106	\$80.615	\$15.027	\$123	\$783	\$17.842.084

**Tabla 13 : Costos de los incidentes para el Gran Concepción durante un año en PM  
(Fuente: Elaboración propia)**

Los costos estimados durante un año debido a incidentes de tránsito en el Gran Concepción es \$ 105.701.078. Durante la punta mañana. En el Anexo A se encuentra la evaluación de un plan de manejo de incidentes.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Los efectos de la variabilidad de la capacidad debido a incidentes de tránsito tienen un alto impacto en los costos de operación. Estos costos se incrementan ya que al generar colas y demoras que no estaban consideradas en su funcionamiento habitual provocan un incremento en el consumo de combustible, emisiones de gases y tiempo de viaje, los cuales mediante buen plan de manejo de incidentes podrían reducir los costos a la mitad, logrando beneficios el primer año.

Sin importar la procedencia del incidente, los parámetros para definir un incidente de tránsito son frecuencia, duración y severidad. Además a medida que aumenta la severidad de los incidentes y el grado de saturación con que trabaja la red, el impacto de los incidentes de tránsito es considerablemente mayor.

Los microsimuladores permiten simular diferentes situaciones y permiten modelar correctamente las reducciones en la capacidad de las carreteras que se deben a incidentes. Se demostró que el programa AIMSUN es capaz de replicar las reducciones propuesta por la HCM 2000 en el lugar del incidente, mediante un proceso de calibración.

Los valores por defecto de AIMSUN no se ajustan a la realidad chilena, por ello se utilizan los parámetros calibrados por González (2005) para flujo ininterrumpido. Además para calibrar la capacidad de una vía el parámetro que se debe modificar es el tiempo de reacción.

Se estimó con la metodología propuesta para evaluar incidentes de tránsito que la variable más relevante es el consumo de combustible, ya que representa el 90% de los costos totales debido a incidentes. Además los costos de los incidentes de tránsito para la red estructurante del Gran Concepción durante la PM ascienden a \$ 105.701.078.

Se recomienda realizar este proyecto con una base de datos y así sensibilizar aún más los resultados. Además para conocer los costos de incidentes de tránsito en otras situaciones, es

necesario utilizar un tramo de estudio ahora con 3 pistas e incorporando otros tipos de vehículo para ver que tanto afectan estos cambio en los costos de los incidentes. Por último se recomienda realizar esta metodología para una vía con datos de demanda, grado de saturación y número de incidentes medidos en terreno para distintas horas del día.

**BIBLIOGRAFIA.**

- Transportation Research Board. Highway Capacity Manual (HCM 2000). Transportation Research Board. Washington, DC, 2000.
- Hadi, M, Sinha, P. and Wang, A. Modeling Reductions in Freeway Capacity due to Incidents in Microscopic Simulation Models. Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Record 1999, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007, pp. 62-68.
- Alvarez, P., Hadi, M., Zhan, C., Using Intelligent Transportation Systems Data Archives for Traffic Simulation Applications, Journal of the Transportation Research Board (in press), Washington, DC, 2010.
- Alvarez, P., Vargas, S. Metodología para la evaluación del costo de la congestión no recurrente en sistemas de transporte urbano. Departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad del Bío-Bío. 2013.
- Aimsun 8 user's manual. TSS- Transport Simulation System, 2013.
- González, R. (2005). Calibración del microsimulador Aimsun para flujo ininterrumpido en la ciudad de Concepción. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Aldana, C (2009). Implementación de un modelo de microsimulación para la red centro de la ciudad de Concepción. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Bizama, J (2012). Modelación y Simulación mediante un microsimulador de la zona de influencia del Puente Llacolén. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Pavez, C (2007). Estimación de costos operacionales producto de eventos de falla en una red de semáforos: aplicación caso la Serena y Coquimbo. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Comisión de transporte urbano (1998). Manual de diseño y evaluación social de proyecto de vialidad urbana. Comisión de transporte urbano. Chile, pp.349.
- Qi, L., and B. Smith. Characterization of Accident Capacity Reduction. Research Report No. UVACTS-15-0-48, Center for Transportation Studies, University of Virginia, Charlottesville, September 2001.

- Goolsby, M.E. Influence of Incidents on Freeway Quality of Service. Proceedings of the 50th TRB Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1971.
- Knoop, V.L., Hoogendoorn, S.P., Adams, K. Capacity Reductions at Incidents Sites on Motorways. European Journal of Transport and Infrastructure Research., Volume 9 Issue 4, Delft, the Netherlands, 2009, pp. 363-379
- Luk, J. and Yang, C., Comparing Driver Information Systems in a Dynamic modeling Framework. Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, Issue 1, Jan/Feb 2003 p.p. 42-50.
- Cragg, C. and Demetsky, M., Simulation Analysis of Route Diversion Strategies for Freeway Incident Management. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, 1995.
- LACALLE M., 2003. Calibración del Microsimulador Aimsun para flujo ininterrumpido en la ciudad de Santiago. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. 130p.

## ANEXOS

### ANEXO A

En este anexo se ilustra la metodología para todos los parámetros evaluados en este proyecto

#### a. Estimación del costo de todos los parámetros debido incidentes de tránsito

En las siguientes tablas se muestra los seg que se demoran en recorren un km para el caso del tiempo de viaje, los litros consumidos en un km y los gramos de gases emitidos por km por un vehículo para la situación sin incidente y las distintas combinaciones de severidad-duraciones para los distintos grado de saturación

V/C	Sit. Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	46,2	46,3	46,5	46,8	53,5	55,5	55,6	56,1	64,4	81,3
83%	47,2	47,3	47,7	48,5	59,5	63,1	64,2	64,9	78,6	104,4
90%	48,0	48,3	48,7	49,7	82,7	82,7	82,8	85,9	118,3	148,3
100%	53,2	54,7	60,0	67,2	124,2	124,5	124,6	120,2	135,9	160,3
110%	58,1	58,9	64,4	78,7	126,0	132,5	135,9	137,4	157,1	179,9

**Tiempo de viaje (seg/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/c	Sit. Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,054	0,055	0,057	0,057	0,070	0,074	0,075	0,198	0,202	0,229
83%	0,055	0,056	0,060	0,061	0,084	0,098	0,102	0,222	0,237	0,289
90%	0,055	0,056	0,060	0,063	0,150	0,154	0,154	0,296	0,303	0,315
100%	0,059	0,062	0,096	0,127	0,153	0,157	0,157	0,312	0,320	0,344
110%	0,061	0,062	0,111	0,135	0,153	0,158	0,158	0,324	0,336	0,360

**Consumo de combustible (litros/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	167,6	167,7	167,8	168,1	170,1	170,8	171,0	257,3	257,4	268,0
83%	169,7	169,9	178,2	178,7	178,6	184,6	185,4	265,7	267,3	285,2
90%	174,3	174,6	179,2	179,2	193,7	193,7	193,7	299,7	304,7	312,4
100%	175,3	177,0	182,2	188,4	212,0	211,9	211,9	304,9	314,6	343,0
110%	175,3	177,1	183,7	188,7	213,6	212,7	212,7	301,4	314,6	348,6

**Emisiones de CO2 (gr/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9
83%	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9
90%	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9
100%	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0
110%	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1

**Emisiones de NOx (gr/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,005	0,005	0,005	0,006	0,020	0,023	0,023	0,106	0,109	0,123
83%	0,005	0,005	0,006	0,007	0,031	0,040	0,042	0,124	0,134	0,160
90%	0,005	0,005	0,007	0,008	0,075	0,075	0,075	0,177	0,194	0,198
100%	0,005	0,009	0,026	0,040	0,082	0,082	0,082	0,195	0,200	0,214
110%	0,005	0,010	0,033	0,041	0,084	0,084	0,084	0,204	0,211	0,229

**Emisiones de PM (gr/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,14
83%	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,12	0,12	0,11	0,13	0,17
90%	0,09	0,09	0,09	0,09	0,14	0,14	0,14	0,15	0,17	0,20
100%	0,09	0,09	0,10	0,11	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18	0,22
110%	0,09	0,09	0,10	0,11	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18	0,22

**Emisiones de VOC (gr/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

Se deben generar las siguientes tablas ya que AIMSUN no entrega los resultados en pesos, por ello se multiplico los parámetros de las tablas anteriores por su valor social. A modo de ejemplo para el tiempo de viaje todos los resultados se multiplicaron por 0,39 \$/seg (tiempo de viaje según Mespivu).

V/C	Sit. Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	18,2	18,2	18,3	18,4	21,0	21,8	21,9	22,1	25,3	32,0
83%	18,6	18,6	18,8	19,1	23,4	24,8	25,2	25,5	30,9	41,1
90%	18,9	19,0	19,2	19,5	32,5	32,5	32,6	33,8	46,5	58,3
100%	20,9	21,5	23,6	26,4	48,8	49,0	49,0	47,3	53,5	63,1
110%	22,8	23,2	25,3	30,9	49,6	52,1	53,5	54,0	61,8	70,8

**Tiempo de viaje (\$/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/c	Sit. Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	46,3	47,1	48,3	48,9	59,4	62,8	63,7	168,3	172,0	194,8
83%	46,5	47,4	50,6	52,0	71,6	83,8	86,6	188,9	201,4	246,3
90%	46,8	47,9	50,8	54,0	127,7	130,8	130,8	251,8	257,8	267,7
100%	50,2	52,4	81,9	108,3	130,0	133,3	133,3	265,5	272,3	292,5
110%	51,8	52,9	94,4	115,1	130,5	134,2	134,3	276,0	286,0	306,1

**Consumo de combustible (\$/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	1,47	1,47	1,48	1,48	1,49	1,50	1,50	2,26	2,26	2,36
83%	1,49	1,49	1,57	1,57	1,57	1,62	1,63	2,34	2,35	2,51
90%	1,53	1,53	1,57	1,57	1,70	1,70	1,70	2,63	2,68	2,75
100%	1,54	1,56	1,60	1,66	1,86	1,86	1,86	2,68	2,77	3,02
110%	1,54	1,56	1,61	1,66	1,88	1,87	1,87	2,65	2,77	3,06

**Emissiones de CO2 (\$/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
83%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
90%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
100%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6
110%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6

**Emisiones de NOx (\$/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,00004	0,00005	0,00005	0,00005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0009	0,001	0,0011
83%	0,00004	0,00005	0,00005	0,00006	0,0003	0,0004	0,0004	0,0011	0,0012	0,0014
90%	0,00004	0,00005	0,00006	0,00007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0016	0,0017	0,0017
100%	0,00004	0,00008	0,00023	0,0004	0,0007	0,0007	0,0007	0,0017	0,0018	0,0019
110%	0,00004	0,00009	0,00029	0,0004	0,0007	0,0007	0,0007	0,0018	0,0019	0,002

**Emisiones de PM (\$/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/C	Sit Base	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
83%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02
90%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
100%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
110%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03

**Emisiones de VOC (\$/km)**  
(Fuente: Elaboración propia)

Para estimar los efectos de los incidentes se debe restar los costos de la situación base y la situación con incidente para cada combinación de severidad-duración para los distintos grados de saturación

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,03	0,10	0,22	2,86	3,63	3,67	3,88	7,15	13,80
83%	0,05	0,20	0,52	4,83	6,25	6,68	6,96	12,36	22,51
90%	0,10	0,28	0,66	13,65	13,66	13,67	14,90	27,64	39,46
100%	0,61	2,68	5,53	27,93	28,07	28,08	26,38	32,56	42,16
110%	0,33	2,51	8,10	26,74	29,28	30,63	31,19	38,97	47,93

**Costos del tiempo de viaje para cada incidente de tránsito**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,80	2,04	2,65	13,14	16,52	17,41	122,05	125,78	148,48
83%	0,87	4,11	5,50	25,06	37,22	40,07	142,38	154,82	199,79
90%	1,07	4,00	7,15	80,83	83,96	83,99	204,99	211,02	220,89
100%	2,21	31,74	58,17	79,83	83,12	83,16	215,39	222,17	242,35
110%	1,08	42,58	63,30	78,78	82,44	82,48	224,24	234,18	254,31

**Costos del consumo de combustible para cada incidente de tránsito.**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,001	0,002	0,004	0,022	0,028	0,030	0,789	0,789	0,883
83%	0,001	0,074	0,079	0,078	0,131	0,137	0,843	0,857	1,015
90%	0,003	0,043	0,043	0,170	0,170	0,170	1,102	1,146	1,214
100%	0,015	0,061	0,115	0,322	0,322	0,322	1,139	1,224	1,474
110%	0,016	0,073	0,117	0,337	0,329	0,329	1,109	1,225	1,523

**Costos de la emisión de CO2 para cada incidente de tránsito.**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,14	0,14	0,15
83%	0,00	0,02	0,02	0,00	0,03	0,03	0,12	0,13	0,14
90%	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,12	0,12	0,14
100%	0,00	0,01	0,01	0,06	0,06	0,06	0,13	0,15	0,21
110%	0,00	0,01	0,02	0,06	0,06	0,07	0,14	0,16	0,23

**Costos de la emisión de NOx para cada incidente de tránsito.**  
(Fuente: Elaboración propia)

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,00000	0,00000	0,00001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0009	0,0009	0,001
83%	0,00000	0,00001	0,00002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0011	0,0011	0,0014
90%	0,00001	0,00002	0,00003	0,0006	0,0006	0,0006	0,0015	0,0017	0,0017
100%	0,00004	0,00019	0,00031	0,0007	0,0007	0,0007	0,0017	0,0017	0,0018
110%	0,00004	0,00024	0,00032	0,0007	0,0007	0,0007	0,0018	0,0018	0,002

**Costos de las emisiones de PM para cada incidente de tránsito.  
(Fuente: Elaboración propia)**

V/c	Berma 15 min	Berma 30 min	Berma 45 min	B + 1p 15 min	B + 1p 30 min	B + 1p 45 min	B + 2p 15 min	B + 2p 30 min	B + 2p 45 min
75%	0,0000	0,0001	0,0001	0,0016	0,0020	0,0020	0,0020	0,0037	0,0071
83%	0,0000	0,0006	0,0008	0,0024	0,0040	0,0042	0,0033	0,0060	0,0110
90%	0,0001	0,0003	0,0005	0,0064	0,0064	0,0064	0,0076	0,0106	0,0143
100%	0,0003	0,0012	0,0023	0,0075	0,0076	0,0075	0,0076	0,0110	0,0159
110%	0,0003	0,0013	0,0023	0,0077	0,0078	0,0078	0,0077	0,0110	0,0167

**Costos de las emisiones de VOC para cada incidente de tránsito.  
(Fuente: Elaboración propia)**

Conocidos todos los costos o delta de cada incidente de tránsito, se procede a calcular los costos para todo un año para cada grado de saturación, esto se la sumatoria de la multiplicación del costo de cada incidente de tránsito por su probabilidad de ocurrencia. Para ejemplificar de mejor manera, se muestra como se obtuvo el tiempo de viaje para un v/c de 75% (las probabilidades de ocurrencia son según las frecuencia de cada evento para un año de funcionamiento)

$$0.03 \times 0.36 + 0.1 \times 0.18 + 0.22 \times 0.06 + 2.86 \times 0.18 + 3.63 \times 0.09 + 3.67 \times 0.03 + 3.88 \times 0.06 + 7.15 \times 0.03 + 13.8 \times 0.01 = 1.58 \text{ \$/km}$$

La siguiente tabla muestra los costos de cada parámetro para un vehículo a causa de un incidente. Es decir para poder obtener los costos totales debemos conocer la cantidad de vehículo que circulan por la vía, la cantidad de incidentes totales, el grado de saturación con que trabaja la red y el largo total de la vía

v/c	Tiempo de viaje (\$/km)	Consumo combustible (\$/km)	Emisiones de CO2 (\$/km)	Emisiones de Nox (\$/km)	Emisiones de PM (\$/km)	Emisiones de VOC (\$/km)	Costo total Incidentes
75%	\$1,58	\$17,8	\$0,1	\$0,02	\$0,0001	\$0,001	\$19,46
83%	\$2,73	\$25,6	\$0,1	\$0,02	\$0,0002	\$0,002	\$28,51
90%	\$6,34	\$47,0	\$0,2	\$0,02	\$0,0003	\$0,003	\$53,54
100%	\$12,41	\$56,4	\$0,2	\$0,03	\$0,0004	\$0,004	\$69,04
110%	\$12,94	\$59,0	\$0,2	\$0,04	\$0,0005	\$0,004	\$72,18

**Costo de cada parámetro debido a incidentes de tránsito durante un año**

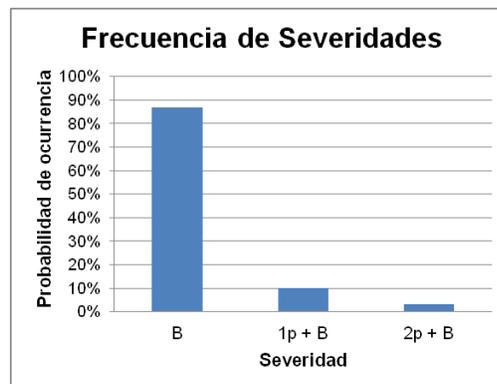
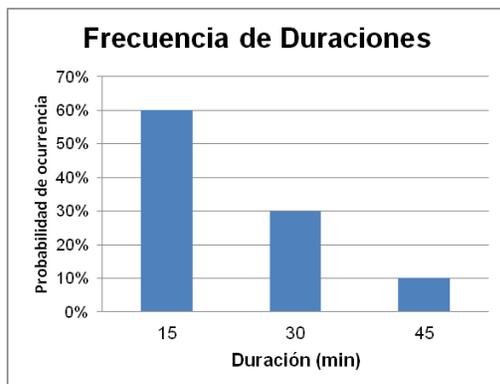
(Fuente: Elaboración propia)

**Plan de Manejo de incidentes de Tránsito.**

Debido a los altos costos generados por los incidentes de tránsito se hace necesario buscar algún plan de manejo de incidentes, tales que el costo de dicha implementación sea inferior a los ahorros obtenidos productos de la operación de dichos planes.

Dichos planes ya han sido probados a nivel mundial, como es el caso de una asistente en la ruta que presta servicios de grúa disminuyendo los tiempo y severidades de los incidente de transito.

Al contar con una grúa cama durante la punta mañana para el Gran Concepción disminuiría considerablemente la frecuencia de la severidad de los incidentes ya que los desplazaría a la berma para su mejor revisión y luego los trasladaría a un lugar seguro. A continuación se muestra una propuesta de las nuevas frecuencias de incidentes.



**Frecuencia de incidentes de tránsito con el plan de manejo de incidentes**

(Fuente: Elaboración propia)

Los costos totales con las nuevas frecuencias para el Gran Concepción son las siguientes.

Ruta	Tiempo de viaje (\$/km)	Consumo de combustible (\$/km)	Emisión de CO2 (\$/km)	Emisión de NOx. (\$/km)	Emisión de PM (\$/km)	Emisión de VOC (\$/km)	Total
<b>Lomas coloradas Pte. Llacolén</b>	\$4.338.265	\$24.596.386	\$85.961	\$11.628	\$179	\$1.425	\$29.033.844
<b>Autopista Thno Pte. Juan Pablo II</b>	\$208.234	\$2.404.376	\$10.307	\$1.881	\$16	\$112	\$2.624.926
<b>Autopista Thno Gral. Bonilla</b>	\$141.374	\$1.632.376	\$6.997	\$1.277	\$11	\$76	\$1.782.111
<b>Penco Gral. Bonilla</b>	\$481.309	\$5.557.445	\$23.823	\$4.348	\$37	\$258	\$6.067.221
<b>Chiguayante Costanera</b>	\$509.478	\$5.882.691	\$25.217	\$4.602	\$40	\$274	\$6.422.301

**Costos de los incidentes de tránsito durante un año en PM con el plan de manejo de incidentes para el Gran Concepción  
(Fuente: Elaboración propia)**

Los costos totales ahora con el plan de manejo son \$ 45.930.403, el costo aprox. de una grúa cama es de cerca de \$22.000.000, el sueldo para el chofer durante un año para que maneje durante todo un año es mas el combustible y mantención es aprox. \$ 7.000.000. Generando costos durante el primer año de \$79.930.403.

Por lo tanto para el primer año con este plan de manejo habría ahorro de \$30.770.675 para el Gran Concepción debido a incidentes de tránsito durante PM durante todo el año para los siguientes años de \$52.770.675, debido a que la grúa ya habría sido pagada.

## ANEXO B

En el anexo B se incluye una revisión de los estudios disponibles sobre el impacto asociado a los incidentes de tránsito

### **b) Impactos de los incidentes de tránsito en la infraestructura.**

Los siguientes autores se han centrado sus estudios sobre la reducción de la capacidad debido a incidentes de tránsito.

- I. Goolsby en 1970 concluyó que un incidente que bloqueo un carril de tres, reduce la capacidad alrededor de un 50% y que un incidente, que bloqueo dos vías de tres, reduce la capacidad en aproximadamente un 79%.
- II. Hadi et al. en el año 1999 ajustó los parámetros de tres modelos de simulación microscópicos utilizados para determinar sus habilidades para replicar las reducciones de las capacidades debido a incidentes de tráfico. Llegaron a la conclusión que era posible afinar los parámetros de las tres modelos de simulación para simular las caídas en la capacidad debido a los bloqueos de carril.
- III. HCM 2000 proporciono estimaciones de la capacidad restante durante las condiciones de incidentes como una función del número de los carriles bloqueados (o cuneta) y el número de carriles de la sección de la carretera bajo consideración. Estos valores han sido ampliamente utilizados para estudiar los efectos de diferentes estrategias para el manejo de incidentes en el desempeño del sistema de transporte.
- IV. Qi & Smith en 2001 encontraron, en base a los datos recogidos en los caminos de Hampton en Virginia, que la reducción de capacidad con un carril bloqueado de tres puede modelarse como una distribución Beta con un promedio de 63% y un nivel desviación del 14%. El estudio también encontró que la reducción de la capacidad debido a dos carriles bloqueados fuera de tres carriles se puede modelar como una distribución Beta con un promedio de 77% y una desviación estándar de 12%.
- V. Knopp et al. en el año 2009 encontró que en el caso de una pista bloqueada, la capacidad de las pistas remanentes se reduce en 50%. Adicionalmente, establecieron que para un

incidente que ocupa la berma del camino o la dirección contraria, la capacidad de las pistas disponibles se reduce en 30%.

### **c) Los impactos de incidentes en el comportamiento microscópico del conductor**

Knoop en un estudio del año 2010 levanto información empírica de las trayectorias de los vehículos utilizando para ello una cámara montada en un helicóptero. El análisis de las trayectorias reveló que existen diferencias significativas entre los estilos de conducción en condiciones normales y en presencia de incidentes. En particular en presencia de incidentes los conductores prefieren mantener una mayor distancia respecto del vehículo que les precede, reaccionan más rápido a los cambios de velocidad de los vehículos que les precede, además prefieren desarrollar velocidades menores. Estos cambios conductuales en los estilos de conducción conducen a reducciones en la capacidad de la infraestructura que están entre 60% y 75% de la capacidad normal de las vías.

### **d) Impacto de los incidentes de tránsito en el comportamiento estratégico de los conductores**

Los estudios se han focalizado en determinar cómo la presencia de incidentes influye en la elección de ruta. En la práctica, la metodología más empleada para determinar dichos impactos ha sido la utilización de encuestas de preferencia declaradas. Usando este enfoque, se determina el porcentaje de individuos que elige cambiar sus decisiones de viaje basadas en la información diseminada por un sistema de información al viajero (ATIS). Estos estudios han concluido que entre 60% al 70% de los individuos pudieran cambiar su ruta basados en la información recibida. Sin embargo debido a la naturaleza de esas encuestas estos valores pudieran resultar inconsistentes con los datos registrados en centros de control de tráfico. Varios estudios en Europa han señalado que el porcentaje de conductores que considera la información y que por ende modifica su ruta, es en realidad más conservador manteniéndose en el rango comprendido entre 27% al 44%. En casos extremos donde el

incidente causa impactos significativos al sistema de transporte se han reportando tasas de cambio de ruta del orden del 50%.

Lucas y yang (2003) desarrollaron un marco para simular el comportamiento de un sistema de información al conductor (ATIS) bajo diferentes condiciones. En su estudio consideraron un rango para el porcentaje de conductores que cambiaba su ruta comprendido entre el 15% y el 30%. Cragg y demensky (1999) usando CORSIM concluyeron que a nivel de sistema, existen niveles óptimos de cambio de ruta respecto de los cuales aumentar el número de conductores que cambia la ruta en la práctica aumenta las demoras y consumos del sistema de transporte.

### ANEXO C

En este anexo se encuentra: Revisión de microsimuladores, descripción, modelos utilizados, parámetros y salida de entrada de AIMSUN.

### 3. Revisión de microsimuladores

Existe actualmente un gran número de microsimuladores. Algunos de ellos son de carácter comercial mientras otros son utilizados sólo académicamente. A continuación se presenta un listado con modelos de microsimulación reportados por Smartest (1999). En ella la categorización tiene relación con el tipo de condiciones de tráfico que son capaces de representar.

Urbano	Autopista	Combinado	Otros
CASIMIR	AUTOBAHN	AIMSUN2	ANATOLL
DRACULA	FREEVU	CORSIM	PHAROS
HUTSIM	FRESIM	MITSIM	SHIVA
MICSTRAN	MIXIC	VISSIM	SIMDAC
NEMIS	SISTM	MELROSE	
NETSIM		MICROSIM	
PADSIM		FLEXSYT II	
SIGSIM		PARAMICS	
SIMNET		PLANSIM-T	
SITRA-B+		TRANSIMS	
SITRAS		INTEGRATION	
THOREAU			

**Modelos de Microsimulación.  
(Fuente: Smartest D3, 1999)**

Los microsimuladores más utilizados en Chile son principalmente AIMSUN, CORSIM, PARAMICS, INTEGRATION Y MISTIM.

### **c.1 Microsimulador AIMSUN**

AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks, o Simulador Microscópico Avanzado e Interactivo para Redes Urbanas e Interurbanas) es un software capaz de reproducir las condiciones reales de tráfico de cualquier red vial. Sus principales características son:

- AIMSUN realiza una aproximación microscópica al problema, esto significa que el comportamiento de cada vehículo es continuamente modelado durante el período de simulación, mediante diferentes técnicas.
- La simulación puede realizarse bien basándose en flujos de tráfico, proporciones de giro y un conjunto de datos, o bien en matrices de viajes origen/destino basadas en una zonificación previamente establecida. En el primer caso, el usuario puede definir distintas formas de generación de vehículos, con distribución constante, uniforme, normal, exponencial o cualquiera definida por él. En el segundo caso, los vehículos son asignados a rutas específicas desde su origen a su destino.
- El comportamiento de los vehículos responde a funciones de varios parámetros que permiten modelar diferentes tipos de vehículos: automóviles, buses, camiones simples y pesados, etc. Los vehículos pueden agruparse en clases y pistas exclusivas para determinados tipos de vehículos pueden ser considerados, por ejemplo: pistas segregadas buses y automóviles.
- En relación con los elementos de control de tráfico pueden ser modelados: semáforos, cedas al paso, etc. Los planes de control de semáforos están basados en la duración de las fases, son muy flexibles tanto en su definición como en su control.

- el usuario puede definir incidentes, antes o durante la simulación. Una lista de ellos pueden ser almacenados para ser utilizadas en simulaciones posteriores.
- Las maniobras vehiculares son modeladas en detalle utilizando modelos de car-following, lane-changing y de aceptación de gap. Los dos primeros están basados en los modelos de Gipps los cuales serán explicados a continuación

## c.2 Revisión de los modelos utilizados por AIMSUN

A continuación se presenta una descripción y análisis de la teoría básica con la que los vehículos circulan por la red modelada y que sustentan la estructura del modelo de microsimulación AIMSUN.

### c.2.1. Modelo de seguimiento vehicular (Car-following)

Se basa en el modelo Gipps (1981,1986), con algunas modificaciones, que determina el comportamiento de un vehículo dependiendo de su entorno. Está compuesto principalmente por dos componentes, aceleración y desaceleración. El primer componente representa la intención de un vehículo de alcanzar cierta velocidad deseada, mientras el segundo reproduce las limitaciones impuestas por el vehículo precedente al tratar de conducir a la velocidad deseada. La velocidad máxima a la que un vehículo (n) puede acelerar durante un período de tiempo (t, t+T) es:

$$V_a(n,t+T) = V(n,t) + 2.5a(n)T \left( 1 - \frac{V(n,t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n,t)}{V^*(n)}} \quad \text{Eq. 1}$$

Donde:

V(n,t): velocidad del vehículo n en el momento t.

V\*(n): velocidad deseada por el vehículo n.

a(n) : máxima aceleración del vehículo n.

T : tiempo de reacción o intervalo de simulación.

La máxima velocidad que el mismo vehículo (n) puede alcanzar durante el mismo intervalo de tiempo (t, t+T), de acuerdo a sus propias características y a las limitaciones impuestas por la presencia de un vehículo antecesor es:

Eq. 2

Donde:

$d(n)$  : ( $<0$ ) es la máxima desaceleración deseada por el vehículo n.

$x(n,t)$  : es la posición del vehículo n en el momento t.

$x(n-1,t)$  : es la posición del vehículo precedente (n-1) en el momento t.

$s(n-1)$  : es la longitud efectiva del vehículo (n-1).

$d'(n-1)$  : es una estimación de la desaceleración deseada del vehículo (n-1).

La velocidad definitiva del vehículo n durante el intervalo (t, t+T) es el mínimo entre las dos velocidades definidas previamente. Por lo tanto, la posición del vehículo n es actualizada considerando esta velocidad en la ecuación de movimiento:

$$X(n, t+T) = X(n, t) + V(n, t+T)T \quad \text{Eq. 3}$$

Como se aludió anteriormente, AIMSUN utiliza los modelos de Gipps con algunas modificaciones, las cuales se enumeran y se explican a continuación: la forma en que se calcula  $V^*(n)$  en el modelo de Gipps, la influencia de los vehículos en pistas adyacentes y la influencia en la pendiente

#### ✓ **La forma en que se calcula $V^*(n)$ en el modelo de Gipps**

Un vehículo que circula libremente alcanza su  $V^*(n)$  velocidad máxima deseada tomando en cuenta tres parámetros:

➤ Velocidad máxima deseada por n:  $V_{max}(n)$ . Este es un parámetro del vehículo.

➤ Acatamiento de la velocidad:  $\theta(n)$ , que es el grado de acatamiento al límite de velocidad, el modelador puede agregarle una distribución de probabilidades con el fin de capturar el nivel de agresividad de los conductores.

➤ Límite de velocidad de la sección:  $S_{limit}(s)$ , este es un parámetro de la sección.

El límite de velocidad para un vehículo en la sección  $s$ ,  $S_{limit}(n, s)$ , está dada por:

$$S_{limit}(n, s) = S_{limit}(s) * \theta(n) \quad \text{Eq. 4}$$

Por lo tanto, la velocidad máxima deseada por el vehículo  $n$  en la sección  $s$  está dada por:

$$V_{max}(n, s) = \text{Min}[S_{limit}(n, s), V_{max}(n)] \quad \text{Eq. 5}$$

Este último valor es el mismo que en modelo de Gipps aparece denotado como  $V^*(n)$ .

La influencia de los vehículos en pistas adyacentes

AIMSUN toma en consideración el efecto que tiene cierto número de vehículos manejando a menor velocidad por la pista de la derecha. El modelo calcula la velocidad media de los  $N$  vehículos que manejan aguas abajo por la pista de la derecha (`MeanSpeedVehiclesDown`), considerando sólo a los vehículos que están a una cierta distancia máxima (`MaximumDistance`) y considerando por separado el caso de accesos y el de pistas en general.

Para el caso que la pista derecha sea un acceso, la velocidad máxima del vehículo puede ser igual al valor del parámetro `MeanSpeedVehiclesDown` más el valor del parámetro `MaximunSpeedDifferenceOnRamp` (otro parámetro local del modelo). Para el resto de las pistas de acceso la velocidad máxima del vehículo puede ser igual al valor del parámetro `MeanSpeedVehiclesDown` más `MaximunSpeedDifference` (otro parámetro local del modelo). Este procedimiento asegura que la diferencia de velocidades entre pistas adyacentes siempre será menor que `MaximunSpeedDifferenceOnRamp` en el caso de accesos y a `MaximunSpeedDifference` en el resto de los casos.

La influencia en la pendiente

La pendiente de una sección influye en el comportamiento vehicular por medio de un aumento o reducción de la aceleración o de las capacidades de frenado, por tanto la aceleración del vehículo que es un parámetro local está dada por:

$$accel = Max \left\{ veh\ acc - \frac{pendiente * 9.81}{100}, veh\ acc * 0.1 \right\} \quad \text{Eq. 6}$$

Esta formulación permite que la aceleración de un vehículo nunca pueda ser negativa, es más, nunca será menor que un 10% de su aceleración bajo pendientes de ninguna magnitud.

### c.2.2 Modelo de cambio de pista (Lane-Changing)

Este modelo puede ser considerado como un desarrollo del modelo de cambio de pista de Gipps. Se modela el comportamiento como un proceso de decisión, donde se analizan las siguientes preguntas:

**¿Es necesario el cambio de pista?** Depende de varios factores, como lo son la necesidad de los virajes, la distancia al siguiente viraje, y las condiciones de tráfico de la pista actual.

**¿Es deseable cambiar de pista?** Se requiere verificar si habrá una mejora en las condiciones de tráfico al cambiar de pista (medida en términos de velocidad y distancia).

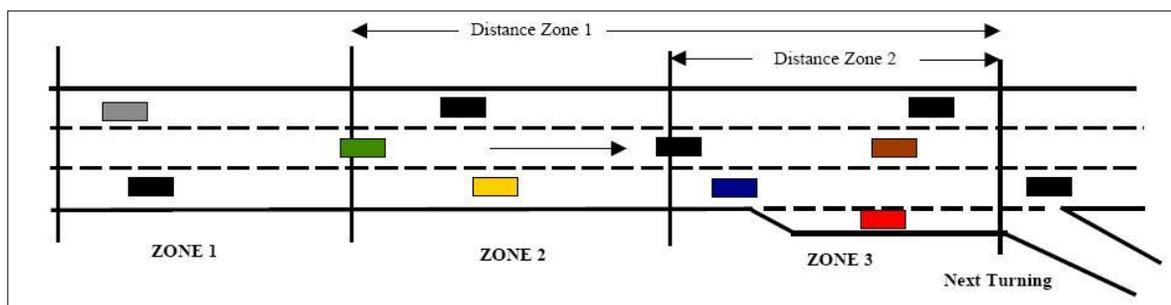
**¿Es posible cambiar de pista?** Se verifica que haya una suficiente brecha para realizar el cambio. Para esto se calculan las condiciones de frenado del vehículo precedente de la nueva pista y las condiciones de frenado impuestas a los vehículos aguas arriba de la nueva pista.

Para representar el comportamiento del conductor al momento de cambiarse de pista se han definido tres zonas en una sección, cada una de las cuales corresponde a distintas motivaciones para el cambio de pistas:

**Zona 1:** la decisión de cambio de pista se rige por las condiciones de tráfico presente.

**Zona 2:** esta es la zona donde se realizan la mayor cantidad de cambios de pistas. La decisión se rige por el próximo viraje en una intersección o la salida de una autopista. Se busca la brecha necesaria y se realiza el cambio, sin afectar el comportamiento de las pistas adyacentes.

**Zona 3:** los vehículos están obligados a ingresar a la pista de viraje deseada, reduciendo la velocidad e incluso deteniéndose de manera completa. Asimismo los vehículos de la pista adyacente, alteran su comportamiento, permitiendo que los vehículos que desean realizar el cambio de pista encuentren la brecha necesaria.



Zonas de cambio de pista

(Fuente: Manual AIMSUN 2004)

Las 3 zonas anteriormente mencionadas están definidas por dos parámetros, Distance Zone 1 y Distance Zone 2, los cuales están definidos en segundos y son convertidos en distancia mediante la siguiente fórmula:

$$D_m = D_t * S_{\text{limit}}(s) \left[ \frac{S_{\text{limit}}(s)}{V_{\text{max}}(n, s)} \right] \quad \text{Eq. 7}$$

Donde:

Dm: es la distancia en metros

Dt: es la distancia en segundos

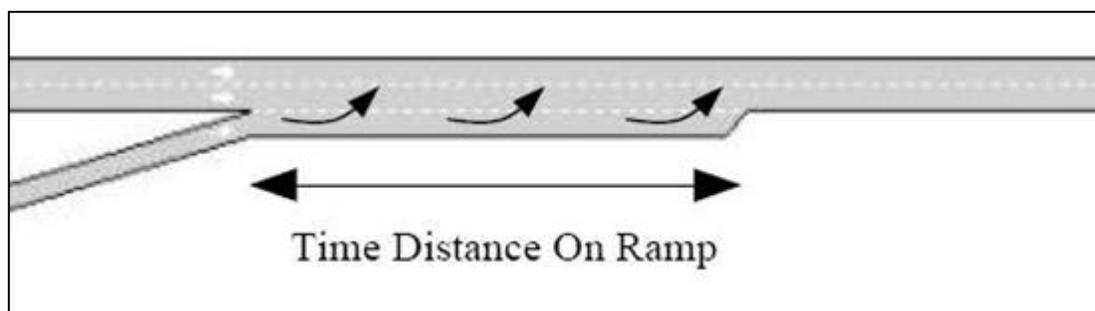
Slimit(s): es el límite de velocidad de la sección s

Vmax(n,s): es la velocidad máxima deseada por el vehículo n en la sección s.

### c.2.2.1 Modelo de Cambio de Pista para accesos

Un modelo especial de cambio de pista es utilizado para el caso de los accesos (on ramps). En este caso se aplica otro modelo de cambio de pista para el auto que trata de emerger. Un parámetro adicional es considerado, el Time Distance on Ramp que es la distancia, en segundos, desde el final de la pista a la cual la pista lateral es considerada una pista de acceso. Cuando los vehículos que se encuentran en un acceso y están más lejos del fin de la pista que la distancia definida por el Time Distance on Ramp, éstos se comportan como en la Zona 1, cuando están más cerca tratan de emerger. La idea de este parámetro es caracterizar desde qué punto la pista auxiliar es considerada una “on ramp” en vez de una pista lenta o pista lateral.

Este submodelo también toma en cuenta otros aspectos, entre ellos, si el vehículo que trata de emerger es el primero en la pista, si está frenando o incluso si ha llegado al final de la pista y está detenido esperando, en este caso un parámetro que cobra relevancia es el Maximun Give Way Time, el cual determina cuánto tardará en que el vehículo detenido se ponga impaciente. Pasado este tiempo el vehículo considerará que está en la Zona 3, por tanto se cambiará de pista incluso si esto perjudica a los otros conductores. Otra particularidad del modelo de “on ramps” es que para los vehículos que están en la Zona 3 y se acercan a un “on ramp”, éstos chequearán si es que hay vehículos tratando de emerger, si esto sucede tratarán de cambiarse hacia la pista de la izquierda (aplicando Zona 1) (Figura 8)

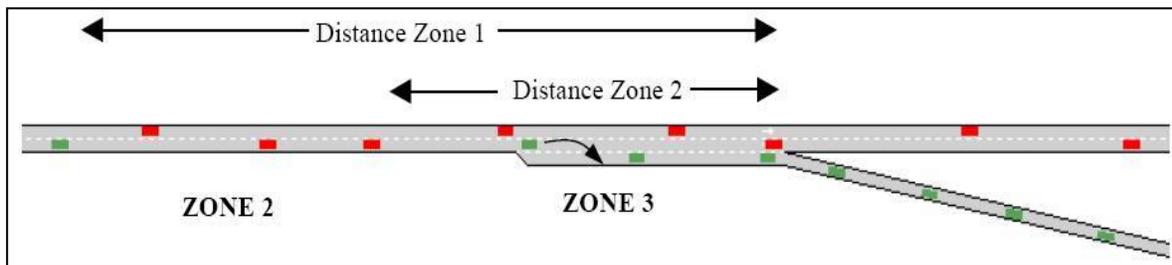


Zonas en el modelo de cambio de pistas para acceso

(Fuente: Manual AIMSUN, 2004)

### c.2.2.2. Modelo de Cambio de Pista para salidas

Este modelo se aplica en el caso de salidas de autopistas. En este caso se aplica el modelo de cambio de pista estándar. Un vehículo que debe tomar la próxima salida intentará cambiarse a la pista de la derecha una vez ingresando a la Zona 2 y una vez que esté alineado con la pista de salida hará el cambio de pista hacia la derecha. En el caso de grave congestión la salida puede congestionarse por completo tapando la pista de salida en su totalidad, en este caso el vehículo que debe tomar la salida se detendrá completamente esperando por el gap necesario para realizar el cambio de pista.



Zonas en el modelo de cambio de pistas para salidas

(Fuente: Manual AIMSUN, 2004)

### c.2.2.3. Modelo “Look Ahead” (vista hacia adelante)

Cuando las condiciones de tráfico están muy congestionadas puede pasar que los vehículos no puedan alcanzar la pista que les permita efectuar un giro y por ende lo pierden. Cambiando ciertos parámetros como la distancia de las Zona 1 y 2, las aceleraciones de los vehículos, el paso de simulación, etc. o también usando poli secciones en vez de secciones, cuando es posible, se puede minimizar el número de giros perdidos; pero esto no es suficiente.

Para mejorar esto, el submodelo “Look Ahead” tiene por objetivo informar a los automovilistas de los dos próximos giros en sus rutas con el fin que puedan tomar decisiones de cambio de pista con un criterio más amplio y no sólo tomando en cuenta el próximo giro. El “Look Ahead Model” se puede resumir en 4 puntos:

En todo momento cada vehículo conoce sus próximos 2 giros, por tanto la decisión de cambio de pista está influenciada por 2 giros consecutivos.

Las Zonas 2 y 3 del modelo de cambio de pista se extienden más allá que los límites de la sección, afectando la sección aguas arriba. Cuando se hace un giro se toma en cuenta la pista de destino basado en la información del próximo giro. Se le introdujo una mayor variabilidad a la definición de las zonas, con lo cual se obtiene una mejor distribución de las maniobras de cambio de pista.

#### **c.2.2.4. Modelo de Adelantamiento**

Esta maniobra se desarrolla principalmente en la zona 1, siendo algunas veces llevada a cabo en la zona 2. Dos parámetros son los que definen la caracterización de las maniobras de adelantamiento.

Percent Overtake: es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo bajo el cual el vehículo decide adelantar. Esto es, si el vehículo precedente conduce más lento que el porcentaje de adelantamiento de la velocidad deseada del vehículo que le sigue, entonces el que le sigue trata de adelantarle.

Percent Recover: es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo sobre la cual el vehículo decide volver a la pista lenta. Esto es, si el vehículo precedente conduce más rápido que el porcentaje de recuperación de la velocidad deseada del vehículo que le sigue, entonces el que le sigue trata de volver la pista lenta.

Se recomienda que los valores del porcentaje de recuperación sean mayores que los de porcentaje de adelantamiento, para evitar que algunas maniobras de adelantamiento sean abortadas. Valores muy pequeños tampoco son recomendables.

### c.3. Parámetros que incluyen AIMSUN

Tal como exponen diversos estudios y como lo representan los manuales de AIMSUN, los parámetros son agrupados en tres categorías, dependiendo del nivel de detalle, éstos son: Atributos de los vehículos, Locales, Globales

#### c.3.1. Atributos de los Vehículos

Estos parámetros están definidos a nivel de tipo de vehículo, como por ejemplo: Automóvil, bus, taxi, camión, etc., y tienen influencia en toda la red. Se puede definir tanto la media de los atributos como su desviación, y sus valores mínimo y máximo. Las características particulares de cada tipo de vehículo son tomadas de una distribución Normal Truncada. Los parámetros de este grupo son los siguientes:

- **Nombre:** nombre del tipo de vehículo.
- **Largo:** corresponde a la longitud, en metros, para el tipo específico de vehículo. Este parámetro se utiliza tanto para fines gráficos como de modelación. Influye en la modelación vehicular ya que en los modelos de comportamiento vehicular es tomado en cuenta.
- **Ancho:** corresponde al ancho, en metros, para el tipo específico de vehículo. Este valor sólo se utiliza con propósitos gráficos, y no influye en la modelación.
- **Máxima velocidad deseada:** corresponde a la máxima velocidad, en km/hr, a la cual el tipo de vehículo desearía viajar en cualquier punto de la red.
- **Máxima aceleración:** corresponde a la máxima aceleración, en  $m/s^2$ , que puede alcanzar el tipo de vehículo. Este parámetro es consecuencia del tipo de vehículo junto con el comportamiento del conductor. Debido a esto, su cota máxima depende de las especificaciones técnicas del parque automotriz. Esta aceleración es utilizada en el modelo de seguimiento vehicular de Gipps.
- **Desaceleración normal:** corresponde a la máxima desaceleración, en  $m/s^2$ , que puede alcanzar el tipo de vehículo. Es análoga al parámetro anterior, pero en caso de

disminuciones de velocidad. Esta desaceleración es utilizada en el modelo de seguimiento vehicular de Gipps.

- **Máxima desaceleración:** corresponde a la máxima desaceleración, en  $m/s^2$ , bajo circunstancias especiales, como casos de emergencia.
- **Aceptación de velocidad:** representa la obediencia que posee el tipo de vehículos a los límites de velocidad establecidos.  $0 \leq \theta \leq 1$  significa que la máxima velocidad deseada será menor que el límite de velocidad. Su valor es  $\theta \geq 0$ .
- **Distancia mínima entre vehículos:** es la distancia que guarda un vehículo con el precedente al estar detenidos. Este valor también es considerado para ubicar el primer vehículo detenido respecto a la línea de detención.
- **Máximo tiempo de sesión de paso:** cuando un vehículo está esperando para cruzar o incorporarse en una intersección prioritaria, al sobrepasar este tiempo de espera es más agresivo y reduce los márgenes de aceptación. También es utilizado este parámetro en el modelo de cambio de pista.
- **Vehículos guiados:** es el porcentaje de vehículos que son guiados a través de la red. Esto se da al trabajar con matrices O/D y elección dinámica de rutas, indicando cuántos vehículos son los que siguen a otros en las elecciones de ellas.
- **Aceptación de ser guiados:** es la probabilidad de que un vehículo siga una recomendación.  $0 \leq \lambda \leq 1$  entrega el nivel de aceptación de las indicaciones para ser guiado.
- **Tolerancia de crucero:** es utilizado en los modelos de consumo de combustible y de emisión de contaminantes. Los vehículos que circulan con una aceleración o desaceleración, en  $m/s^2$ , menor que este coeficiente son considerados circulando a velocidad constante.
- **Consumo de combustible:** son seis parámetros que dicen relación con las tasas de consumo de combustible y que son utilizados en el modelo del mismo nombre:
  - ✓ tasa de consumo de combustible para vehículo que circula a velocidad constante, en ml/s.(F1 reposo)
  - ✓ tasa de consumo de combustible para vehículo que acelera, en ml/s.(c1 acelerando)
  - ✓ tasa de consumo de combustible, en litros cada 100 km, para vehículo viaja a velocidad constante de 90 km/hr.(F1 a 90 km/hr)

- ✓ tasa de consumo de combustible, en litros cada 100 km, para vehículo viaja a velocidad constante de 120 km/hr. ( F2 a 120 km/hr)
- ✓ velocidad a la cual la tasa de consumo de combustible, en ml/s, está en su mínimo para un vehículo que viaja a velocidad constante.(Vm)
- ✓ tasa de consumo de combustible para vehículo que desacelera, en ml/s.(Fd desacelerado)
- **Emisión de contaminantes:** para cada tipo de vehículo, un grupo de contaminantes puede ser definido, y para cada uno se requieren los siguientes parámetros que son utilizados en el modelo de consumo de combustible:
  - ✓ tasa de emisión para vehículo que acelera, en g/s.
  - ✓ tasa de emisión para vehículo que desacelera, en g/s.
  - ✓ tasa de emisión para vehículo que circula a velocidad constante, en g/s.

### c.3.2. Locales

Este grupo de parámetros afectan el comportamiento de todos los automovilistas en un punto específico de la red modelada. Esto permite representar comportamientos que tienen un ámbito local mientras los conductores se encuentran atravesando la sección correspondiente, pero cambian a medida que el vehículo se cambia de ella y que sólo se observan en determinadas situaciones. Los parámetros de este grupo son:

- **Límite de velocidad de la sección:** velocidad máxima permitida, en km/hr, para los vehículos que viajan a través de una sección. Dependiendo de las características del conductor, ellos siguen o no esta recomendación.
- **Límite de velocidad por pista:** velocidad máxima permitida, en Km/hr, para los vehículos que viajan a través de una pista en particular.
- **Velocidad de viraje:** máxima velocidad, en km/hr, a la cual viaja un vehículo al realizar un viraje. Este valor es calculado automáticamente por el modelo dependiendo de la geometría de la intersección, pero también puede ser modificado manualmente.

- **Distancia de visibilidad en intersecciones:** al acercarse un vehículo a una intersección donde debe ceder el paso, se aplica el modelo de aceptación de gaps al ser la distancia al fin de la sección menor que este valor (m).
- **Velocidad de Yellow Box:** un vehículo evita ingresar al cruce sin bloqueos (“yellow box”) si el vehículo precedente circula a una velocidad menor que la indicada por medio de este parámetro, en km/hr.
- **Distancia zona 1:** distancia desde el final de la Zona 1 al punto donde finaliza la sección en la cual está el vehículo. Esta distancia está definida como el tiempo que es necesario para recorrer cierta distancia. Esta conversión es posible considerando el límite de velocidad de la sección y la velocidad a la cual desean circular los vehículos por ella. Se utiliza tiempo para que la distancia sea variable, dependiendo del vehículo ya que cada uno puede poseer distinta velocidad deseada. Se utiliza este parámetro en el modelo de cambio de pista.
- **Distancia zona 2:** distancia, en seg, desde el final de la Zona 2 al punto donde finaliza la sección en la cual está el vehículo. Su transformación en distancia es igual al caso anterior y se utiliza en el mismo modelo.
- **Distancia de rampas de acceso:** es la distancia, en seg, para las pistas laterales que se consideran rampas de acceso. Su transformación en distancia es igual al caso anterior. Es utilizado para el modelo especial de cambio de pista aplicado a las entradas tipo rampas. El cambio entre tiempo y distancia se realiza considerando los mismos aspectos antes mencionados.
- **Pendiente de la sección:** la pendiente de una sección influye en las tasas de aceleración y desaceleración que experimentan los vehículos que circulan por ella. Los valores son entregados como porcentajes o por medio de cotas, siendo

### c.3.3. Globales

Estos parámetros se relacionan con los modelos de comportamiento vehicular a través de toda la red. Estos parámetros no están definidos ni en forma local ni en forma específica para cada tipo de vehículo. Son utilizados para todos los vehículos, en toda la red y durante toda la simulación.

**Parámetros Generales:**

- **Tiempo de reacción del conductor:** corresponde al tiempo que toma al conductor reaccionar frente a cambios en la velocidad del vehículo precedente. Se utiliza en el modelo de seguimiento vehicular. También corresponde a los intervalos de simulación, lo que hace que al haber cambios (disminuciones en su valor) se reaccione en forma más inmediata a fenómenos presentes en la red.
- **Tiempo de reacción en detención:** corresponde al tiempo que le toma a un vehículo detenido reaccionar frente a la aceleración del vehículo anterior o al cambio de luz a verde. Este tiempo se usa sólo para los vehículos detenidos, mientras que el anterior está definido para los que están en movimiento. Este parámetro tiene gran influencia en la descarga de colas.
- **Velocidad entrando a la cola:** los vehículos que se mueven bajo este valor, en m/s, se consideran como detenidos. Afecta la recolección de datos para detenciones y colas.
- **Velocidad dejando la cola:** los vehículos que estaban en cola y superan esta velocidad, en m/s, se considera que están en movimiento. Afecta la recolección de datos para detenciones y colas.

Estos últimos dos parámetros también afectan el comportamiento vehicular, ya que como parte del modelo de cambio de pista, los vehículos esperan que se presente el gap aceptable para realizar el cambio, y no les gusta esperar detenidos más que cierto tiempo. La condición de detención viene dada por estos parámetros.

**De seguimiento vehicular:**

- **Número de vehículos:** es el número máximo de vehículos a considerar en el modelo de seguimiento vehicular, que es utilizado para modelar la influencia de las pistas adyacentes en el modelo.
- **Máxima distancia:** es la máxima distancia hacia delante, en m, considerada en el modelo de seguimiento vehicular.

- **Máxima diferencia de velocidad:** es la máxima diferencia de velocidad, en km/hr, entre una pista y la adyacente en el modelo de seguimiento vehicular.
- **Máxima diferencia de velocidad en rampa de acceso:** es la máxima diferencia de velocidad, en km/hrs, entre la pista principal y la de acceso en rampa en el modelo de seguimiento vehicular.

#### **De cambio de pista:**

- **Porcentaje de adelantamiento:** representa el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide adelantar. Debe ser mayor que cero y menor o igual a uno. Se utiliza para modelar la decisión de adelantamiento.
- **Porcentaje de recuperación:** representa el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide volver a la pista lenta después de haber adelantado. Debe ser mayor que cero y menor o igual a uno. Se utiliza para modelar la decisión de adelantamiento.
- **Modelo de rampa de acceso:** el usuario puede seleccionar cuál de las dos versiones disponibles de modelo para rampas de acceso desea utilizar.

#### **Otros Parámetros Globales**

Además de todos los parámetros globales mencionados anteriormente, existen dos parámetros adicionales que pueden ser utilizados en el editor de AIMSUN. Ellos no son parámetros sujetos a calibración, ya que no representan opciones que se puedan tomar. Más bien muestran la aplicabilidad que posee AIMSUN al incluir mayor variedad de casos. Éstos son:

- **Lado del camino o movimiento vehicular:** dice relación con el lado de la calle que el conductor de un vehículo utiliza para conducir. Este parámetro es considerado en el modelo de cambio de pista.
- **Distinción de pistas de destino en virajes:** determina la capacidad para que el usuario defina las pistas de destino de un movimiento. Si está fijado en la alternativa NO, entonces todas las pistas son consideradas en el destino del movimiento.

#### b.4. Resultados entregados por AIMSUN

El software brinda un conjunto de salidas numéricas y gráficas tras la ejecución de la simulación. AIMSUN puede entregar resultados en los diferentes niveles de agregación (toda la red, por sección, giro o conjuntos de secciones) definidas por el usuario, además de la información basada en rutas de origen-destino y información de las líneas de transporte público. En la tabla se definen todas las salidas globales de AIMSUN que se consideraran en este proyecto.

Parámetro	Definición
<b>Flujo</b>	Número promedio de vehículos por hora que han pasado por la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al salir de la red a través de una sección de salida.
<b>Densidad</b>	Número promedio de vehículos por kilómetro para toda la red.
<b>Contaje de entrada</b>	Número de vehículos que han entrado en la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al entrar en la red a través de una sección de entrada.
<b>Flujo de entrada</b>	Número de vehículos por hora que han entrado en la red durante el período de simulación. Los vehículos se cuentan al entrar en la red a través de una sección de entrada.
<b>Velocidad</b>	La velocidad promedio para todos los vehículos que han abandonado el sistema. Esto se calcula con la velocidad comercial media de cada vehículo.
<b>Velocidad harmónica</b>	La velocidad media armónica para todos los vehículos que han abandonado el sistema.
<b>Tiempo de Viaje</b>	Tiempo promedio necesario para que un vehículo se desplazar en un kilómetro dentro de la red. Esta es la media de todos los tiempos individuales de viaje (tiempo de salida - hora de entrada) para todos los vehículos que han cruzado la red, convertida en el tiempo por kilómetro.
<b>Tiempo de demora</b>	Tiempo promedio de demora por vehículo por kilómetro. Esta es la diferencia entre la hora prevista de viajes (el tiempo que se tardaría en recorrer el sistema en condiciones ideales) y el tiempo de viaje. Se calcula como la media de todos los vehículos y luego se convierte en el tiempo por kilómetro.
<b>Tiempo de parada</b>	Tiempo promedio en reposo por vehículo por kilómetro.
<b>Número de Paradas</b>	Número promedio de paradas por vehículo por kilómetro.
<b>Distancia Total recorrida</b>	Número total de kilómetros recorridos por todos los vehículos que se han cruzado en la red.
<b>Tiempo total del viaje</b>	El tiempo total de viaje experimentado por todos los vehículos que se han cruzado en la red.
<b>Cola media</b>	Longitud media de la cola en esa sección, expresada como el número de vehículos por carril. Se calcula como un promedio de tiempo.
<b>Max Cola</b>	Longitud máxima de la cola, expresada en número de vehículos por carril .
<b>Vehículos dentro</b>	Número de vehículos dentro de la red cuando la simulación finaliza.

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
<b>Vehículos fuera</b>	Número de vehículos que han salido de la red durante la simulación.
<b>Vehículos perdido Dentro</b>	Si se está utilizando el modo basado en rutas, el número de vehículos perdidos que se encuentran actualmente en la red, que se entienden los vehículos que han perdido al menos a uno de sus giros pre-asignadas y que están en un lugar desde donde su destino original no puede ya ser alcanzado
<b>Los vehículos perdida fuera</b>	Si se está utilizando el modo basado en rutas, el número de vehículos perdidos que han dejado a la red durante el período de simulación.
<b>Consumo de combustible</b>	Litros totales de combustible consumido por todos los vehículos que se han cruzado en la red.
<b>Emisiones Contaminantes</b>	Para cada contaminante, kilogramos totales de la contaminación emitida por los vehículos que se han cruzado en la red

**Parámetros medidos por AIMSUN.**