



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

UNA HEURÍSTICA BASADA EN ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA CALIBRACIÓN DE VISSIM: CASO DE CHILE

NICOLÁS ANDRÉS CONTRERAS AVELLO

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN ENRIQUE COEYMANS

Santiago de Chile, Julio, 2014
© Contreras, Nicolás



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

UNA HEURÍSTICA BASADA EN ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA CALIBRACIÓN DE VISSIM: CASO DE CHILE

NICOLÁS ANDRÉS CONTRERAS AVELLO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN ENRIQUE COEYMANS AVARIA

JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO

FERNANDO JOFRÉ WEISS

VLADIMIR MARIANOV KLUGE

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Julio, 2014

Para mi familia

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi profesor guía, Juan Enrique Coeymans, quien me motivó, guio y consiguió el financiamiento para poder realizar el programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a la SECTRA quienes otorgaron el financiamiento para poder realizar esta investigación, a PTV GROUP quienes me dieron la licencia para poder utilizar su programa VISSIM con fines académicos, y a los alumnos de Modelos de Tráfico Avanzado, quienes participaron en la toma de datos utilizados para el desarrollo de esta investigación.

En tercer lugar, a Felipe del Río, quien me ayudo a la implementación del algoritmo genético y en la programación en Visual Studio, a mis compañeros de Magister, quienes ante cualquier duda, podía acudir a su ayuda, y al Departamento de Transporte y Logística, tanto profesores como administrativos, con los cuales tuve la suerte de compartir todo este periodo.

Finalmente, y por sobretodo, gracias a mi familia, quienes me han acompañado y apoyado a lo largo de toda mi formación tanto académica como personal.

INDICE GENERAL

1.	<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1	Objetivos de la Tesis	2
1.2	Alcances	3
1.3	Contenido	3
2	<i>MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</i>	5
2.1	Definiciones Previas.....	5
2.2	Programas de Simulación Microscópica de Transporte.....	7
2.3	Descripción de VISSIM	8
2.3.1	Modelo de Simulación	9
2.4	La Calibración.....	17
2.4.1	Investigaciones Relevantes Existentes.....	17
2.4.2	Discusión de Investigaciones Relevantes.....	22
3	<i>ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</i>	26
3.1	Procedimiento	28
3.1.1	Distancia promedio en detención (AXADD).....	31
3.1.2	Parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT) 32	
3.1.3	Parte aditiva de la distancia de seguridad deseada (BXADD).....	33
3.1.4	Distribución de velocidad deseada (DESIREDSPEED).....	34
3.1.5	Resolución de la simulación (SIMRES)	37
3.1.6	Número de vehículos observados hacia adelante (OBSERVEDVEHICLES).....	38
3.1.7	Distancia máxima observada hacia adelante (MAXLOOKAHEAD) 39	

3.1.8	Headway mínimo (MINHEADWAY)	40
3.1.9	Resumen.....	40
4	<i>LEVANTAMIENTO DE DATOS</i>	42
4.1	Ubicación	42
4.2	Catastro Físico y Operativo.....	44
5	<i>ALGORITMO GENÉTICO</i>	51
5.1	Elección de Algoritmo Genético.....	51
5.2	Descripción General de Algoritmos Genéticos.....	52
5.3	Implementación en Calibración	54
5.3.1	Función Objetivo o <i>Fitness</i>	54
5.3.2	Gen	56
5.3.3	Población.....	56
5.3.4	Selección	57
5.3.5	Recombinación o <i>Crossover</i>	58
5.3.6	Mutación	59
5.3.7	Programa de Implementación	59
6	<i>CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN</i>	60
6.1	Modelación de Red	60
6.2	Utilización del Algoritmo Genético	65
6.3	Resultados de Calibración.....	71
6.3.1	Calibración BXADD.....	72
6.3.2	Calibración BXMULT	72
6.3.3	Calibración AXADD.....	73
6.3.4	Calibración DESIREDSPEED general	74
6.3.5	Calibración SIMRES.....	74
6.3.6	Calibración DESIREDSPEED específicas	75

6.3.7	Revisión y Resultados	79
6.4	Validación	81
7	<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	84
7.1	Conclusiones	84
7.2	Recomendaciones.....	86
	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	88
8	<i>ANEXOS</i>	91
8.1	Clase SensitivityA.....	92
8.2	Clase nGen	93
8.3	Clase Principal	93
8.4	Clase nGA	94

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Esquema del proceso de simulación. Fuente: Manual Vissim 5.40.....	9
Ilustración 2: Modelo de seguimiento vehicular. Fuente: Manual Vissim 5.40	12
Ilustración 3: Red de Sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.	29
Ilustración 4: Gráfico AXADD. Fuente: Elaboración propia.	31
Ilustración 5: Gráfico BXMULT. Fuente: Elaboración propia.	32
Ilustración 6: Gráfico BXADD. Fuente: Elaboración propia.....	33
Ilustración 7: Gráfico DESIREDSPEED 1. Fuente: Elaboración propia.....	35
Ilustración 8: Gráfico DESIREDSPEED 2. Fuente: Elaboración propia.....	36
Ilustración 9: Gráfico SIMRES. Fuente: Elaboración propia.	37
Ilustración 10: Gráfico OBSERVEDVEHICLES. Fuente: Elaboración propia.	38
Ilustración 11: Gráfico MAXLOOKAHEAD. Fuente: Elaboración propia.	39
Ilustración 12: Gráfico MINHEADWAY. Fuente: Elaboración propia.	40
Ilustración 13: Mapa Red Calibración. Fuente: Google maps y elaboración propia.	43
Ilustración 14: Distribución de N.S.E. Fuente: Elaboración propia.....	62
Ilustración 15: Red Calibración VISSIM. Fuente: Elaboración propia.	63
Ilustración 16: Quilín-E. Fernández VISSIM. Fuente: Elaboración propia.....	64
Ilustración 17: Esquema de Calibración. Fuente: Elaboración propia.....	65
Ilustración 18: Ciclo de calibración. Fuente: Elaboración propia.....	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resumen de Investigaciones. Fuente: Elaboración propia.	23
Tabla 3.1: Resumen de Variables. Fuente: Elaboración propia.	27
Tabla 3.2: Ranking de Sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 4.1: Programación de semáforos. Fuente: UOCT y elaboración propia.	45
Tabla 4.2: Distribución de Flujos. Fuente: Elaboración propia.	46
Tabla 4.3: Factores de equivalencia. Fuente: Coeymans y Neely (1984).	47
Tabla 4.4: Flujos de PDV/QUI. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4.5: Factor de Ajuste. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 4.6: Flujos Nuevos PDV/QUI. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 4.7: Colas E. Fernández. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 4.8: Colas P. de Valdivia. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 6.1: Largo de Vehículos. Fuente: Velasco (2004).	61
Tabla 6.2: Distribución N.S.E. Macul. Fuente: Adimark.	61
Tabla 6.3: Parámetros Seleccionados. Fuente: Elaboración propia.	64
Tabla 6.4: Resultados default. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 6.5: I.D. Default. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 6.6: Vector Solución 1. Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 6.7: Vector Solución 2. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 6.8: Vector Solución 3. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 6.9: Vector Solución 4. Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 6.10: Vector Solución 5. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 6.11: Vector Solución 6. Fuente: Elaboración propia.	76

Tabla 6.12: Vector Solución 7. Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 6.13: Vector Solución 8. Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 6.14: Vector Solución 9. Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 6.15: Vector Solución 10. Fuente: Elaboración propia.	78
Tabla 6.16: Vector Solución 11. Fuente: Elaboración propia.	78
Tabla 6.17: Vector Solución 12. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 6.18: Vector Solución Final. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 6.19: Vector Solución Final 2. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 6.20: Resultados parámetros calibrados. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 6.21: I.D. Vector Solución Final. Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 6.22: Resultados Default Validación. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 6.23: I.D. Validación Default. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 6.24: Resultados Validación parámetros calibrados. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 6.25: I.D. Validación parámetros calibrados. Fuente: Elaboración propia.	83

RESUMEN

La simulación en ingeniería se ha vuelto una herramienta fundamental para el desarrollo, evaluación e implementación de medidas y proyectos de transporte. En tráfico, un programa de microsimulación de última generación permite la producción de una imagen precisa de lo que pueda suceder si una medida es llevada a cabo. Para que una imagen realista sea producida, una calibración y validación es necesaria.

El principal objetivo de este estudio es generar una versión de VISSIM (programa de microsimulación de tráfico alemán) que pueda ser usada en Santiago y en un contexto de país en vías de desarrollo, el cual produzca resultados realistas. La calibración será aplicada para tráfico interrumpido (intersecciones semaforizadas y de prioridad).

Una revisión de estudios de calibración, y un experimento de análisis de sensibilidad elaborado en esta investigación, determinaron que son cinco las variables relevantes para la calibración: la parte aditiva de la distancia de seguridad deseada, la parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada, la distancia promedio en detención, la distribución de velocidad deseada y la resolución de simulación.

Estas variables fueron calibradas utilizando la heurística de Algoritmos Genéticos (A.G), la cual fue programada en Microsoft Visual Studio, usando información de una red en Macul, Santiago, la cual fue levantada con una metodología de bajo costo elaborada para este estudio. El A.G. también fue alterado especialmente para esta investigación para que el tiempo de calibración fuera reducido al mínimo.

Los resultados de la calibración de esta investigación permitieron que el Índice de Desempeño (I.D) analizado fuera reducido desde un 54,08% de error default a un 9,32% de error, lo que implica una reducción de un 82,77%. Usando los parámetros calibrados, el procedimiento de validación fue llevado a cabo. Utilizando los mismos valores en una red distinta para la validación, los parámetros calibrados permitieron reducir el I.D. desde un 24,11% de error default a un 11,00% de error, lo que implica una reducción de un 54,38%, confirmando que el proceso de calibración es correcto.

ABSTRACT

Simulation in engineering has become a fundamental tool for the development, evaluation and implementation of transport measures and projects. In traffic, a state of the art microsimulation program allows the production of an accurate image of what will probably happen if a certain measure is carried through, but for a proper picture to be produced, a prior calibration and validation is essential.

The main objective of this study is to generate a version of VISSIM (a German traffic microsimulation program) that can be used in Santiago and in a developing country environment that produces realistic results. The calibration will be applied for interrupted traffic (signalized intersections and priority intersections).

A revision of studies on calibration, and a sensitivity analysis experiment elaborated in this investigation, determined that there were five significant variables for calibration: additive part of desired safety distance, multiplicative part of desired safety distance, average standstill distance, desired speed distribution and simulation resolution.

These variables were calibrated using a Genetic Algorithm (G.A) optimization heuristic that was programmed with Microsoft Visual Studio, using data of a network in Macul, Santiago, that was collected with a low cost methodology elaborated for this study. The G.A. was also altered specially for this study so that the calibration time was reduced to the minimum.

The calibration results of this study allowed the Performance Index (P.I) analyzed to be reduced from a 54,08 % default error to a 9,32% error, which implies a reduction of 82,77%. Using the calibrated parameters, the validation procedure was carried out, and employing the same values on a different network for validation, the calibrated parameters allowed the P.I. analyzed to be reduced from a 24,11% default error to a 11,00% error, which implies a reduction of 54,38%, confirming that the calibration procedure is correct.

1. INTRODUCCIÓN

La simulación en ingeniería se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo y la posterior implementación de proyectos. Estos proyectos pueden ser de cualquier rama de la ingeniería desde la ingeniería eléctrica, hasta la ingeniería de transporte. En esta última área, la simulación es de particular importancia, ya que debido a la naturaleza de los proyectos de transporte, la mejor forma para poder ver su aplicabilidad y efectividad, es mediante simulaciones. Simular el comportamiento de un sistema de transporte permite ver si vale la pena implementar un nuevo proyecto, definir y diseñar científicamente y no intuitivamente que infraestructura es necesaria, optimizar el sistema y finalmente gestionar el sistema a medida que avanza el tiempo.

Para poder llevar a cabo una simulación, son necesarias principalmente dos cosas:

1. Una herramienta de simulación: por lo general, esta herramienta se trata de un software computacional que permite recrear la situación que se quiera simular de manera efectiva.
2. Que la herramienta sea adecuada: es decir debe ser capaz de recrear la situación simulada lo más cercano a la realidad posible. Para esto se requiere una calibración de la herramienta.

Para el caso de simulaciones de tráfico, existen varias herramientas computacionales que recrean la realidad para distintos contextos de transporte. Hay *software* que permite simular situaciones macro (por ejemplo el transporte de una ciudad completa) y, por otro lado, *software* que tiene como objetivo realizar simulaciones de escenarios micro (comportamiento individual de los conductores). En esta tesis será estudiado y utilizado el programa de simulación de transporte VISSIM, el cual permite realizar simulaciones microscópicas de tráfico urbano y transporte público, basadas en modelos de comportamiento.

1.1 Objetivos de la Tesis

Debido a la necesidad de VISSIM de ser calibrado para poder recrear de manera efectiva el comportamiento de los conductores, se calibrará y posteriormente validará la calibración realizada para garantizar que las posteriores simulaciones realizadas con el programa se apeguen lo máximo posible a la realidad del caso chileno. Esta calibración es necesaria ya que los conductores tienen comportamientos que difieren según la cultura de tránsito, las condiciones geográficas de las ciudades, los estados de ánimo, la frecuencia del control de transgresiones y la reacción ante vehículos en el tráfico.

El objetivo de este estudio se puede resumir de la siguiente forma:

“Generar una versión de VISSIM que pueda ser empleada en Chile y posiblemente en otros países en desarrollo con valores culturales semejantes, que produzca resultados realistas en las microsimulaciones de manera de poder evaluar proyectos de transporte de manera efectiva y correcta.”

Se busca que la calibración del programa permita simular el comportamiento real del tráfico, en especial de la ciudad de Santiago, lo máximo posible. Es de gran relevancia mencionar que el flujo para el cual se realizará la calibración es flujo interrumpido, lo que corresponde a intersecciones semaforizadas o propias de redes urbanas.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Definir qué parámetros calibrar. Los parámetros deben ser los que tengan mayor influencia en la disminución del error de la simulación.
- Seleccionar las intersecciones adecuadas para el estudio que permitan realizar el levantamiento de datos en terreno y posteriormente la validación de los parámetros calibrados.

- Levantamiento de datos que permita utilizar la información para la calibración de los parámetros.
- Simular las intersecciones seleccionadas de manera que se construya una red virtual lo más semejante a la realidad posible.
- Calibrar los parámetros utilizando la información recolectada en las intersecciones seleccionadas, de tal forma que estos valores minimicen el error entre los datos simulados y los datos reales.
- Validar los parámetros calibrados, comparando los resultados con datos reales que no hayan sido utilizados en la calibración.

1.2 Alcances

Los alcances de esta tesis son los siguientes:

- Se considerarán todos los autos como uniformes o promedios
- No se tomará en cuenta la influencia del transporte público
- No se considera la influencia peatonal en las intersecciones
- Se calibrarán solo los parámetros que se consideren de mayor relevancia y que tengan una influencia significativa en los resultados de la microsimulación.

1.3 Contenido

La presente tesis abarca 7 capítulos, incluyendo esta introducción. En el capítulo dos se entrega el marco teórico y el estado del arte del tema a exponer, resumiendo información relevante, de otros estudios, a fin de desarrollar el tema. El análisis de

sensibilidad, correspondiente al capítulo tres, consiste en la determinación de las variables de mayor relevancia en el programa de microsimulación, para definir qué variables serán calibradas. La definición de las redes que serán utilizadas y el levantamiento de datos constituyen el capítulo cuarto, junto con la metodología que se usará para dicho levantamiento y el procesamiento de los datos levantados. El quinto capítulo describe la selección de la heurística que se empleará y cómo funciona la heurística de optimización de algoritmos genéticos. El sexto capítulo corresponde a la calibración de los parámetros seleccionados en el capítulo tres, de manera de minimizar el error de la simulación en la red seleccionada y la posterior validación de los parámetros calibrados. Finalmente, el capítulo séptimo entrega las principales conclusiones del estudio y recomendaciones para el uso de la investigación realizada y para futuras investigaciones.

2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El uso que generalmente se le da a un software de simulación es para crear una situación que no existe en el mundo real. Esta creación puede tener distintas utilidades, puede ser para generar algo completamente nuevo, para modificar algo ya existente, o para recrear de la manera más certera posible la realidad. Para el caso de las primeras dos razones mencionadas, es esencial que el *software* utilizado, efectivamente logre recrear el comportamiento que tendría el contexto simulado en una situación real, y por ende, la cualidad de emular el comportamiento en un contexto real es fundamental. El correcto funcionamiento de un programa de simulación, cuando este es ocupado en el contexto de recrear una situación real, depende directamente de la calibración del mismo.

En este capítulo, se abordarán los conceptos necesarios para entender a cabalidad lo realizado en esta investigación y se analizarán trabajos anteriores realizados relacionados con el presente estudio, de manera de poder entender de mejor manera el problema analizado.

2.1 Definiciones Previas

Para poder llevar a cabo este estudio, es necesario, en primera instancia, tener claro ciertos conceptos claves que serán tratados a lo largo de esta disertación.

Se planteó en el capítulo I, que el objetivo general de la presente investigación es:

“Generar una versión de VISSIM que pueda ser empleada en Chile y posiblemente en otros países en desarrollo con valores culturales semejante que produzca resultados realistas en las microsimulaciones de manera de poder evaluar proyectos de transporte de manera efectiva y correcta.”

Para la generación de una versión de VISSIM utilizable en el contexto planteado, es necesaria la calibración del programa para ese contexto. A su vez, para poder calibrar el programa, es necesaria la simulación de una red de intersecciones que permita

comparar el comportamiento de los usuarios de la red generado por el programa con el comportamiento observado en terreno, para así encontrar los valores de los parámetros a calibrar.

Con el objetivo de tener claro el significado de los conceptos de simulación, calibración y validación a lo largo de toda esta disertación, se definen estos conceptos a continuación:

- **Simulación:** Según Shannon & Johannes (1976) corresponde al “...proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias - dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema”. En el contexto de esta investigación, el sistema se refiere a una red de transporte y el comportamiento de los usuarios de este sistema, específicamente los vehículos.

- **Calibración:** Basándose en la definición realizada por Velasco (2004), el término “calibración” se define como el ajuste de los parámetros de un modelo de simulación para que haya semejanza en el comportamiento del modelo con lo observado en la realidad. En el contexto de esta investigación, el comportamiento que se busca a emular es el de los vehículos de la red de transporte.

- **Validación:** Basándose en la definición realizada por Velasco (2004), el término “validación”, dice relación con el ajuste entre las salidas o resultados de la simulación de una red de transporte y lo observado en la realidad, para una red que no haya sido utilizada en el proceso previo de calibración.

Es relevante mencionar que, en los objetivos de esta investigación, cuando se habla de microsimulaciones, se refiere a las simulaciones realizadas por un programa de simulación microscópica. Simulación microscópica, es una de tres categorías de simulación que se utilizan comúnmente en transporte. A continuación se presentan sus definiciones basadas en las realizadas por Velasco (2004) y lo visto en Modelos de Tráfico Avanzado (PUC, 2013):

- **Macroscópico:** corresponde a la simulación de un sistema de transporte con bajo nivel de detalle. Se generan reportes con características agregadas del sistema y no de manera individualizada, tales como flujos promedio, demoras promedio, velocidades promedio, etc.
- **Mesoscópico:** corresponde a la simulación de un sistema de transporte con un nivel de detalle medio, existiendo diferencias entre los diversos tipos de vehículos y estos se simulan utilizando así mismo funciones de probabilidad.
- **Microscópico:** corresponde a la simulación de un sistema de transporte con un alto nivel de detalle, distinguiendo cada vehículo y peatón en todo momento de la simulación, pudiéndose obtener una gran información de lo que realiza cada agente que participa en la simulación.

2.2 Programas de Simulación Microscópica de Transporte

VISSIM es un programa de simulación microscópica de transporte, por lo que es relevante tener conocimiento de qué otro software existe en la actualidad para realizar lo mismo que hace este y hacer una comparación entre ellos para comprender con qué se está tratando.

Distintas comparaciones de programas de simulación microscópica de transporte son realizadas en la literatura, por lo que la comparación realizada en este estudio, será en base a estudios que se han enfocado anteriormente en este aspecto. Esto, principalmente debido a la carencia de licencias para poder comparar los programas disponibles en la actualidad de manera directa. Por otro lado, debido a que los programas de microsimulación de transporte van constantemente evolucionando en el tiempo, la revisión realizada en esta sección será en orden cronológico de las publicaciones disponibles.

En el estudio de calibración realizado por Jobanputra & Vanderschuren, (2012), estos hacen referencia a la comparación de programas realizada por Bernauer et al., (1998), llevada a cabo en Europa, enfocada exclusivamente a la comparación de

modelos de simulación de transporte en el contexto europeo. Además de hacer referencia a otras investigaciones, los autores llegan a que no hay conclusiones definitivas con respecto a que programa es mejor, y escogen su programa en base a las necesidades puntuales del estudio.

El estudio realizado por Gao (2008), desarrolla una metodología de calibración para los programas CORSIM, AIMSUN, PARAMICS, VISSIM e INTEGRATION. De este análisis concluye que los modelos de seguimiento vehicular de Gipps y de Van Aerde logran capturar con mayor flexibilidad las características de los autos y red. Luego realiza un segundo análisis, comparando la lógica utilizada por los programas VISSIM e INTEGRATION. Plantea que ambos modelos utilizados tienen la capacidad de configurar la voluntad de los vehículos de pasar en luz amarilla, ambos pueden considerar una pérdida de la capacidad en la descarga de una cola cuando se utilizan restricciones de aceleración, pero INTEGRATION logra emularlo de mejor manera, alcanzando un error de 7% con respecto a los datos en terreno.

Finalmente, debido a la ambigüedad existente para determinar el “mejor” programa, VISSIM fue seleccionado por razones que escapan de las características técnicas que este pueda tener o carecer. La selección de VISSIM fue realizada debido a la necesidad de tener disponible un nuevo programa de microsimulación para realizar estudios de tráfico. No se encontró en la literatura actual el uso, ni la calibración de VISSIM 5.4 para Santiago, ni para alguna ciudad en Chile, incluso ninguna ciudad de Sudamérica.

2.3 Descripción de VISSIM

Según la descripción que aparece en el manual de usuario de VISSIM (PTV Planung Transport Verkehr AG, 2012), se puede decir que es “... un modelo de simulación microscópica, con pasos de tiempo, basado en el comportamiento, desarrollado para modelar operaciones de tráfico urbano y transporte público”.

Este programa fue desarrollado por la empresa alemana PTV (Planung Transport Verkehr AG) y la versión utilizada en esta investigación corresponde a la 5.40, con

licencia de estudiante. Esta versión del programa tiene una interfaz gráfica que permite diseñar la red de transporte de manera práctica y gráficas de simulación en 2D y 3D.

El nivel de detalle que se puede especificar en el programa es alto, permitiendo una amplia gama de análisis para variados problemas de transporte privado y/o público, considerando la configuración de pistas, la composición de tráfico, la señalética de las vías, las paradas de transporte público, la afluencia de peatones a las intersección y paraderos, vías exclusivas, entre otras características que puede tener un problema de transporte.

2.3.1 Modelo de Simulación

El proceso de simulación realizado por VISSIM está conformado por dos partes distintas, una que se encarga del movimiento de los vehículos en la red y otro que maneja el control de tráfico de la red. A continuación se presenta un esquema que resume el funcionamiento de este proceso.

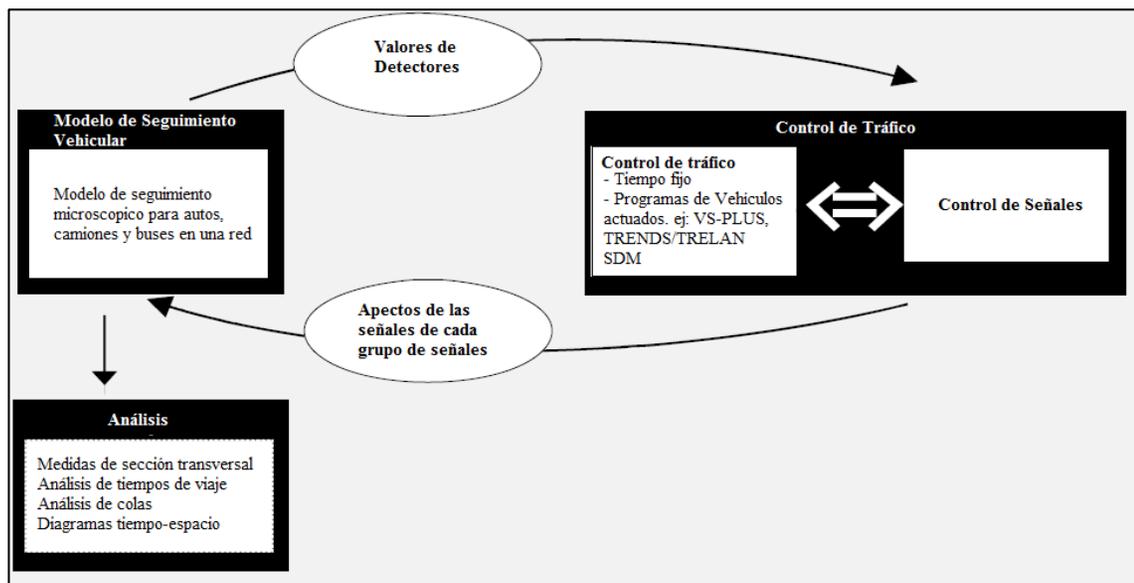


Ilustración 1: Esquema del proceso de simulación. Fuente: Manual Vissim 5.40 2012

Como se puede ver en la ilustración 1, se produce una interacción iterativa entre ambos modelos, donde hay un intercambio de información del flujo de la red mediante el “valores de detectores” y una actualización del estado de los controladores de tráfico.

El modelo de flujo de tráfico es compuesto, a su vez, por cuatro componentes: el modelo de seguimiento vehicular, el modelo de cambio de pistas, el modelo de comportamiento lateral y el modelo de control de señales. Los modelos mencionados serán detallados más adelante. Por otro lado, el control de tráfico utiliza un modelo de tiempo discreto, de un décimo de segundo, procesando la información que entrega el modelo de flujo de tráfico y entregando a su vez el estado de las señales de la red involucrada para el momento en cuestión.

a) Modelo de Seguimiento Vehicular, Tráfico Urbano

VISSIM utiliza un modelo de seguimiento vehicular psico-físico para describir el comportamiento de los conductores de la red, el cual fue desarrollado por Rainer Wiedemann en 1974 en la KIT (Karlsruhe Institute of Technology), Alemania.

El modelo desarrollado por Wiedemann (1974) se basa en la suposición de que los conductores pueden encontrarse en 4 estados básicos: Flujo Libre, Acercamiento, Seguimiento y Frenado. Los cuatro estados son descritos, de manera resumida, a continuación.

1. Flujo Libre: El conductor no tiene influencia de otros vehículos delante de él, por lo que se enfoca en mantener su velocidad deseada.
2. Acercamiento: El conductor debe adaptarse a la velocidad inferior que lleva un vehículo al cual se está acercando, de tal manera que una vez que se alcance su distancia de seguridad deseada, la diferencia entre las velocidades de ambos vehículos sea cero.
3. Seguimiento: El conductor se enfoca en mantener una distancia y velocidad constante detrás de un vehículo. Debido a las imperfecciones en la conducción, este es un proceso iterativo de aceleración y desaceleración, donde la diferencia de velocidades entre ambos vehículos, oscila alrededor de cero.

4. Frenado: Corresponde a la aplicación de una desaceleración de mayor magnitud, que puede ser causada por el cambio de pista de un vehículo, o una desaceleración grande del vehículo en frente.

Todos los estados son transitorios, cambiándose de uno a otro dependiendo de las condiciones de tráfico en las que se encuentre un vehículo en particular. La transición entre los estados puede ser explicada de la siguiente forma: El modelo se basa en el concepto de que los conductores desean ir a distintas velocidades, dependiendo de sus características personales y el vehículo que manejen, por lo que cuando un conductor se acerca a un vehículo que va a menor velocidad que la que desea llevar (paso de Flujo libre a Acercamiento), este se acerca a él hasta una distancia determinada, y dado que no conoce la velocidad del vehículo de adelante, desacelera a una velocidad menor que la del vehículo predecesor hasta una distancia determinada, para luego acercarse nuevamente hasta llegar a un punto donde tiene que desacelerar de nuevo. Este proceso iterativo se va repitiendo hasta que el conductor del vehículo que va atrás alcanza una distancia y una velocidad adecuada, que en el caso de no poder adelantar, sería la velocidad del vehículo predecesor (Seguimiento).

A continuación se presenta un cuadro que ilustra las reacciones que tendría un vehículo dada las distintas distancias de acercamiento y diferencia de velocidades.

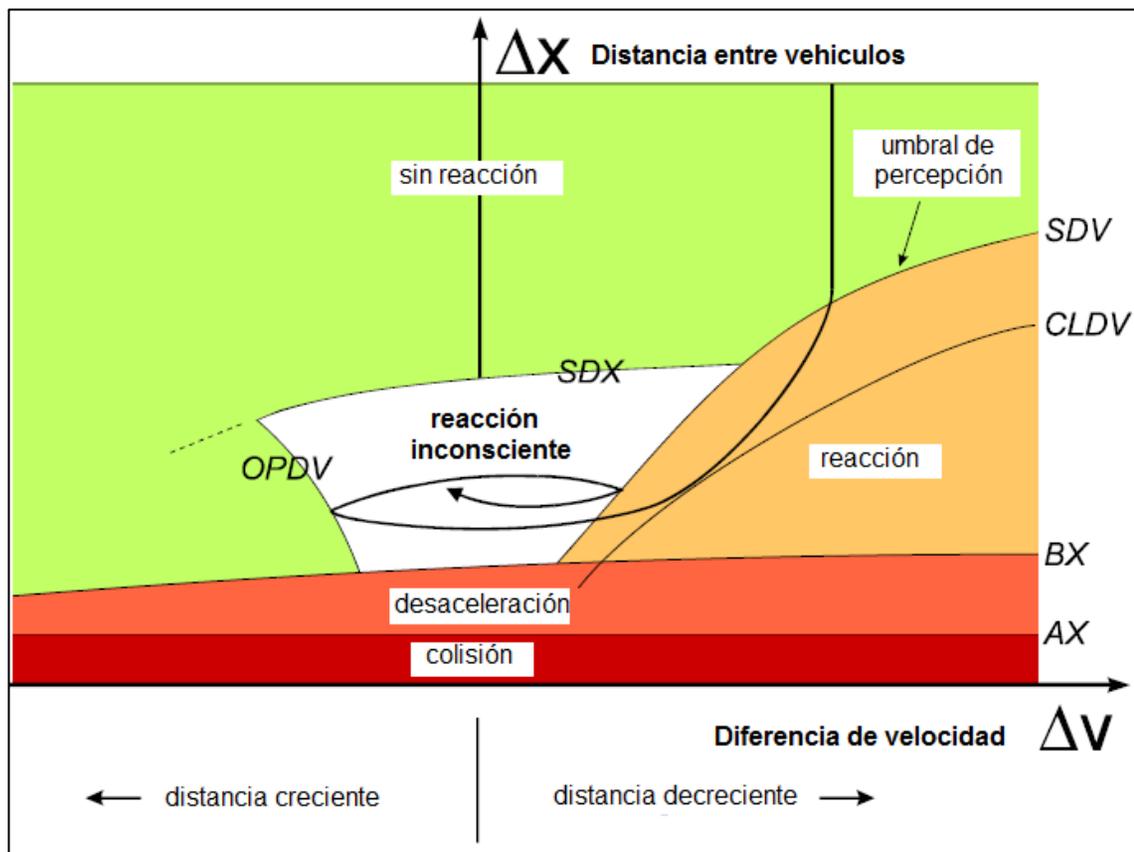


Ilustración 2: Modelo de seguimiento vehicular. Fuente: Manual Vissim 5.40

El eje de las ordenadas corresponde a la distancia a la cual se encuentra un vehículo del parachoques trasero del vehículo delante de él, y el eje de las abscisas es la diferencia de velocidad entre el vehículo que se acerca y el vehículo de adelante. La zona verde representa las condiciones en las que el vehículo que se acerca no tiene reacción alguna debido a que aún se encuentra muy lejos o va menor velocidad (Flujo Libre). La zona beige representa las condiciones bajo las cuales el vehículo que se acerca comienza a reaccionar ante la presencia de un vehículo delantero (Acercamiento). La zona roja clara representa las condiciones en las que el vehículo que se acerca debe desacelerar para evitar una colisión, que depende principalmente de la cercanía con el otro vehículo (Frenado) y la zona roja son las condiciones bajo las cuales se produce una colisión entre ambos vehículos. Finalmente, la zona blanca representa las condiciones bajo las cuales el vehículo que se acerca entra en el proceso iterativo de acelerar y

desacelerar de manera inconsciente para encontrar una distancia y velocidad deseada para llevar detrás del vehículo que tiene en frente (Seguimiento). Se puede apreciar en la figura los distintos estados de un vehículo que se acerca a otro mediante la flecha negra que entra por la parte superior derecha de la zona verde. Lo que ocurre es que el vehículo se va acercando a velocidad constante a otro, hasta alcanzar una distancia a la cual comienza a disminuir gradualmente su velocidad, hasta entrar a la zona de reacción inconsciente, para finalizar acelerando y desacelerando hasta alcanzar una distancia y velocidad deseada.

Los principales parámetros asociados al modelo de Wiedemann (1974) son los siguientes:

1. Distancia de detención promedio (ax): corresponde a la distancia, deseada por el conductor, a la cual se mantiene en estado de detención. Esta variable tiene una variación fija de ± 1 metro.
2. Parte Aditiva de la distancia de seguridad deseada (bx_{add}) y parte multiplicativa (bx_{mult}): Ambos parámetros afectan el cálculo de la distancia de seguridad.

La distancia entre dos vehículos consecutivos (d) es calculada de la siguiente manera:

$$d = ax + bx \quad (2.1)$$

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} \cdot z) \cdot \sqrt{v} \quad (2.2)$$

Donde v es la velocidad del vehículo en $\frac{m}{s}$, y z un valor entre 0 y 1 que tiene una distribución Normal con una desviación estándar de 0,15. Según Miller (2009), esta fórmula es utilizada para calcular la distancia entre dos vehículos consecutivos en todo momento, alterando con este resultado, la aceleración y el deseo de sobrepasar el vehículo.

Aparte de los parámetros descritos anteriormente, existen una serie de parámetros que son complementarios al modelo de Wiedemann y afectan el seguimiento vehicular. Estos son:

- Distancia de visibilidad hacia adelante (*Look ahead distance*): corresponde a la distancia que un vehículo puede mirar hacia adelante para reaccionar ante la presencia de otros vehículos en su mismo arco, ya sea en su pista o en pistas a los lados. Tiene como valores de entrada, un máximo y un mínimo.
- Distancia de visibilidad hacia atrás (*Look back distance*): corresponde a la distancia que un vehículo puede mirar hacia atrás para reaccionar ante la presencia de otros vehículos en su mismo arco. Tiene como valores de entrada, un máximo y un mínimo.
- Falta de atención temporal (*Temporary lack of attention*): corresponde a un valor de tiempo en el que un vehículo no tiene reacción debido a la presencia de un vehículo adelante. Este parámetro tiene asociada una probabilidad de ocurrencia.
- Comportamiento de acercamiento suave (*Smooth close-up behavior*): es un parámetro binario que, en el caso de estar activado, hace que los vehículos disminuyan su velocidad de manera “más suave” al acercarse a un objeto detenido. Si el parámetro no está activado, se regirá por el comportamiento de seguimiento vehicular estándar.
- Distancia en detención para obstáculos estáticos (*Standstill distance for static obstacles*): es un parámetro binario que, en el caso de estar activado, hace que los vehículos se mantengan a una distancia, aguas arriba, de todo objeto estático excepto señalética de paradas como signos pare, ceda el paso, paraderos de transporte público, entre otros. La magnitud de esta distancia es fijada por el modelador.

b) Modelo de Cambio de Pistas

El modelo de cambio de pistas utilizado por VISSIM, fue inicialmente desarrollado a partir del modelo elaborado por Willmann y Sparmann en 1978 según Gao (2008). Este se puede dividir en dos tipos: Cambios de pista necesarios y cambios de pista libres. El primero ocurre cuando un vehículo que va por una vía necesita doblar por el siguiente conector, y el segundo se debe a que un vehículo puede querer adelantar a otro por desear llevar una mayor velocidad o porque hay más espacio en otras pistas. En ambos casos, se puede estar cambiando a una pista de mayor velocidad o de menor velocidad (Gao, 2008).

En los dos casos, lo primero que se hace es ver si hay un *gap* (intervalo de tiempo) aceptable en el flujo de la pista a la cual se va a cambiar. Este *gap* depende tanto de la velocidad del vehículo que se está cambiando de pista, como del vehículo que se encuentra en la pista nueva que viene detrás del vehículo que se cambia.

En el caso particular de los cambios de pista necesarios, los parámetros de comportamiento involucrados son la desaceleración máxima aceptable, para ambos vehículos en cuestión, y la distancia con el conector por el cual se quiere ingresar. En el caso de los cambios de pista libres, se revisa la distancia de seguridad deseada del vehículo en la pista a la cual se está cambiando el vehículo. Esta distancia depende de la velocidad de ambos vehículos.

En adición a estos parámetros, existen varios más que son descritos en mayor detalle en los manuales de VISSIM.

c) Modelo de Comportamiento Lateral

El comportamiento lateral hace referencia a como se ubican los vehículos dentro de la pista en la que se encuentran, permitiendo de esta forma definir si se pueden hacer adelantamientos en la misma pista (motocicletas por ejemplo) y finalmente simular de manera más precisa la forma en que los vehículos se ubican en la realidad.

Este modelo sirve principalmente para modelar el comportamiento que tienen ciclistas y peatones en interacción con los vehículos. Debido a las características que se están modelando en este estudio, no se considera este tipo de interacciones, porque no son de gran relevancia los parámetros involucrados, por lo que a priori, no se calibrarán.

Para ver más de los parámetros involucrados en la modelación de este movimiento, revisar el manual de VISSIM 5.4.

d) Modelo de Control de Señales

Este modelo representa el comportamiento que tienen los vehículos ante la presencia de una intersección semaforizada. El comportamiento ante un semáforo se divide en tres: reacción ante una luz amarilla, comportamiento ante una señal roja o amarilla y la reducción de la distancia de seguridad cerca de una línea de parada.

- **Reacción ante una luz amarilla:** define el comportamiento de los choferes según dos modelos de decisión, revisión continua y decisión única. El primero consiste en que los vehículos asumen que la luz amarilla se mantiene de esa forma durante 2 segundos y continuamente deciden si seguir adelante hasta que pasan el semáforo. El vehículo no frena, a menos que no pueda pasar la señal dentro de los 2 segundos manteniendo la velocidad que lleva. El segundo consiste en una función de regresión logística con la velocidad actual del vehículo (v) y la distancia del vehículo a la línea de parada (dx) como variables independientes y tres parámetros (α, β_1, β_2). La probabilidad de que el vehículo se detenga ante la luz amarilla se calcula de la siguiente forma:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta_1 v + \beta_2 dx}} \quad (2.3)$$

- **Reducción de la distancia de seguridad cerca de una línea de parada:** el programa da la opción al programador de ingresar un factor de reducción a la distancia de seguridad de los vehículos cuando estos se acercan/alejan a/de una línea de parada.

2.4 La Calibración

La calibración de modelos de simulación es una práctica necesaria e investigada a través de la literatura. Esta sección se enfoca particularmente en el estado del arte referente a las calibraciones realizadas para programas de microsimulación de tráfico, centradas en VISSIM.

2.4.1 Investigaciones Relevantes Existentes

a. Calibración de VISSIM para Autopista de Shanghai usando Algoritmo Genético

Esta investigación de Zhizhou et al., (2005) utiliza un método de optimización llamado algoritmo genético, para calibrar parámetros determinados del modelo de seguimiento en autopistas de VISSIM con el objetivo de disminuir el error de modelación para la velocidad simulada y observada. La recolección de la información en la autopista es realizada mediante un sistema llamado ICICS (*Inner City Information Collecting Systems*), que permite levantar información en tiempo real del flujo, la velocidad, el tipo de vehículo, la ocupación y el *headway* para cada pista en intervalos de 20 segundos. También registraron grabaciones de la hora punta diaria y realizaron mediciones en terreno para complementar la información entregada por ICICS.

Para la calibración, determinaron que los parámetros más importantes basados en experiencia propia y características de la carretera. Son: Velocidad Deseada en Área de Velocidad Reducida, Distancia de Cambio de Pistas Deseada, CC0, CC1 y CC2. Los tres últimos parámetros mencionados corresponden al modelo de seguimiento enfocado a tráfico en carreteras, Wiedemann 99, que está presente como alternativa al Wiedemann 74 que se ocupa en caso de tráfico urbano.

El software encargado de la calibración es separado en tres módulos: VISSIM, módulo de Control y módulo de Algoritmo Genético. VISSIM corre las simulaciones, el Modulo de Control permite la interacción entre VISSIM y el Modulo de Algoritmo Genético, y el Módulo de Algoritmo Genético realiza la calibración de los parámetros.

Una vez calibrados los parámetros, los valores de las velocidades y flujos promedio simulados, con respecto a los observados en terreno, alcanzaron un error de tan solo 0,84% y 1,86% respectivamente, lo cual es asombrosamente bueno comparado con los estudios realizados para calibraciones de programas de microsimulación de tráfico en Chile (Lacalle, 2003; Velasco, 2004; Espinoza, 2004).

b. Calibración de Parámetros del Modelo de Simulación VISSIM basado en el Experimento Ortogonal

En esta investigación de Yongzheng et al. (2007), los autores parten haciendo alusión a los distintos tipos de experimentos de calibración existentes en la literatura para Vissim, entre los cuales se encuentran experimentos basados en muestreo *Latin Hypercube* (B. B. Park & Schneeberger, 2002b), o basados en el uso del flujo vehicular en una carretera (Gomes & Horowitz, 2004) en algoritmo genético (Yu et al., 2006) y en *simulated annealing* (Zhizhou et al., 2005).

Yongzheng et al. (2007), propone una calibración que debiese tener una metodología más simple para encontrar los valores de los parámetros a calibrar, pero que considere complejidades intrínsecas de una intersección conflictiva, considerando factores como las personas, vehículos, las calles y el ambiente, entre otras.

Se propuso disminuir el error entre la demora promedio medida y la simulada de los vehículos que entran a la intersección de todas las direcciones. Para esto, se seleccionaron 5 parámetros para calibrar: Vehículos Observados, *Headway* Mínimo, Distancia Promedio en Detención, Parte Aditiva de la Distancia de Seguridad y Parte Multiplicativa de la Distancia de Seguridad. Estos corresponden a parámetros del modelo de seguimiento vehicular y del modelo de cambio de pistas utilizados por VISSIM los cuales fueron explicados en secciones anteriores.

Una vez realizada la selección de parámetros a calibrar, se determinó 5 niveles para los valores de cada parámetro (depende del rango de valores que puede tomar cada variable) y crean una tabla ortogonal de 5 factores (parámetros) y 5 niveles. Posterior a esto realizan la simulación en VISSIM con los valores de la tabla. Con un procedimiento

de selección, se jerarquiza que factor es más influyente que otro, para darle prioridad en la calibración. Después de probar todos los conjuntos de parámetros de la tabla, hacen una selección del mejor conjunto de valores.

Los autores afirman haber alcanzado el error aceptado fijado por ellos (5%) para las demoras, calibrando tanto para los vehículos motorizados, no motorizados y peatones de la intersección Zhongshan y Jianshe, ubicado en la ciudad de Shijiazhuang .

c. Calibración y Validación de un modelo de Simulación Microscópico: Un Caso de Estudio de VISSIM para un Sistema Semaforizado Actuado Coordinado

Esta investigación de B. B. Park & Schneeberger (2002a), se plantea un procedimiento para la calibración y validación de VISSIM para un caso de estudio de la Ruta 50 en Fairfax, Virginia, Estados Unidos. La sección seleccionada consiste en una arteria (la Ruta 50) y 12 semáforos coordinados entre Sully Road y el Fairfax County Parkway.

El procedimiento propuesto consiste en nueve pasos: la determinación de las medidas de desempeño, la recolección de datos, la identificación de parámetros de calibración, el diseño experimental, la simulación, el desarrollo de una función de superficie, la determinación de los parámetros basados en la función de superficie, la evaluación de los parámetros y la recolección de nueva información para la validación.

Se definió dos medidas de desempeño, una para calibración y otra para validación. Para la calibración, se utiliza los tiempos de viaje y para la validación el largo de cola máximo. La recolección de información fue realizada con información del Departamento de Transporte de Virginia (VDOT), Gestión de Sistema de Información para el Transporte (MIST), y levantamiento de datos en terreno, con conteos manuales y grabaciones. Los parámetros seleccionados para la calibración fueron: distancia de frenado de emergencia, distribución de velocidad deseada, distancia de cambio de pistas, número de vehículos observados, distancia promedio en detención, parte aditiva de la distancia deseada de seguridad, tiempo de espera antes de la difusión y el *headway* mínimo. No existe un análisis de sensibilidad para la selección de estos parámetros.

El diseño experimental consiste en un *Latin Hypercube*, que provee un arreglo ortogonal que extrae una muestra del universo de posibles valores de los parámetros, de tal forma que abarca todo el universo de manera equiprobable. Este tipo de muestreo asegura que el rango posible, de todas las variables, sea muestreado. El diseño consistió en 124 casos, para los 8 parámetros teniendo 3 rangos por parámetro.

Para las simulaciones, se utilizaron 5 semillas por caso, obteniendo una corrida promedio para cada caso. Luego, se creó un modelo de regresión lineal con el programa S-Plus, utilizando 6 de los 8 parámetros (se excluyeron la distribución de velocidad deseada y parte aditiva de la distancia deseada de seguridad) de calibración como variables independientes y el tiempo de viaje simulado como variable dependiente. Utilizando el modelo de regresión lineal y la aplicación Solver de Excel, se obtuvieron 8 combinaciones de parámetros candidatos, para los cuales se hicieron corridas con 50 semillas para cada uno, comparando la distribución obtenida con la medida en terreno. Con test-t se determinó si los resultados simulados eran estadísticamente iguales a los datos de terreno. En la mayoría de los casos, el test indicaba que las distribuciones de velocidad eran distintas. Por otro lado, se debe evaluar la visualización de la simulación de los parámetros, y que esta reproduzca, lo más fiel posible, lo observado en terreno. Con ambos criterios en cuenta, se eligió el mejor set de parámetros. Para la validación, se simuló el set seleccionado con 100 semillas, obteniendo una distribución de colas máximas, y viendo donde caía la medida en terreno. Esta, estaba en el percentil 90 de la distribución obtenida.

d. Metodología para la Calibración de VISSIM en Tráfico Mixto

Esta investigación de Manjunatha & Vortisch (2012), plantea una metodología para la calibración de VISSIM en condiciones de tráfico mixto, la cual está caracterizada por tener múltiples tipos de vehículos, condiciones variables, carencia de disciplina en cambios de pistas, entre otras. La metodología planteada consiste en generar escenarios iniciales ocupando la técnica de muestreo *Latin Hypercube* y determinar el set de parámetros óptimo con un algoritmo genético. Esta además incluye la representación de

los vehículos, geometría y condiciones de tráfico de la intersección, y la selección de parámetros a calibrar. Como variable de calibración utilizaron las demoras observadas en terreno. Según Dowling et al. (2004), se puede considerar esta metodología como una calibración global, y sería local en el caso que se calibrara solo para una intersección. El modelo utilizado para la calibración fue el Wiedemann 99, seleccionando los parámetros CC0, CC1, CC2, CC7 y CC8 para la calibración, debido a los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, el cual no es detallado en la publicación. Con estos parámetros, se utilizó el algoritmo genético, obteniendo el conjunto de valores óptimos. Para la validación, la información fue levantada de la misma intersección, otro día. La composición de tráfico y el volumen de entrada fueron modificados, sin embargo, el resto de las variables se mantuvieron constantes. Los resultados obtenidos de la calibración son del orden de 2% de error para los datos de calibración y 5% para los de validación.

e. Calibración de un Programa de Microsimulación para una Ciudad China

Esta investigación de Jie et al. (2011) describe la importancia de los flujos de saturación y la distribución del tiempo de viaje en el proceso de calibración. Para realizar el estudio, se utilizan datos de 6000 taxis con GPS, grabaciones de cámaras y sensores de la red SCATS del sistema de control de tráfico. La calibración es llevada a cabo en secciones, la primera sección se encarga de la calibración de los parámetros de simulación para disminuir el error del flujo de saturación, y la segunda utiliza la trayectoria de los vehículos para calibrar la velocidad de flujo libre y las distribuciones de aceleración/desaceleración.

Para obtener la distribución de los tiempos de viaje, se utiliza la función analítica creada por Jie et al. (2011), que incorpora información de las señales de tráfico, el flujo, la velocidad de flujo libre y el flujo de saturación.

La distribución de los flujos de saturación fue determinada para 113 pistas en 13 intersecciones en el centro de Changsha, utilizando el Método de Regresión (MR),

teniendo como variables independientes el tamaño de la intersección, el ancho de pista y el volumen de tráfico. Obtuvieron un R^2 de 0,37, lo que es bastante pequeño.

La calibración de la distribución de velocidad deseada y aceleración fueron realizadas directamente de la información GPS. Para las velocidades, seleccionaron velocidades en secciones donde no hubiese cola. Para la calibración de aceleraciones se realizó un análisis de las trayectorias.

El principal resultado fue que calibrando estas distribuciones, los flujos de saturación fueron del orden de 950 veh/hr/pista, lo que es considerado bajo por los autores, y así mismo es nuestra opinión.

2.4.2 Discusión de Investigaciones Relevantes

Las investigaciones anteriormente presentadas tratan sobre calibraciones, y en algunos casos validaciones, de VISSIM en distintos contextos. A pesar que algunas se enfocaban en la calibración de carreteras, lo importante es centrarse en las técnicas de calibración utilizadas, independiente de qué ciudad se esté calibrando, o qué modelo de VISSIM se trata.

Cada una de estas investigaciones tiene características destacables y prácticas que se prestan para ser criticadas. Para poder comparar con la mayor objetividad posible, se han escogido 4 características clave en estos estudios: Información Utilizada, Método de Calibración, Selección de Parámetros y Resultados Obtenidos. A continuación se presenta una tabla que resume estas características para las 5 investigaciones analizadas con mayor detalle.

Pape r	Información Utilizada	Método de Calibración	Selección de Parámetros	Resultados	Variable de Calib.
a	ITS / Grabaciones	Algoritmo Genético	Experiencia Propia	1,86 % de error	Velocidad
b	No especificada	Experimento Ortogonal	No especifica	5 % de error	Demoras
c	ITS/Grabacione s/Manual	Latin Hypercube + Regresión Lineal	No especifica	-	Tiempos de viaje
d	Grabaciones	Latin Hypercube + Algoritmo Genético	Análisis de Sensibilidad	2 - 5 %	Demoras
e	GPS / Grabaciones / ITS	Método de Regresión	Análisis de Sensibilidad	-	Flujo de saturación

Tabla 2.1: Resumen de Investigaciones. Fuente: Elaboración propia.

En la columna de Información Utilizada, se refiere al origen de la información que se utilizó en el estudio para realizar la calibración. ITS ó *Intelligent Transport Systems*, fue utilizada como una generalización de los distintos sistemas de información de transporte que se presentan en tres de las investigaciones. Grabaciones se refiere a la utilización de cámaras de videos para obtener información de tráfico y Manual se refiere a que la misma investigación tuvo que ir a terreno a levantar estos datos con conteos, ya que no se poseía con información específica antes de la investigación.

El Método de Calibración, hace referencia a la técnica utilizada en el proceso de calibración. Algoritmo Genético es una heurística de optimización, Experimento Ortogonal es un tipo de muestreo al igual que *Latin Hypercube* y Regresión Lineal es una técnica estadística para crear modelos de estimación de variables.

La Selección de Parámetros hace referencia a como fueron elegido los parámetros del programa para calibrar, independiente del modelo que haya sido calibrado. Experiencia propia quiere decir que los parámetros fueron escogidos en base a la experiencia de los investigadores; Análisis de Sensibilidad se refiere a que se realizó un estudio para determinar cuáles son los parámetros más influyentes en el modelo, del cual se escogió un numero acotado; No específica quiere decir que en la publicación citada no aparece la forma en que se seleccionaron los parámetros de calibración.

Los Resultados, corresponden al nivel de error alcanzado una vez calibrado el programa. Para dos investigaciones, esta estadística no aplicaba, ya que el método de calibración no iba relacionado o simplemente la estadística no fue expuesta o considerada relevante en la investigación.

La Variable de Calibración (Calib.) hace referencia a la variable que se utilizó como medida de desempeño en el proceso de calibración. Se puede ver que para dos investigaciones se calibran los tiempo de demora experimentado por los vehículos y además que en ninguna se utiliza como variable de calibración el largo de cola.

Para el caso de la información recolectada, la mayoría de las investigaciones utilizan grabaciones que son proporcionadas por alguna entidad de transporte de la ciudad en la que se realizaba el estudio. Esto se debe a que las grabaciones permiten registrar la información de tráfico con mayor precisión, disminuyendo el error humano. A su vez, en el caso de estar disponibles, los estudios buscaban información complementaria de otras entidades de transporte y sistemas de información de transporte para tener la mayor cantidad de información posible, sin embargo, no en todas las ciudades es esto una opción. Es claro, que siempre es mejor tener la mayor cantidad y precisión de la información posible, por lo que se debiesen utilizar todos los recursos a disposición de la investigación.

Con respecto a los métodos de calibración utilizados, cada método tiene ventajas y desventajas. Los “Algoritmos Genéticos” (GA, por su nombre en inglés), según Michalewicz (1996), son:

“...algoritmos estocásticos cuyos métodos de búsqueda modelan fenómenos naturales: herencia genética y la lucha Darwiniana de sobrevivencia”

Son ampliamente utilizados en la literatura (Manjunatha & Vortisch, 2012; B. (Brian) Park & Qi, 2005; Zhizhou et al., 2005) para la calibración de VISSIM, y por lo general tiene buenos resultados. De la tabla anterior se puede ver que este método es utilizado en 2 de las 5 investigaciones, obteniendo resultados positivos en términos del error de calibración. En una de las instancias, fue complementada con un muestreo LH

(*Latin Hypercube*), el cual es un método de muestreo estadístico que asegura cubrir de manera equiprobable el universo valores (McKay, Beckman, & Conover, 1979). A su vez, este último, es utilizado como método para la calibración en una instancia, y en otra es complementado con el método de Regresión Lineal. El último método revisado corresponde al de Experimento Ortogonal, el cual es otro método de muestreo (Yongzheng et al., 2007). La ventaja del G.A. es que es un método de implementación simple y obtiene resultados favorables, por lo revisado anteriormente. En el caso de ocupar un diseño experimental basado en el método LH, la principal ventaja es que acota la cantidad de valores de parámetros a probar, asegurando cubrir el universo de posibilidades de la mejor manera posible. A su vez, el método de regresión lineal, también es de fácil implementación, pero no logra resultados que cumplan con los objetivos de esta investigación. Finalmente el Experimento Ortogonal, a pesar de ser simple y, en el caso de la investigación revisada, obtener buenos resultados, la extrema simpleza del modelo puede no entregar resultados tan favorables en otros casos de estudio.

Con respecto a la selección de parámetros, siempre es favorable para la investigación realizar un análisis de sensibilidad para determinar cuáles son las variables candidatas a la calibración. Es por esto, que todas las investigaciones debiesen tener un análisis de sensibilidad para este tipo de estudios. Sin embargo, debido a que este tema es muy estudiado, y una práctica constantemente realizada para investigaciones de calibración (Jie et al., 2011; Manjunatha & Vortisch, 2012), se podría eventualmente realizar un análisis de sensibilidad simple, y seleccionar las variables con información bibliográfica.

3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se mencionó, en el inicio de este documento, que la calibración de VISSIM sería realizada para parámetros generales del microsimulador, en condiciones de tráfico interrumpido (urbano). Este tipo de calibración tiene dos implicancias, la primera es que no serán calibrados todos los parámetros del programa, y la segunda es que es necesario definir que parámetros son los más relevantes en una calibración de este estilo. La primera implicancia se justifica debido a que la calibración de todos los parámetros no es necesaria para obtener resultados que reflejen de manera correcta el comportamiento de los usuarios en una red. Esto ha sido demostrado por diversas investigaciones pasadas, donde, al igual que en esta, solo se escogen ciertos parámetros claves para calibrar. La segunda implicancia justifica el análisis llevado a cabo en este capítulo, el cual permitirá seleccionar de manera adecuada los parámetros del programa que son más influyentes en la calibración de VISSIM.

Para llevar a cabo la selección de los parámetros a calibrar, se seleccionaron estudios realizados y se vieron que parámetros se han escogido en investigaciones de calibración pasadas. A partir de estos estudios, se busca hacer un análisis de sensibilidad eficiente, que permita definir de manera correcta los parámetros a calibrar en esta investigación.

Los estudios a analizar, fueron seleccionados debido a su similitud con la presente investigación y utilidad para lograr el objetivo que se planteó. Dicho esto, se tomaron en cuenta los estudios de Jie et al. (2011), Miller (2009), Otkovic et al. (2013) y Park & Qi, (2005).

A continuación, se presenta un cuadro resumen con el nombre de las variables que se calibraron en alguno de estos estudios, y si se realizó la calibración para dicha variable en un estudio determinado.

Parámetros	Otkovic et. al	Jie et al.	Miller	Park & Qi	Estudios
Parte aditiva de distancia de seguridad deseada (<i>Additive part of desired safety distance</i>)	SI	SI	SI	SI	4
Parte multiplicativa de distancia de seguridad deseada (<i>Multiplicative part of desired safety distance</i>)	SI	SI	SI	SI	4
Distancia en Detención promedio (<i>Average standstill distance</i>) (m)	SI	NO	SI	SI	3
Distribución de velocidad deseada (<i>Desired speed Distribution</i>) (km/hr)	SI	SI	NO	SI	3
Resolución de Simulación (Simulation Resolution) (sim_s/s)	SI	NO	NO	SI	2
Número de vehículos procedentes observados (<i>Number of observed proceeding vehicles</i>) (#)	SI	NO	NO	SI	2
Distancia máxima de vista hacia adelante (<i>Max look ahead distance</i>) (m)	SI	NO	NO	SI	2
Headway mínimo (<i>Minimum Headway</i>) (m)	NO	NO	SI	SI	2
Distancia mínima de vista hacia adelante (<i>Minimum look ahead distance</i>) (m)	SI	NO	NO	NO	1
Función de aceleración (<i>Acceleration Function</i>)	NO	SI	NO	NO	1
Distribución de largo de vehículo (<i>Vehicle length Distribution</i>) (m)	NO	SI	NO	NO	1
Máxima desaceleración propia (<i>Maximum deceleration own</i>) (m/s ²)	NO	NO	SI	NO	1
Desaceleración máxima seguidor (<i>Maximum deceleration trailing</i>) (m/s ²)	NO	NO	SI	NO	1
Factor de reducción de distancia de seguridad (<i>Safety distance reduction factor</i>)	NO	NO	SI	NO	1
Máxima desaceleración para frenado cooperativo (<i>Max. Deceleration for cooperative braking</i>) (m/s ²)	NO	NO	SI	NO	1
Distancia de cambio de pista (<i>Lanechange distance</i>)	NO	NO	SI	NO	1
Tiempo de Gap mínimo (<i>Min. Gap time</i>) (s)	NO	NO	NO	SI	1

Tabla 3.1: Resumen de Variables. Fuente: Elaboración propia.

Los estudios son ordenados en orden cronológico, siendo el más reciente el de Otkovic et al. (2013) y el más antiguo Park & Qi (2005). En las columnas asociadas a las investigaciones se encuentra un “SI” o un “NO”, el cual indica si se calibró ese parámetro en esa investigación. Por ejemplo, el parámetro “Resolución de Simulación” fue calibrado en dos de estos estudios (Otkovic et al., 2013 y Park & Qi, 2005) y no fue calibrado para los otros dos (Miller, 2009 y Jie et al., 2011). La columna “Estudios” corresponde a la cantidad de veces que han sido calibrados los parámetros en los distintos estudios, y los parámetros están ordenados en la tabla según esta cantidad,

estando los parámetros con mayor presencia en calibraciones arriba y con menor presencia abajo.

Este análisis preliminar de la literatura reciente, permite de manera inmediata enfocarse en los parámetros que históricamente han sido claves para la calibración de VISSIM en el pasado. Se determinó, que se haría un análisis de sensibilidad para los parámetros que se calibraran en más de un estudio, por lo que, el análisis de sensibilidad realizado, fue hecho para los primeros 8 parámetros de la tabla anteriormente presentada.

3.1 Procedimiento

Los parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad fueron:

1. Distancia promedio en detención (AXADD)
2. Parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT)
3. Parte aditiva de la distancia de seguridad deseada (BXADD)
4. Distribución de velocidad deseada (DESIREDSPEED)
5. Resolución de la simulación (SIMRES)
6. Número de vehículos observados hacia adelante (OBSERVEDVEHICLES)
7. Distancia máxima observada hacia adelante (MAXLOOKAHEAD)
8. Headway mínimo (MINHEADWAY)

La variable que será utilizada para la sensibilización de estos parámetros corresponde al largo de las colas de vehículos formadas. Se escogieron las colas, debido a que esta es la variable que se utilizará para realizar la posterior calibración, al igual que en estudios de calibración anteriormente realizados en Santiago (Espinosa, 2004; Velasco, 2004). A grandes rasgos, el análisis de sensibilidad, en este caso, consiste en ir variando el valor de un parámetro y ver cómo afecta esto a los resultados de una simulación con características que serán explicadas a continuación.

La red utilizada para ver la sensibilidad de estos parámetros, es la misma utilizada por Espinosa (2004), solo que es simulada en VISSIM. La red es conformada por una vía de 1 km de largo, de una pista, la cual tiene un semáforo en el metro 950. El semáforo tiene un ciclo de 78 segundos de largo, el cual se distribuye en 35 segundos de verde, 3 segundos de amarillo y 40 de rojo. Una imagen de la red utilizada se presenta a continuación.

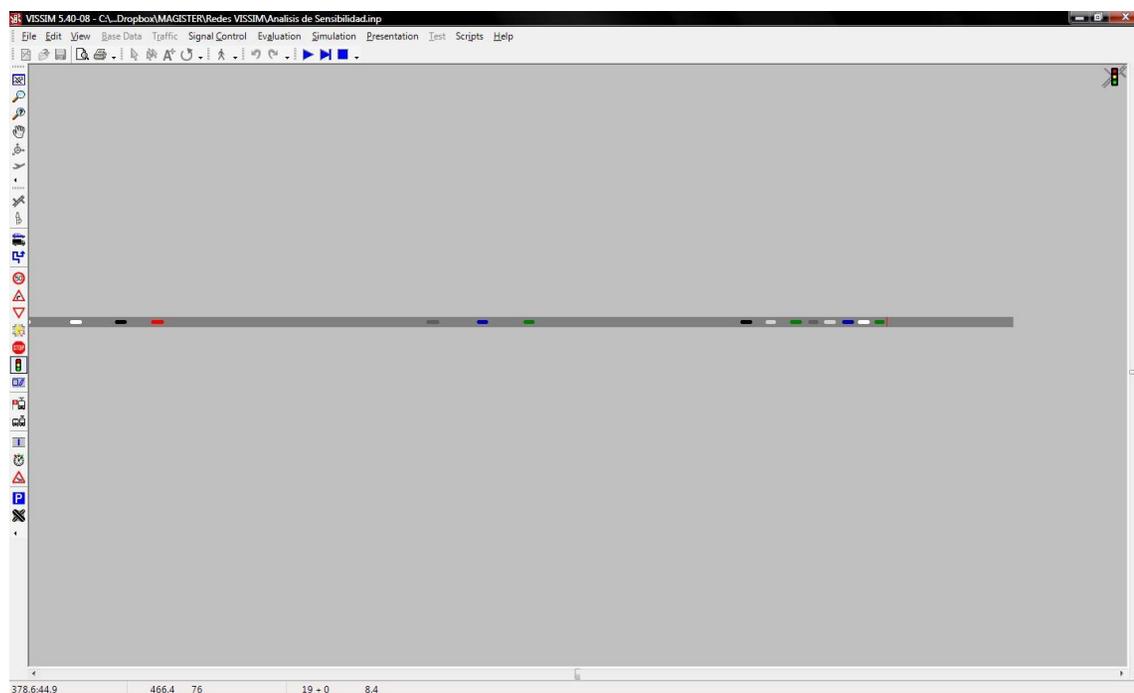


Ilustración 3: Red de Sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, la red no es más que una vía de una pista, con un semáforo llegando a su final. Las figuras de color representan vehículos del sistema. El sentido de circulación en este caso, es de izquierda a derecha, por lo que el primer vehículo (el vehículo verde), corresponde al primer vehículo de la cola formada por el semáforo (línea roja), que en este momento de la simulación, estaría conformada por 8 vehículos (del verde hasta el negro). El análisis corresponde a ver como varía la cola promedio en 1 hora de simulación a medida que se va cambiando el valor de uno de los parámetros siendo analizado.

Para determinar el flujo a utilizar, se fue probando con flujos desde 1800 vehículos/hora hacia abajo y se observó cómo se presentaba la cola en el arco. Se fue disminuyendo de a 200 vehículos/hora el flujo, hasta encontrar un valor donde no hubiese cola remanente (vehículos que no alcanzan a pasar en el siguiente ciclo del que llegan a la cola del semáforo) con los valores de los parámetros que vienen por defecto con el programa. Se llegó a que con 800 vehículos/hora no existe una cola remanente. También se probó con un flujo de 900 vehículos/hora, y al igual que en el caso anterior, no hay presencia de cola remanente.

Se determinó ocupar un flujo de 800 vehículos por hora debido a que así existe una mayor holgura con respecto a la capacidad que tiene la vía que con un flujo de 900 vehículos/hora, y de esta forma se puede apreciar de manera más clara el efecto que tiene el parámetro que es analizado, en la formación de colas. Además, se trabaja con un flujo cercano al de saturación debido a que en periodos de hora punta, los flujos por lo general son cercanos a saturación, incluso existiendo casos en que las vías están sobresaturadas, de esta forma se logra emular el efecto que tendrían los parámetros sobre las colas bajo estas condiciones.

El experimento consiste en analizar el comportamiento de las colas formadas, con todos los parámetros del programa en su valor por defecto, e ir variando uno de los 8 parámetros seleccionados para este análisis.

Cada simulación, en realidad consiste en 10 simulaciones distintas, cada una con una semilla distinta (semilla se refiere a las condiciones iniciales de la simulación que le dan la aleatoriedad a las distintas simulaciones), y el valor de la cola para ese conjunto de parámetros, consiste en el promedio de las colas obtenidas en cada una de estas 10 semillas. Se determinó el uso de 10 semillas, debido a que es necesario tener más de una para que los resultados sean representativos y según la investigación de Park & Won (2006), son necesarias 5 semillas para el caso de VISSIM, por lo que 10 son más que suficiente. Por otro lado, a pesar que en términos estadísticos, siempre es mejor tener la

mayor cantidad de semillas posibles, en términos de eficiencia computacional, no es así, debido a que correr cada semilla toma tiempo.

A continuación se presentan los gráficos de las colas obtenidas para los distintos valores de los parámetros, junto con el respectivo análisis de los resultados obtenidos, en el orden que se presentaron al principio de esta sección.

3.1.1 Distancia promedio en detención (AXADD)

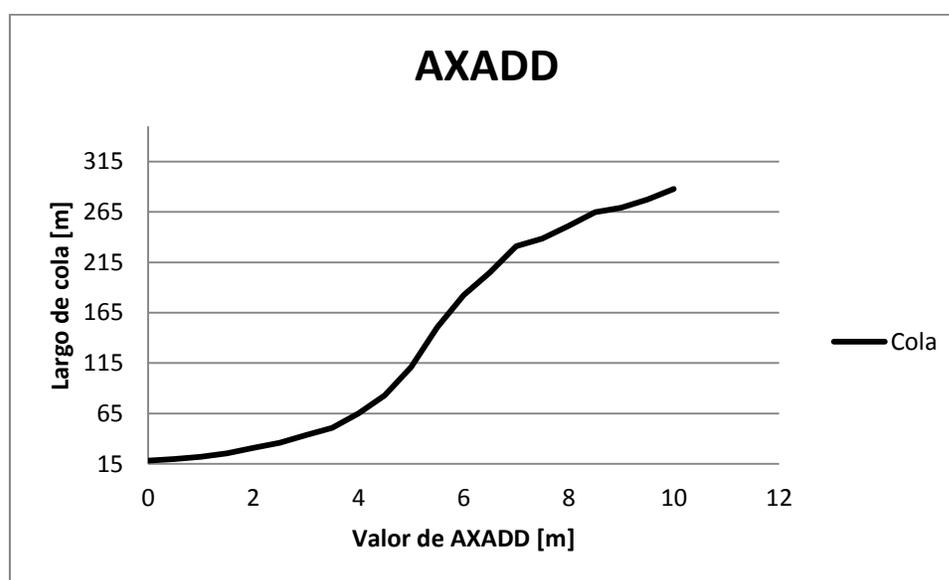


Ilustración 4: Gráfico AXADD. Fuente: Elaboración propia.

De todos los parámetros analizados, este resulta tener la mayor influencia en las colas de la simulación realizada, logrando estas tener un mínimo de 18,2 metros, un máximo de 287,8 metros, y una diferencia de 269,6 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 101,2 metros, dejando en evidencia la alta sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas.

Gráficamente se puede ver que el parámetro tiene una influencia positiva en el largo de la cola, creciendo esta última a medida que el parámetro aumenta de valor. Además, se puede apreciar su efecto no lineal sobre el largo de cola.

Debido a la influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que la distancia promedio en detención (AXADD) sea calibrada en la presente investigación.

3.1.2 Parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT)

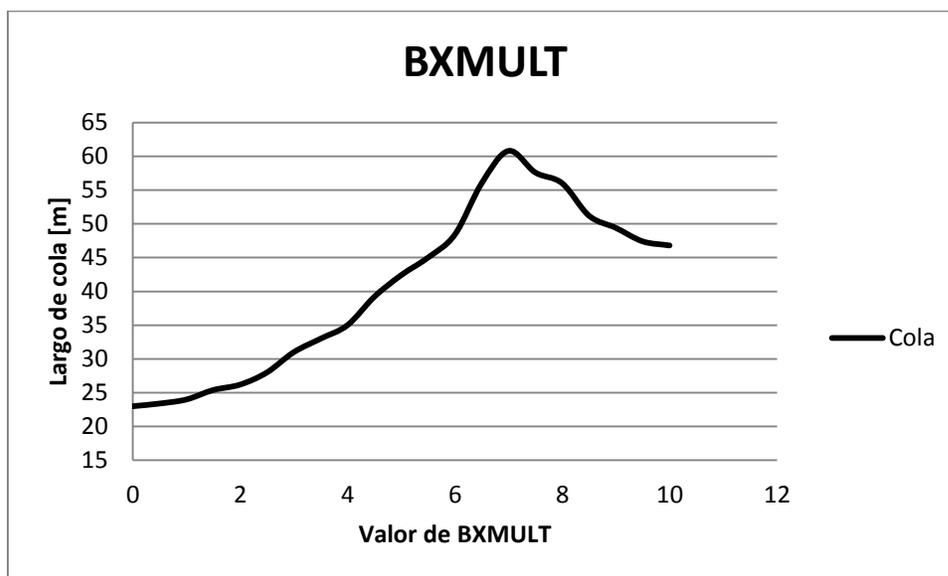


Ilustración 5: Gráfico BXMULT. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el tercero en términos de la influencia que tiene su valor sobre las colas de la simulación realizada, logrando estas tener un mínimo de 23 metros, un máximo de 60,8 metros, y una diferencia de 37,8 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 12,3 metros, dejando en evidencia la alta sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas, pero a su vez, de mucho menor incidencia que la distancia promedio en detención (AXADD).

Gráficamente se puede ver que el parámetro tiene una influencia positiva en el largo de la cola hasta alcanzar su máximo, cuando el parámetro toma un valor cercano a 7, para luego tener una influencia negativa sobre el largo de cola. Además, se puede apreciar su efecto no lineal sobre el largo de cola.

Debido a la influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que la parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT) sea calibrada en la presente investigación.

3.1.3 Parte aditiva de la distancia de seguridad deseada (BXADD)

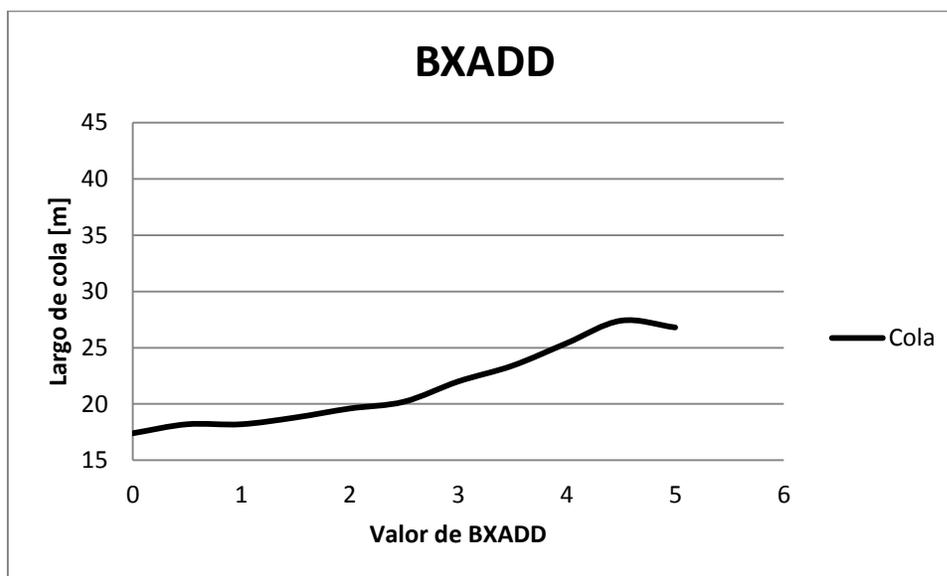


Ilustración 6: Gráfico BXADD. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el cuarto en términos de la influencia que tiene su valor sobre las colas de la simulación realizada, logrando estas últimas tener un mínimo de 17,4 metros, un máximo de 27,4 metros, y una diferencia de 10 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 3,5 metros, dejando en evidencia cierto grado sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas, pero a su vez, de mucho menor incidencia que la distancia promedio en detención (AXADD) y que la parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT).

Gráficamente se puede ver que el parámetro tiene una influencia positiva en el largo de la cola hasta alcanzar su máximo, cuando el parámetro toma un valor cercano a 4,5, para luego tener una influencia negativa sobre el largo de cola. Además, se puede apreciar su efecto no lineal sobre el largo de cola.

Debido a la influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que la parte aditiva de la distancia de seguridad deseada (BXADD) sea calibrada en la presente investigación.

3.1.4 Distribución de velocidad deseada (DESIREDSPEED)

Antes de entrar a analizar la influencia que tiene este parámetro sobre el largo de colas, es necesario entender de qué manera es representado en el programa. La distribución de velocidad deseada, es justamente eso, una distribución, y no un valor único y continuo como varios de los otros parámetros. VISSIM, buscando representar de manera más realista el comportamiento vehicular, no utiliza un valor único para la velocidad deseada de los vehículos dentro de su red, sino que ocupa una distribución de velocidad.

Por defecto, el programa viene con 15 distribuciones distintas de velocidad deseada, con máximos y mínimos diferentes (el mínimo define la velocidad deseada mínima que puede llegar a tener un vehículo en la red y el máximo define la velocidad deseada máxima que puede tener un vehículo en la red, no hay vehículos con velocidades deseadas menores al mínimo o mayores al máximo). La elección de la velocidad deseada de cada vehículo se realiza al ser creado el vehículo correspondiente, eligiendo una velocidad que esté dentro de la distribución seleccionada para la simulación.

Dicho lo anterior, lo que se está variando al hacer este análisis de sensibilidad, no corresponde a un valor único de velocidad deseada de todos los vehículos de la red, sino que la selección de la distribución de velocidad deseada de los vehículos de la red. Cada distribución tiene un número característico, que se puede interpretar como la velocidad que representa esa distribución en particular. En el gráfico presentado a continuación, el eje de las abscisas es el número característico de la distribución y el eje de las ordenadas corresponde, al igual que en todos los gráficos de la sección 3.1, al largo de cola, en metros, obtenido en las simulaciones.

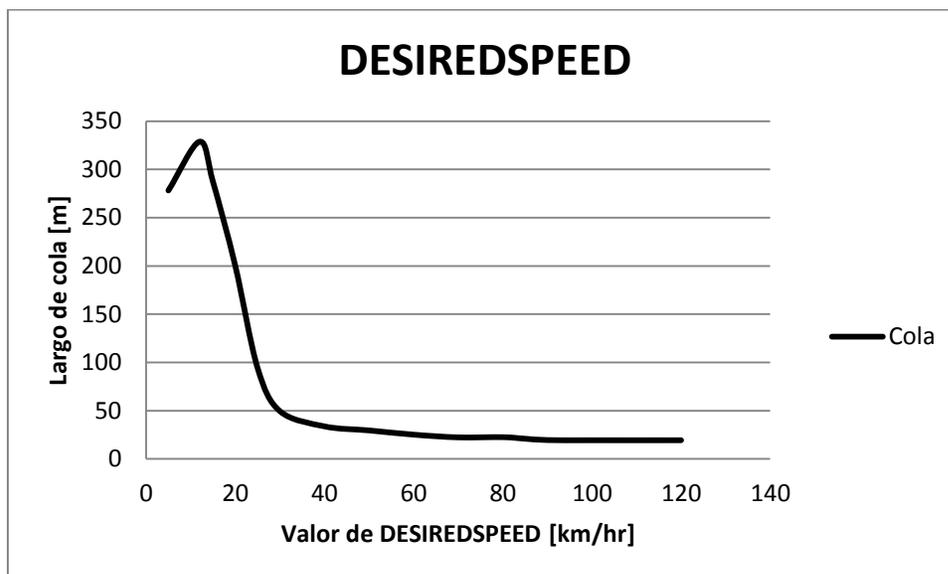


Ilustración 7: Gráfico DESIREDSPEED 1. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el que mayor influencia tiene sobre las colas de la simulación realizada, logrando estas últimas tener un mínimo de 19,4 metros, un máximo de 328,8 metros, y una diferencia de 309,4 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 108,5 metros, dejando en evidencia la alta sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas. Sin embargo, las distribuciones asociadas a velocidades bajas (inferiores a 25 km/hr) y velocidades altas (sobre 90 km/hr), no son realistas para representar tráfico urbano en condiciones normales, es por esto que a continuación se presenta un nuevo gráfico y un nuevo análisis estadístico que entrega mayor información con respecto al parámetro bajo análisis.

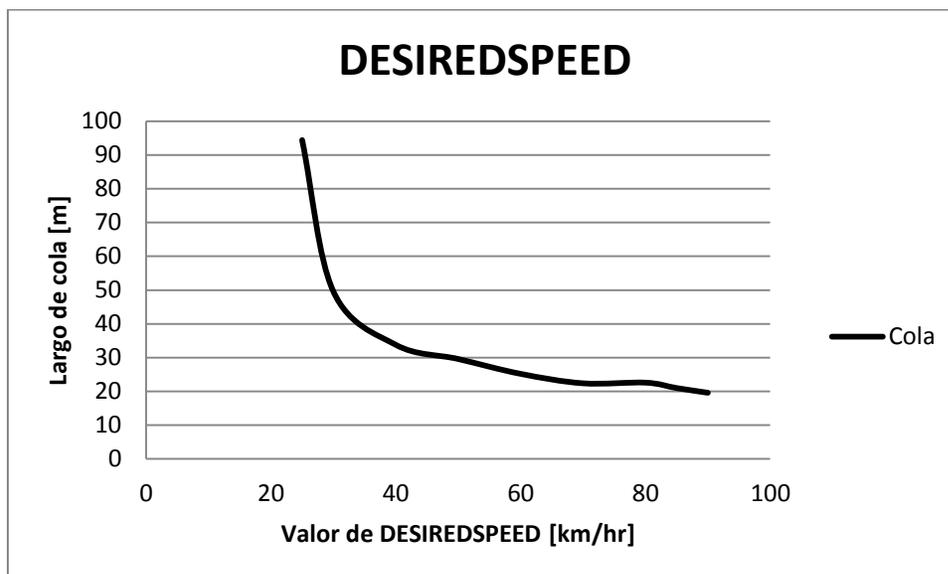


Ilustración 8: Gráfico DESIREDSPEED 2. Fuente: Elaboración propia.

Bajo estas nuevas condiciones, este parámetro sigue siendo uno de los que mayor influencia tiene sobre las colas de la simulación realizada, siendo el segundo en este aspecto. En las colas, tuvo un mínimo de 19,6 metros, un máximo de 94,4 metros, y una diferencia de 74,8 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola bajo estas condiciones corresponde a 22,6 metros, dejando en evidencia la alta sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas.

Gráficamente, se puede ver que el parámetro tiene una influencia negativa en el largo de la cola, alcanzando su máximo y mínimo en sus respectivos extremos, como es de esperarse. Además, se puede apreciar su efecto no lineal sobre el largo de cola, siendo comparable con una función de carácter exponencial.

Debido a la influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que la distribución de velocidad deseada (DESIREDSPEED) sea calibrada en la presente investigación.

3.1.5 Resolución de la simulación (SIMRES)

La resolución de la simulación determina la fracción de segundo en la que son revisados todos los modelos involucrados en la simulación. Por ejemplo, si la resolución de la simulación es de 5, los modelos son actualizados cada 0,2 segundos de simulación (1/5), si la resolución es de 10, la revisión es cada 0,1 segundos (1/10).

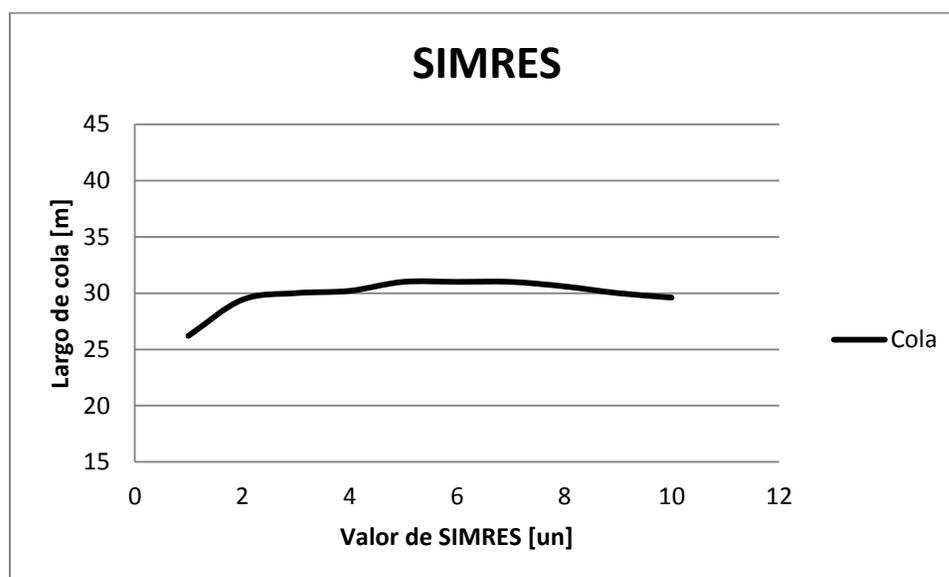


Ilustración 9: Gráfico SIMRES. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el quinto en términos de la influencia que tiene su valor sobre las colas de la simulación realizada, logrando estas últimas tener un mínimo de 26,2 metros, un máximo de 31 metros, y una diferencia de 4,8 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 1,4 metros, dejando en evidencia el bajo grado de sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas. Es importante mencionar, debido a que la resolución de la simulación tiene una incidencia directa sobre el tiempo que duran las simulaciones de VISSIM, solo se probó para valores de 1 a 10.

Gráficamente se puede ver que el parámetro no tiene una influencia marcada sobre el largo de cola, manteniéndose este último, relativamente estable a lo largo de los

distintos valores que toma la resolución de la simulación. Sin embargo si se puede apreciar como afecta los resultados cuando se tiene una resolución muy baja.

Debido a la influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, a pesar de ser menor que las otras variables, se determinó que la Resolución de la Simulación (SIMRES) sea calibrada en la presente investigación.

3.1.6 Número de vehículos observados hacia adelante (OBSERVEDVEHICLES)

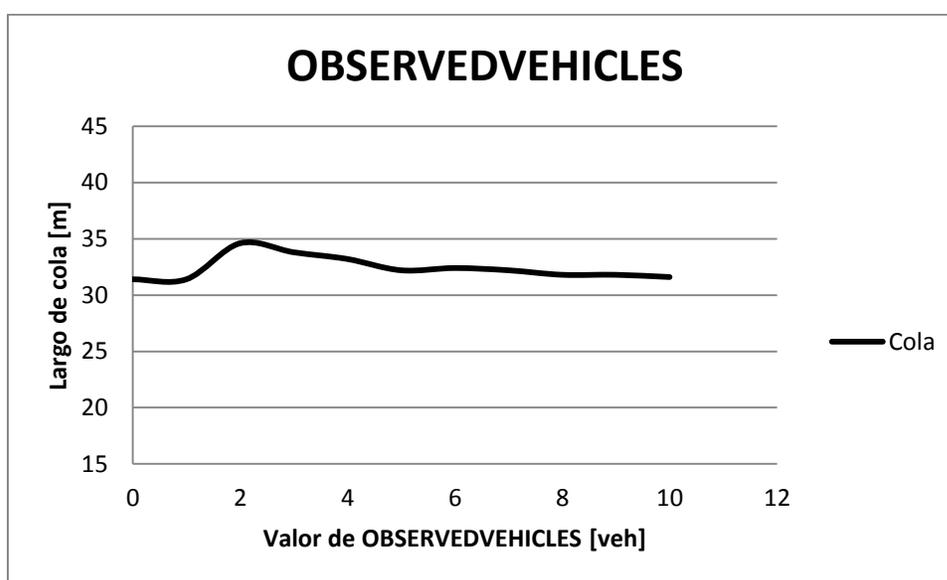


Ilustración 10: Gráfico OBSERVEDVEHICLES. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el sexto en términos de la influencia que tiene su valor sobre las colas de la simulación realizada, logrando estas últimas tener un mínimo de 31,4 metros, un máximo de 34,6 metros, y una diferencia de 3,2 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 1 metro, dejando en evidencia el bajo grado de sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas.

Gráficamente se puede ver que el parámetro no tiene una influencia marcada sobre el largo de cola, manteniéndose este último relativamente estable a lo largo de los distintos valores que toma el número de vehículos observados hacia adelante.

Debido a la baja influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que el número de vehículos observados hacia adelante, no será calibrado en la presente investigación.

3.1.7 Distancia máxima observada hacia adelante (MAXLOOKAHEAD)

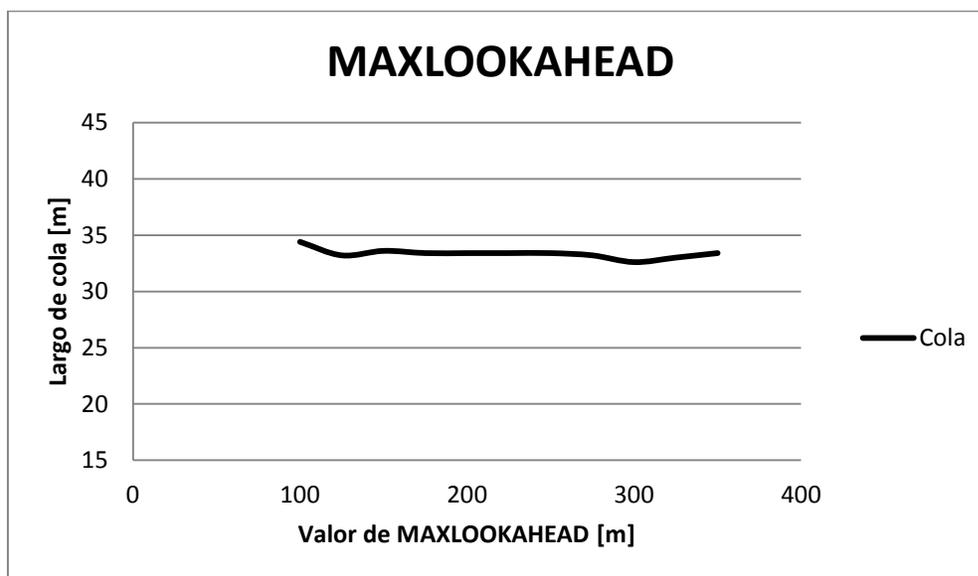


Ilustración 11: Gráfico MAXLOOKAHEAD. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el séptimo en términos de la influencia que tiene su valor sobre las colas de la simulación realizada, logrando estas últimas tener un mínimo de 32,6 metros, un máximo de 34,4 metros, y una diferencia de 1,8 metros entre ambos. La desviación estándar que tuvo el largo de cola para esta variable corresponde a 1,8 metros, dejando en evidencia el bajo grado de sensibilidad que tiene esta variable sobre el largo de las colas.

Gráficamente se puede ver que el parámetro no tiene una influencia marcada sobre el largo de cola, manteniéndose este último relativamente estable a lo largo de los distintos valores que toma el número de vehículos observados hacia adelante.

Debido a la baja influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que la distancia máxima observada hacia adelante (MAXLOOKAHEAD), no será calibrado en la presente investigación.

3.1.8 Headway mínimo (MINHEADWAY)

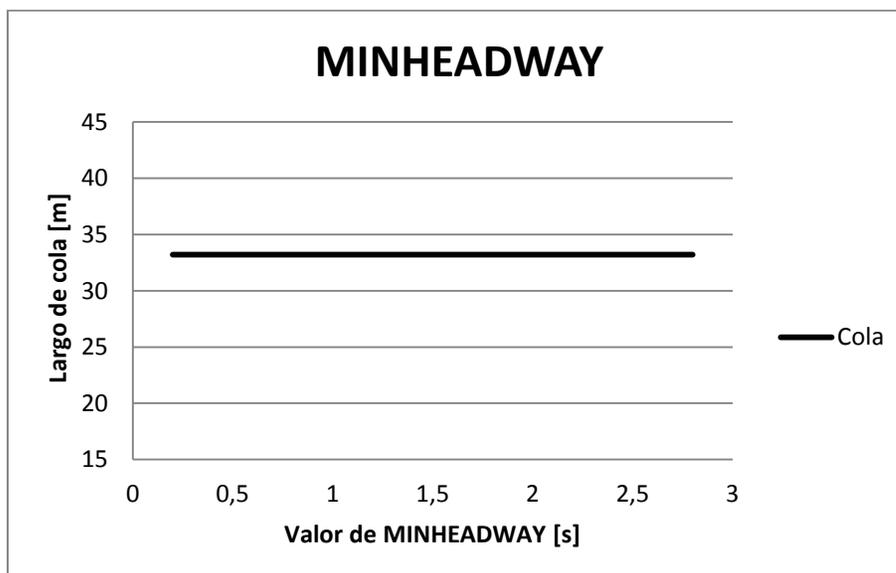


Ilustración 12: Gráfico MINHEADWAY. Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro es el menos influyente sobre las colas de la simulación realizada, manteniéndose estas últimas constantes para todos los valores que tomó esta variable (mínimo 33,2 metros, máximo 33,2 metros y desviación estándar de 0 metros). Sin embargo, esto se debe a que el experimento realizado en esta investigación, no se adecuó de manera correcta a determinar la influencia que tiene esta variable sobre las colas. La explicación es que el headway mínimo corresponde al intervalo de tiempo mínimo que necesita un vehículo para poder entrar a una nueva pista.

Debido a la baja influencia de este parámetro sobre el largo de las colas en la red analizada, se determinó que el headway mínimo (MINHEADWAY), no será calibrado en la presente investigación.

3.1.9 Resumen

Con toda la información recopilada del análisis de sensibilidad realizado para esta investigación, se elaboró un ranking de influencia en el largo de cola para ver cuáles son las variables de la preselección que debiesen ser efectivamente seleccionadas para la calibración de VISSIM. El ranking se presenta a continuación.

ranking	Variable	Mínimo (m)	Máximo (m)	Delta (m)	Desv. Est. (σ)
1	Valor DESIREDSPPEED todo	19,4	328,8	309,4	108,4
2	Valor AXADD	18,2	287,8	269,6	101,2
3	Valor DESIREDSPPEED de 25 a 100	19,6	94,4	74,8	22,6
4	Valor BXMULT	23,0	60,8	37,8	12,3
5	Valor BXADD	17,4	27,4	10,0	3,5
6	Valor SIMRES	26,2	31,0	4,8	1,4
7	Valor OBSERVEDVEHICLES	31,4	34,6	3,2	1,0
8	Valor MAXLOOKAHEAD	32,6	34,4	1,8	0,4
9	Valor MINHEADWAY	33,2	33,2	0,0	0,0

Tabla 3.2: Ranking de Sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Son 8 las variables analizadas, sin embargo para el ranking, se decidió separar la variables DESIREDSPPEED (Distribución de velocidad deseada) en 2, una que considera todo el rango de valores que puede tomar esta variable, y otra que considera el rango más probable para las características de la red bajo estudio.

El ranking se basa en el valor de la desviación estándar (σ) de cada variable, siendo la variable con mayor σ la primera en el ranking de influencia o la que debiese tener un mayor impacto en el largo de cola en la modelación.

Con estos resultados, se decidió calibrar las primeras 6 variables del ranking (que en realidad son 5), debido a que son las que producen un mayor impacto en el largo de cola modelado según este análisis de sensibilidad y han sido usadas en estudios anteriores de calibración de VISSIM.

4 LEVANTAMIENTO DE DATOS

La calibración de VISSIM requiere contar con datos que permitan reflejar las características del tráfico en un contexto determinado. Por otro lado, para la validación de los parámetros calibrados, es necesario contar con datos de distinta naturaleza a los utilizados para calibrar. Dadas estas necesidades, en este capítulo se presenta la metodología utilizada en esta investigación para el levantamiento y procesamiento de datos de tráfico necesarios.

4.1 Ubicación

Se seleccionó un área compuestas por los ejes viales de Exequiel Fernández, Pedro de Valdivia y Macul, ubicada en la comuna de Macul. Las intersecciones que componen esta área son 10 (de Este a Oeste y de Norte a Sur):

1. Rodrigo de Araya con Exequiel Fernández
2. Los Olmos con Pedro de Valdivia
3. Los Olmos con Exequiel Fernández
4. Los Olmos con Macul
5. Los Plátanos con Exequiel Fernández
6. Los Plátanos con Macul
7. Los Plátanos con Pedro de Valdivia
8. Quilín con Pedro de Valdivia
9. Quilín con Exequiel Fernández
10. Escuela Agrícola con Exequiel Fernández

A continuación se presenta un mapa, obtenido de Google Maps, de las intersecciones señaladas.



Ilustración 13: Mapa Red Calibración. Fuente: Google maps y elaboración propia.

Los puntos azules corresponden a intersecciones que reciben flujo de otras intersecciones, en cambio los puntos verdes representan las intersecciones que reciben los flujos de entrada a la red analizada. Se puede apreciar que la intersección de Quilín con Exequiel Fernández, solo tiene 2 intersecciones verdes asociadas, esto es debido a que Quilín, solo permite el flujo en un sentido de poniente a oriente, por lo que no recibe flujo desde Macul.

Estas intersecciones fueron seleccionadas debido a que presentan ciertas características que hacen que sean ideales para la calibración de tráfico interrumpido en un contexto de parámetros generales. Estas características son:

1. Son intersecciones semaforizadas: Las diez intersecciones seleccionadas son semaforizadas, característica fundamental para la calibración.
2. Se encuentran en red: Los ciclos de las intersecciones son del mismo largo y se encuentran coordinados entre sí para facilitar el flujo expedito de los vehículos que circulan por esta ubicación. Por estar en red, es de mayor facilidad modelar los semáforos en VISSIM.
3. Baja concentración de Transporte Público: En el eje de Exequiel Fernández, no circulan buses de transporte público, sin embargo por sus perpendiculares, si existe circulación de este tipo de vehículos. A pesar de esto, la mayor parte del flujo corresponde a vehículos privados. No se utilizaron mediciones de colas en los ejes con mayor concentración de transporte público (Macul y Pedro de Valdivia).

4.2 Catastro Físico y Operativo

La información necesaria para la modelación de la red definida fue levantada de dos fuentes, de la UOCT (Unidad Operativa de Control de Tránsito) y en terreno.

La UOCT suministró los datos correspondientes a la programación de semáforos de toda la red. Para ver que efectivamente esta información estuviera correcta, se corroboró en terreno en el horario de punta mañana, entre 7:30 y 8:30 am. A continuación se presenta una tabla que resumen la información de los ciclos y tiempos de verde para las 10 intersecciones semaforizadas que fueron modeladas en la red.

INTERSECCIÓN	CICLO (seg)	ENTREVERDE (seg)			INICIO VERDE (seg)			TIEMPO VERDE (seg)		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Macul - Los Olmos	114	4	4		93	49		66	40	
Macul - Los Plátanos	114	4	4	4	71	13	30	52	13	37
E. Fernández - R. de Araya	114	4	4		24	101		73	33	
E. Fernández - Los Olmos	114	4	4		83	52		79	27	
E. Fernández - Los Plátanos	114	4	4		71	35		74	32	
Exequiel Fernández - Quilín	114	4	4		49	4		65	41	
Exequiel Fernández - Escuela Agrícola	114	4	4	4	106	55	94	59	35	8
Pedro de Valdivia - Los Olmos	114	4	4		19	97		74	32	
Pedro de Valdivia - Los Plátanos	114	4	4		107	60		63	43	
Pedro de Valdivia - Quilín	114	4	4	4	85	28	63	53	31	18

Tabla 4.1: Programación de semáforos. Fuente: UOCT y elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 4.1, todas las intersecciones presentan el mismo largo de ciclo debido a que están en red. También el entreverde es único para todas las intersecciones que conforman la red de calibración (3 segundos de amarillo y 1 segundo de rojo-rojo). Es importante mencionar que se debe respetar el inicio de verdes señalado en la tabla al momento de simular las intersecciones, ya que estos inicios permiten que la red esté correctamente coordinada.

Todos los tiempos de la red entregados por la UOCT fueron corroboradas en un catastro realizado en terreno con el objetivo de verificar que los tiempos suministrados por la UOCT fueran los correctos. No hubo discrepancias.

Junto con el catastro operativo de la red en terreno, se hicieron mediciones de largos de cola, flujos y movimientos de los vehículos y uso de pistas en cada una de las intersecciones de la red para poder utilizar esta información al momento de calibrar y posteriormente validar la calibración realizada.

El resumen de los flujos y movimientos de la red se presenta a continuación en la tabla 4.2.

Intersección	Sentido	Movimiento			Total
		Directo	Derecha	Izquierda	
E. Fernández/Escuela Agrícola	N-S	317	103	27	447
	S-N	580	76	198	854
	P-O	423	64	-	487
	O-P	955	40	4.5	999.5
E. Fernández/Quilín	N-S	415	-	61	476
	S-N	650	69	-	719
	P-O	282	23	47	352
E. Fernández/Los Plátanos	N-S	441	65	-	506
	S-N	655	-	167	822
	O-P	761	110	73	944
E. Fernández/Los Olmos	N-S	434	47	52	533
	S-N	717	67	22	806
	P-O	209	20	5	234
	O-P	254	49	31	334
E. Fernández/R. Araya	N-S	498	40	68	606
	S-N	644	96	49	789
	P-O	333	32	-	365
	O-P	537	138	115	790
P. de Valdivia/Quilín	N-S	270	226	87	583
	S-N	604	35	273	912
	P-O	331	83	44	458
P. de Valdivia/Los Plátanos	N-S	329	10	-	339
	S-N	607	-	29	636
	P-O	-	11	4	15
	O-P	443	179	269	891
P. de Valdivia/Los Olmos	N-S	308	12	71	391
	S-N	733	46	10	789
	P-O	152	12	8	172
	O-P	151	76	38	265
Macul/Los Olmos	N-S	604	29	7	640
	S-N	1972	60	10	2042
	P-O	217	44	47	308
	O-P	262	131	77	470
Macul/Los Plátanos	N-S	761	101	-	862
	S-N	1635	401	118	2154
	O-P	411	43	67	521

Tabla 4.2: Distribución de Flujos. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que esta es una calibración general, solamente se ocupó la unidad de vehículos equivalentes para la calibración. Para esto, se utilizó los factores de conversión presentados en la siguiente tabla

Factor $\left[\frac{veq}{veh} \right]$	1,00	1,35	1,65	2,00	3,00	2,00	2,50
Tipo de Vehículo	Auto	Taxi	Taxibus	Bus	Articulado	Camión 2E	Camión +2E

Tabla 4.3: Factores de equivalencia. Fuente: Coeymans y Neely (1984).

Toda la información levantada fue realizada en días hábiles, excluyendo los lunes y viernes debido a que pueden presentar alteraciones en sus flujos por tratarse del primer y último día de la semana respectivamente. Por otro lado, debido a la gran cantidad de intersecciones de las cuales es necesario levantar datos, las mediciones no fueron realizadas todas de manera simultánea, sino que fueron realizadas en días diferentes. Se optó por realizarlos de esta manera ya que permite llevar a cabo el levantamiento de datos con una cantidad reducida de personas. El levantamiento de datos fue realizado por 3 grupos de 3 personas cada uno, donde cada grupo tomaba los datos de una intersección por día. Cada grupo abarcó 1 eje vial, uno el eje de Pedro de Valdivia, otro el de Exequiel Fernández y el tercero el eje de Macul. Otros beneficios que trae realizar el levantamiento de datos de esta manera es la independencia que se tiene en la coordinación de la toma de datos, ya que cada grupo solo tenía que coordinar con los miembros de su grupo para poder abarcar una intersección sin ponerse de acuerdo con los otros dos al momento de ir a terreno.

Debido a que las mediciones fueron realizadas en días independientes, se utilizó un factor de ajuste para que los flujos de entrada a la red (solo los flujos desde Macul y Pedro de Valdivia por el Oriente y Poniente respectivamente) calzaran con los flujos internos de la red (eje de Exequiel Fernández). Este factor corresponde al cociente de aumento o disminución de los flujos de entrada a las vías del eje de Exequiel Fernández, que es el eje del cual se utilizarán sus largos de colas para la calibración de esta investigación. Este factor es utilizado para compensar el hecho que las mediciones no se realizaron en el mismo día, sino que todos en días distintos. Por otro lado, como el eje de

calibración es Exequiel Fernández, se hace que los flujos calcen con los que se registraron al momento de tomar los datos en las intersecciones de Exequiel Fernández. A continuación se presenta un ejemplo de cómo es calculado este factor y los nuevos flujos.

	Total	Recto	Izquierda	Derecha
Flujo PdV/QUI SN (veh/hr)	912	604	273	<u>35</u>
Flujo PdV/QUI PO (veh/hr)	458	<u>331</u>	44	83
Flujo PdV/QUI NS (veh/hr)	583	270	<u>87</u>	226

Tabla 4.4: Flujos de PDV/QUI. Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla corresponde a los flujos originales que fueron medidos en la intersección de Pedro de Valdivia con Quilín. Como se permiten 3 movimientos en cada dirección, se pueden diferenciar en 9 flujos distintos, pero donde solo 3 afectan los flujos que llegan a la intersección de Quilín con Exequiel Fernández: movimiento a la derecha SN (35 veh/hr), movimiento recto PO (331 veh/hr) y movimiento izquierda NS (87 veh/hr). La suma de estos tres flujos forman los 453 veh/hr del flujo de llegada a Quilín desde P. de Valdivia que aparece en la tabla a continuación.

Flujo llegada a Quilín PO medido en E. Fernández	352
Flujo llegada a Quilín desde P. de Valdivia	453
Factor de Ajuste	78%

Tabla 4.5: Factor de Ajuste. Fuente: Elaboración propia.

El factor de ajuste es el porcentaje que representa el flujo de llegada a Quilín PO medido en Exequiel Fernández (352 veh/hr) del flujo de llega a Quilín desde Pedro de Valdivia (453 veh/hr), recién calculado. Por lo que el factor de ajuste en este caso es calculado como:

$$\frac{352 \left[\frac{veh}{hr} \right]}{453 \left[\frac{veh}{hr} \right]} = 0,78 = 78\%$$

Con el factor de ajuste, se pueden modificar los flujos totales simplemente ponderándolos con el porcentaje calculado, en este caso reduciendo los flujos totales originales. Sin embargo, el porcentaje del flujo total que representa cada movimiento, se mantiene constante para no alterar las características de la intersección. A continuación se presentan los nuevos flujos totales, junto con los porcentajes que representa cada movimiento del flujo total.

	Total	Recto	Izquierda	Derecha
Nuevo Flujo PdV/QUI SN	709	66%	30%	4%
Nuevo Flujo PdV/QUI PO	356	72%	10%	18%
Nuevo Flujo PdV/QUI NS	453	46%	15%	39%

Tabla 4.6: Flujos Nuevos PDV/QUI. Fuente: Elaboración propia.

Junto con la medición de los flujos, también se realizaron de manera simultánea la medición de los largos de cola de las intersecciones analizadas, Sin embargo, como solamente se van a utilizar largos de cola por el eje de Exequiel Fernández para la calibración y por el eje de Pedro de Valdivia para la validación, solamente se muestran estos largos de cola. Los largos de colas medidos en terreno se presentan a continuación.

Intersecciones de E. Fernández con	Cola N-S (m)	Cola S-N (m)	Cola P-O (m)	Cola O-P (m)
Los Olmos	24,65	29,43	31,79	40,12
Los Plátanos	39,38	88,00	-	76,84
Quilín	50,25	53,45	40,25	-

Tabla 4.7: Colas E. Fernández. Fuente: Elaboración propia.

Intersecciones de P. de Valdivia con	Cola N-S (m)	Cola S-N (m)	Cola P-O (m)	Cola O-P (m)
Los Olmos	24,95	44,66	31,13	36,30
Los Plátanos	29,22	-	-	81,03
Quilín	50,02	-	-	-

Tabla 4.8: Colas P. de Valdivia. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, son 10 las colas que serán usadas para la calibración y 7 las colas que serán usadas para la validación. En la tabla correspondiente a E. Fernández, aparecen dos casillas vacías, esto es debido a que en los sentidos poniente oriente (P-O) y oriente poniente (O-P) para las intersecciones de Los Plátanos y Quilín, como son

calles de 1 sentido, se forman solo 3 colas. En la tabla 4.8, correspondiente a las colas de Pedro de Valdivia, también aparecen casillas vacías, por la misma razón de la tabla anterior, y porque hubo errores de medición de ciertas colas, por lo que no fueron utilizadas para la validación.

Con la información de los tiempos de los semáforos, los flujos, los movimientos, el ajuste realizado con el factor de ajuste y los largos de cola, se cuenta con toda la información necesaria para la calibración y validación de la red seleccionada.

5 ALGORITMO GENÉTICO

La calibración es un proceso de optimización, donde se busca encontrar los valores de los parámetros que permitan replicar de la mejor manera lo que se quiera simular. En esta investigación, de manera similar a investigaciones realizadas bajo otros contextos, se determinó utilizar un algoritmo genético que se encargue de la optimización de la red de calibración y así encontrar los valores de los parámetros seleccionados para esta misma. En el presente capítulo, se explicará por qué se eligió este algoritmo, en qué consiste la heurística de optimización de algoritmos genéticos, para posteriormente, detallar cómo es implementado y utilizado para la calibración de VISSIM en Santiago.

5.1 Elección de Algoritmo Genético

En la literatura actual, existen una serie de investigaciones de calibración en las que se han utilizado algoritmos genéticos, incluso, según Otkovic et al., (2013), el algoritmo genético es la técnica más utilizada para calibrar modelos de simulación de tráfico, existiendo experiencias favorables en FRESIM, PARAMICS, CORSIM, y VISSIM. Particularmente en VISSIM, se han realizado calibraciones en distintas ciudades del mundo, para contextos similares y completamente distintos al contexto de calibración abordado en este estudio (flujo vehicular urbano interrumpido), es por esto, que es importante revisar cómo se han utilizado los G.A. (sigla en inglés de *Genetic Algorithms*) y que tan efectivos han sido al momento de optimizar estos modelos de microsimulación.

Entre los estudios más recientes de calibración de VISSIM que han utilizado en alguna parte de su proceso G.A. como herramienta de calibración, son Manjunatha & Vortisch (2012); Miller (2009); Park & Qi (2006); Park & Won (2006), entre otros. Todas las investigaciones mencionadas han tenido éxito al momento de calibrar VISSIM para versiones anteriores. En esta investigación, debido a la facilidad de implementación de un G.A., las herramientas disponibles, y principalmente la efectividad que promete

tener en la calibración el uso de G.A., se ha decidido utilizar la misma heurística de optimización de G.A. que las investigaciones aquí mencionadas.

5.2 Descripción General de Algoritmos Genéticos

Es necesario entender, a grandes rasgos, que es un algoritmo genético, como funciona y por qué es útil para esta investigación.

Un algoritmo genético, según Michalewicz (1996), es una técnica de inteligencia artificial de búsqueda, en espacios de soluciones de gran tamaño. Ahondando aún más, es un algoritmo estocástico cuyo modelo de búsqueda utiliza ciertos principios de fenómenos presentes en la naturaleza, como la herencia genética y la selección natural darwiniana.

En la naturaleza, el objetivo es sobrevivir. Es justamente la sobrevivencia de los individuos de una población, y su capacidad de adaptación lo que permite la evolución de una especie. En el caso de un problema de optimización, la población o “generación” está conformada por potenciales soluciones del espacio de soluciones factibles, que son los individuos o “genes”, y la sobrevivencia de un gen en particular, va a depender de su desempeño (como solución), dentro del problema de optimización.

Por ejemplo. Si mi problema de optimización es minimizar la siguiente función:

$$F(x) = x^2 \quad (5.1)$$

El espacio de soluciones factibles son todos los números reales. Una población o generación, se refiere a un número acotado de soluciones factibles. Por ejemplo, una población de 4 genes podría ser $\{-10, 10000, -120, 0,25\}$. Cada población se somete a un proceso de evolución, el cual está regido por el desempeño de cada gen en el problema de optimización. El desempeño o “*fitness*” de cada gen es cuantificado con la función objetivo, en nuestro caso. El *fitness* de los genes señalados serían $\{100, 100000000, 14400, 0,0625\}$. Como se busca minimizar la función objetivo, claramente el gen con mejor *fitness* corresponde al gen 4 (0,25). Sin embargo, como no se puede determinar que esta sea la solución óptima, el algoritmo lo que hace es crear una nueva generación,

que contiene nuevos genes o soluciones factibles, en base a la generación actual y su desempeño. Para crear la nueva generación, existen una serie de técnicas que se utilizan según el problema abordado. Las principales son:

1. Recombinación o *Crossover*: Basado en 2 padres (genes de la generación actual) y genera 2 hijos (genes que conformaran la siguiente generación). Se selecciona un punto de corte en términos de información a heredar, en el caso del ejemplo anterior, puede ser un promedio ponderado entre los dos padres, llegando a un punto medio. El primer hijo tiene la primera mitad del padre y segunda de la madre y el segundo hijo, la primera mitad de la madre y la segunda del padre. Para el ejemplo descrito, la forma de elegir un punto de corte, puede ser escoger aleatoriamente un α entre 0 y 1, para calcular la siguiente formula¹

$$Hijo_1 = Padre \cdot \alpha + Madre \cdot (1 - \alpha) \quad (5.2)$$

$$Hijo_2 = Madre \cdot \alpha + Padre \cdot (1 - \alpha) \quad (5.3)$$

2. Mutación: Se refiere a cambiar solo una parte del gen de manera individual y aleatoria. Hay distintos tipos de mutación, dependiendo del problema que se quiera analizar. Para el caso del ejemplo, se podría cambiar un gen en un valor delta aleatorio

$$Gen' = Gen \pm \Delta, \quad \Delta \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (5.4)$$

A grandes rasgos un algoritmo genético se puede resumir en el siguiente esquema iterativo:

1. Generar aleatoriamente una población inicial.

¹Es importante destacar, que esta es solo una forma de aplicar *Crossover*, existiendo otras técnicas más elaboradas de utilizar el mismo concepto.

2. Evaluar con la función objetivo los individuos de la población actual, para determinar su desempeño o *fitness*.
3. Seleccionar los padres para hacer recombinación y los genes a mutar de la siguiente generación
4. Crear la siguiente generación, manteniendo la cantidad de genes de la población.
5. Ver si se cumple alguna de las condiciones de término (criterio de convergencia o cantidad de generaciones que han sido evaluadas supera la cantidad determinada)
 - a. Si se cumple alguna: Se termina el algoritmo, se escoge el gen con el mejor *fitness* de todo el procedimiento.
 - b. No se cumple ninguna: se vuelve al segundo punto.

El algoritmo no asegura que se encuentre el óptimo, pero si permite alcanzar una solución que cumpla con los criterios de convergencia establecidos en el problema. Para mayor detalle en el algoritmo y sus distintas metodologías de implementación, se puede revisar Michalewics (1996).

5.3 Implementación en Calibración

La calibración de VISSIM consiste en determinar cuáles son los valores óptimos de los parámetros más relevantes de los modelos de microsimulación de tráfico utilizados por el programa. Esto no es más que una búsqueda de valores finitos, en un espacio de soluciones factibles. Dicho esto, el algoritmo genético es una heurística de optimización que se adecúa perfectamente a un problema de calibración. Sin embargo, para poder aplicar este algoritmo, es necesario representar cada uno de los elementos que conforman el algoritmo.

5.3.1 Función Objetivo o *Fitness*

La calibración en VISSIM busca lograr que el comportamiento por los vehículos del programa sea lo más semejante a la realidad, bajo un contexto determinado. Para determinar si se refleja o no el comportamiento simulado por el programa, al

comportamiento observado en terreno, es necesario determinar una manera objetiva de medir esta similitud. Según Doung (2011), el índice de desempeño a utilizar va a depender del tipo de estudio realizado, por lo que para este estudio, debido a la semejanza con el estudio realizado por Velasco (2004), se decidió utilizar el mismo indicador de desempeño, que se basa en las colas simuladas y observadas en terreno.

$$I.D. = \sum_i^{\text{arcos}} \left(\left(\frac{|cola_{simulada,i} - cola_{observada,i}|}{cola_{observada,i}} \right) \cdot \frac{cola_{observada,i}}{\sum_j^{\text{arcos}} cola_{observada,j}} \right) \cdot 100 \quad (5.5)$$

El índice de desempeño (I.D.) es una forma de representar el error existente entre las colas simuladas y las colas observadas en terreno. Corresponde al promedio ponderado por largo de cola, del error porcentual existente en cada cola simulada vs cola observada. A continuación se describen las variables presentes en el indicador:

1. *arcos*: Se refiere al conjunto de todos los arcos de la red donde se tomaron mediciones del largo de cola.
2. $cola_{simulada,i}$: Corresponde al largo, en metros, de la cola simulada en el arco *i*.
3. $cola_{observada,i}$: Corresponde al largo, en metros, de la cola observada en el arco *i*.

La razón que entrega Velasco (2004) con respecto a que se trate de un promedio ponderado por largos de colas, es que la diferencia de un vehículo en una cola pequeña (2 o 3 vehículos en total), representa un alto porcentaje de error, sin embargo es de poca relevancia para la simulación, en cambio una diferencia de varios vehículos en una cola de mayor magnitud, es de mayor relevancia.

El índice de desempeño aquí señalado, corresponde a la función *fitness* del algoritmo genético, por lo que el problema a resolver, es encontrar el set de parámetros o gen, que minimice el I.D. que es equivalente a decir a que tenga el mejor *fitness*.

5.3.2 Gen

El gen corresponde a la representación de una solución para el problema, en este caso, un gen es un vector con los valores de los parámetros que serán sometidos al proceso de calibración. Dicho esto, el gen puede ser representado de la siguiente manera:

$$Gen = \begin{bmatrix} AXADD \\ BXMULT \\ BXADD \\ DESIREDSPEED \\ SIMRES \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

1. Distancia promedio en detención (AXADD)
2. Parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT)
3. Parte aditiva de la distancia de seguridad deseada (BXADD)
4. Distribución de velocidad deseada (DESIREDSPEED)
5. Resolución de la simulación (SIMRES)

Los valores que puede tomar cada variable están acotados a las características de cada variable (por ejemplo, la resolución de la simulación, solo puede tomar valores enteros mayores o iguales a 1). Es importante destacar que la variable distribución de velocidad deseada, es en realidad más de una variable, ya que cada calle tiene su propia distribución de velocidad deseada, por lo que el vector utilizado para el algoritmo genético de en esta investigación es de 16 variables de decisión, donde 12 variables son velocidades deseadas.

5.3.3 Población

La población corresponde a la cantidad de genes que contiene cada generación. Mientras más grande sea, mayor es la probabilidad de que la población tenga un gen que esté cercano al óptimo, sin embargo, como cada gen debe ser evaluado, mientras más grande es la población, mayor serán los recursos computacionales requeridos para evaluar cada generación. Es por esto, que el tamaño de la población (cantidad de genes

por generación), no será determinado a priori, sino que se probaran distintos tamaños, según como vayan dando los resultados del G.A.

5.3.4 Selección

Para generar la siguiente generación, se deben seleccionar los genes de la generación actual que serán utilizados en la recombinación o *crossover*. En este caso en particular, se siguió el siguiente procedimiento.

1. De la generación actual, se escogen 4 genes al azar. Dos de ellos compiten para ser el padre y los otros dos para ser la madre. La competencia se basa exclusivamente en el valor de su función de *fitness* o índice de desempeño (I.D.). Ganan los genes que tengan mejor rendimiento, en este caso, un I.D. asociado menor debido a que se trata de un problema de minimización del I.D., por lo que de los 4 escogidos en un principio, solo son seleccionados 2.
2. Para ver que los padres efectivamente sean de los con mejor *fitness* de la generación (no necesariamente los dos mejores), se escoge un padre y una madre según el método de *Ranking*. Este método consiste en:
 - a. Ordenar los genes de la generación según su desempeño.
 - b. A cada gen, se le atribuye una probabilidad proporcional a su desempeño con la siguiente formula:

$$P(i) = \frac{r_i}{(\sum_j r_j)} = \frac{2r_i}{n(n+1)}. \quad (5.7)$$

Donde $P(i)$ es la probabilidad de escoger el gen i , r_i es el ranking de ese gen y n es la cantidad de genes en la población.

- c. Se escogen dos genes según estas probabilidades de elección.
3. Ahora se tienen 2 padres y 2 madres, los cuales entre ellos, nuevamente compiten para ver cuál de los dos es mejor.
4. Del resultado de esta competencia, se hace una recombinación.

5.3.5 Recombinación o *Crossover*

La recombinación, para este estudio, fue implementada de dos maneras distintas.

La primera forma, debido a que cada gen cuenta con 5 valores distintos (16 en realidad, debido a la distribución de velocidad deseada), cada uno asociado a un parámetro, consiste en elegir un número aleatorio entre 1 y 4 para hacer la recombinación. Por ejemplo, si el número al azar es 2, los primeros dos parámetros del padre pasan a $hijo_1$ y los primeros 2 parámetros de la madre pasan a $hijo_2$, los 3 parámetros restantes del padre pasan a $hijo_2$ y los 3 parámetros restantes de la madre pasan a $hijo_1$. En el siguiente esquema se puede apreciar lo descrito en el ejemplo anterior.

$$Padre = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix}, \quad Madre = \begin{bmatrix} f \\ g \\ h \\ i \\ j \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$hijo_1 = \begin{bmatrix} a \\ b \\ h \\ i \\ j \end{bmatrix}, \quad hijo_2 = \begin{bmatrix} f \\ g \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

La segunda forma de hacer la recombinación consistió en hacer un promedio ponderado, de manera aleatoria, entre los valores de los parámetros que contiene cada gen. Tomando como referencia los genes de padre y madre utilizados anteriormente, los hijos resultan de la siguiente manera.

$$hijo_1 = \begin{bmatrix} a \cdot \alpha + f \cdot (1 - \alpha) \\ b \cdot \alpha + g \cdot (1 - \alpha) \\ c \cdot \alpha + h \cdot (1 - \alpha) \\ d \cdot \alpha + i \cdot (1 - \alpha) \\ e \cdot \alpha + j \cdot (1 - \alpha) \end{bmatrix}, \quad hijo_2 = \begin{bmatrix} f \cdot \alpha + a \cdot (1 - \alpha) \\ g \cdot \alpha + b \cdot (1 - \alpha) \\ h \cdot \alpha + c \cdot (1 - \alpha) \\ i \cdot \alpha + d \cdot (1 - \alpha) \\ j \cdot \alpha + e \cdot (1 - \alpha) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

5.3.6 Mutación

La mutación fue implementada escogiendo uno de los parámetros del gen de manera aleatoria, para luego variar en un porcentaje determinado aleatoriamente, el valor del parámetro escogido. Se puede apreciar la mutación con el siguiente esquema.

$$Gen = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} \rightarrow Gen' = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \pm \Delta \\ d \\ e \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Como se puede ver, todos los parámetros, excepto uno, se mantienen constantes, y uno es modificado en un factor Δ aleatorio. Es importante mencionar, que el mejor gen de la generación (aquel con mejor *fitness*), no es mutado. Además, el factor de mutación, valor que determina Δ , es mayor en las primeras iteraciones y menor en las últimas. Esto se hace para explorar más las potenciales soluciones en un principio, y posteriormente lograr llegar a un criterio de convergencia con mayor rapidez.

5.3.7 Programa de Implementación

El algoritmo genético fue programado en Microsoft Visual Studio 2010 Express, el cual es una plataforma de programación que utiliza el lenguaje de programación C#. Se escogió esta plataforma debido a la compatibilidad que tiene con VISSIM 5.4 y su extensión .COM, la cual es básicamente una extensión que permite utilizar y manipular VISSIM desde Visual Studio.

De esta forma, se pudo automatizar el proceso de la calibración, corriendo VISSIM desde Visual Studio, realizando la interacción entre el algoritmo genético y la simulación. El código programado para la calibración se encuentra adjunto en los Anexos de este documento.

Para más detalles de la extensión de VISSIM que permite este tipo de interacción, se puede consultar el manual “VISSIM 5.4-07 – COM Interface Manual”.

6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

El presente capítulo describe como se realizó la calibración de la red seleccionada a partir del levantamiento de datos realizado y descrito anteriormente, junto con los resultados obtenidos a partir de este estudio.

6.1 Modelación de Red

Lo primero que se debe hacer es modelar la red para la cual se levantó la información en VISSIM. Esto se realizó utilizando los comandos básicos de VISSIM, el manual del programa como guía, y ocupando las distancias geográficas que aparecen en google maps (maps.google.cl) para la red analizada. Para verificar que estas distancias estuvieran relativamente bien, se realizó la comparación de un tramo entre las intersecciones de Escuela Agrícola y Quilín en el eje de Exequiel Fernández y se encontró que la diferencia era mínima, por lo que se confió para todos los otros tramos en esta página. Además se hizo una comparación con las distancias de un tramo medido en google maps y mapcity (www.mapcity.cl), donde se llegó a la misma conclusión, que las diferencias no eran significativas. Debido a que google maps tiene más herramientas que permiten su fácil empleo, se decidió utilizar sus mapas como referencia para este estudio.

Aparte de la red física, se ingresaron los datos levantados en terreno de la demanda de la red y de la configuración de semáforos de la misma, para que el programa pueda recrear lo que ocurre en la realidad.

Uno de los datos de mayor relevancia en la correcta modelación de la red, corresponde al largo y ancho de los vehículos. Esta información sin embargo, ya fue calibrada en la investigación realizada por Velasco (2004), donde se presentan los valores medio del largo y ancho de los vehículos del parque vehicular correspondiente a Santiago. La tabla elaborada para presentar dichos resultados, es presentada a continuación.

	Estrato Socioeconómico					
	Medio		Alto		Bajo	
	Largo (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Ancho (m)
Media (μ)	4,65	1,68	4,32	1,70	4,31	1,60
Varianza (σ^2)	0,26	0,01	0,10	0,00	0,34	0,01
Desv. Estándar (σ)	0,51	0,08	0,31	0,04	0,59	0,11
Máximo	5,81	1,86	4,98	1,82	5,02	1,69
Mínimo	3,68	1,48	3,73	1,61	3,29	1,35

Tabla 6.1: Largo de Vehículos. Fuente: Velasco (2004).

Como se puede ver, Velasco (2004) separó en tres estratos socioeconómicos: Bajo, Medio y Alto. Para cada estrato socioeconómico calculó la media, varianza, desviación estándar, máximo y mínimo del largo y ancho de los vehículos. En esta investigación, donde la red de utilizada para la calibración y validación pertenece a la comuna de Macul, se utilizaron los valores correspondientes al estrato socioeconómico Medio. Esta elección se debe a que la comuna de Macul, según el informe de mapa socioeconómico de Chile, presenta la siguiente distribución del nivel socioeconómico en sus hogares según Adimark (2013).

Comuna	Distribución del N.S.E. en hogares				
	ABC1	C2	C3	D	E
Macul	11,9%	26,0%	25,8%	29,9%	6,5%

Tabla 6.2: Distribución N.S.E. Macul. Fuente: Adimark.

Según estos datos, la mayor concentración de los hogares de Macul, pertenecen a los sectores C2 y C3, que conjuntamente representan un 51,8% de la totalidad de los hogares de esta comuna.

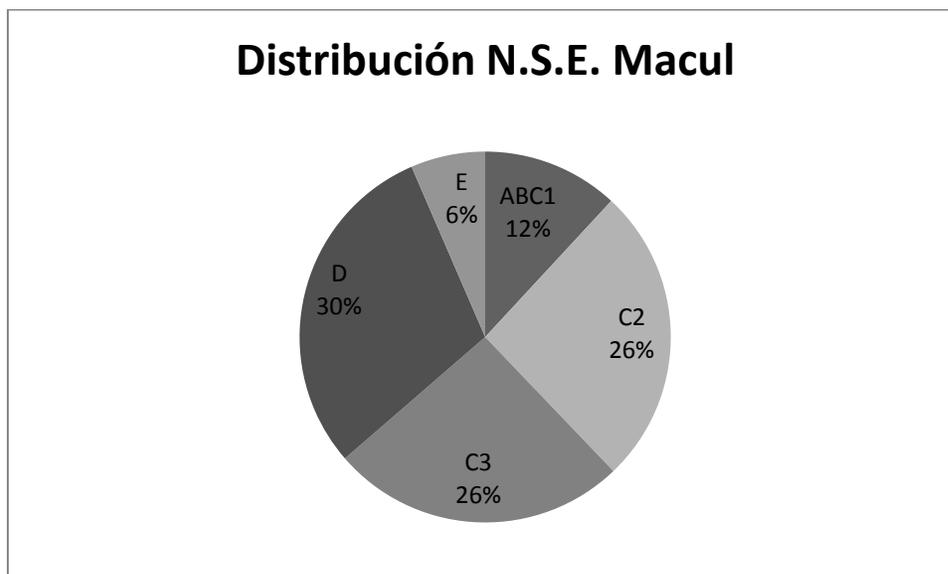


Ilustración 14: Distribución de N.S.E. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior, se puede ver como los niveles socioeconómicos C2 y C3 forman más de la mitad de los hogares de Macul, justificando el uso de 4,65 metros de largo promedio para los autos de esta comuna y 1,68 metros de ancho.

Finalmente, es necesario poner los contadores de cola en el programa para que estos puedan ir registrando lo que va ocurriendo en la red a lo largo de la simulación, e indicarle a VISSIM que arroje los largos de cola máximos por ciclo para poder ocupar esta variable como principal variable de calibración.

Una vez ingresados todos los datos necesarios para la correcta modelación de la red, esta se ve de la siguiente manera en VISSIM.

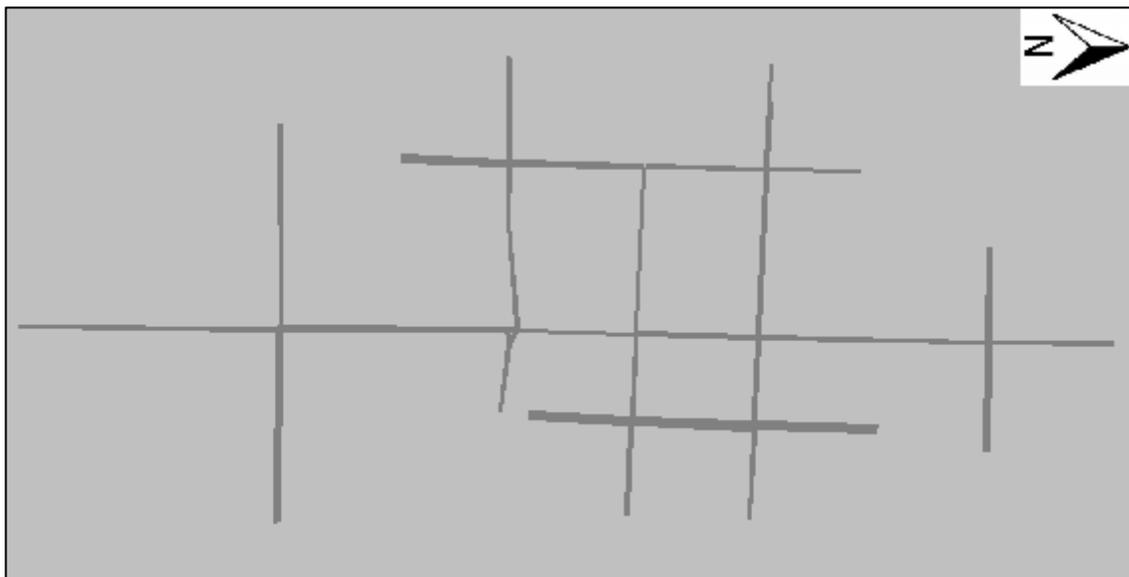


Ilustración 15: Red Calibración VISSIM. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la imagen, el Norte se encuentra hacia el borde derecho del documento, por lo que el primer eje horizontal, desde arriba hacia abajo de la página, corresponde a Pedro de Valdivia, el segundo eje (del medio) corresponde al eje de Exequiel Fernández, donde la intersección de más a la izquierda es Escuela Agrícola, después viene Quilín, Los Plátanos, Los Olmos y Rodrigo de Araya. El tercer eje corresponde a Macul, y como se puede apreciar es el que se ve más ancho que los otros dos, debido a su mayor número de pistas. Lamentablemente, debido a cómo funciona la interfaz gráfica del programa, los elementos de la red no pueden ser visualizados todos al mismo tiempo, pero en la red hay contadores de colas en las intersecciones seleccionadas, semáforos, señalética de prioridad (discos Pare y Ceda el Paso) y cualquier otro elemento que se consideró relevante para la modelación de la red en cuestión. A continuación se presenta una segunda imagen de la red, pero con la simulación en funcionamiento. Esta imagen muestra la intersección de Quilín con Exequiel Fernández.



Ilustración 16: Quilín-E. Fernández VISSIM. Fuente: Elaboración propia.

Las figuras de distintos colores que se pueden ver a lo largo de los arcos son los vehículos en circulación, en cambio las líneas verdes y la roja justo en la intersección, son los semáforos de esta. En este caso, los movimientos del arco de Exequiel Fernández están en verde y los movimientos de Quilín están en rojo. Los contadores de cola, a pesar de estar tomando datos en el momento que se capturó esta imagen, no son visibles ya que no son relevantes para la simulación en sí, son solo para uso de datos una vez que la simulación es finalizada.

Los parámetros seleccionados para la calibración, junto con sus valores por default son presentados a continuación.

Parámetros	Valores iniciales
Parte aditiva de la distancia de seguridad deseada	2
Parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada	3
Distancia en detención promedio (m)	2
Distribución de velocidad deseada (km/hr)	48-58
Resolución de Simulación (sim_s/s)	5

Tabla 6.3: Parámetros Seleccionados. Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar, que el parámetro de distribución de velocidad deseada, es único para cada arco de la red de calibración, por lo tanto, para este estudio, son 12 las decisiones de distribución de velocidad deseada que serán calibradas. Todas vienen programadas con el valor por default presentado en la tabla.

6.2 Utilización del Algoritmo Genético

Para calibrar los parámetros de la red, se utilizó un algoritmo genético programado exclusivamente para este propósito. Entrar en los detalles del programa diseñado para este propósito no tiene sentido, sin embargo el código utilizado en esta investigación puede ser encontrado en los anexos de este documento en el caso de que quiera ser revisado de manera más detallada. Lo importante es entender a grandes rasgos el proceso de calibración, por lo que a continuación se presenta un esquema que representa el proceso llevado a cabo.

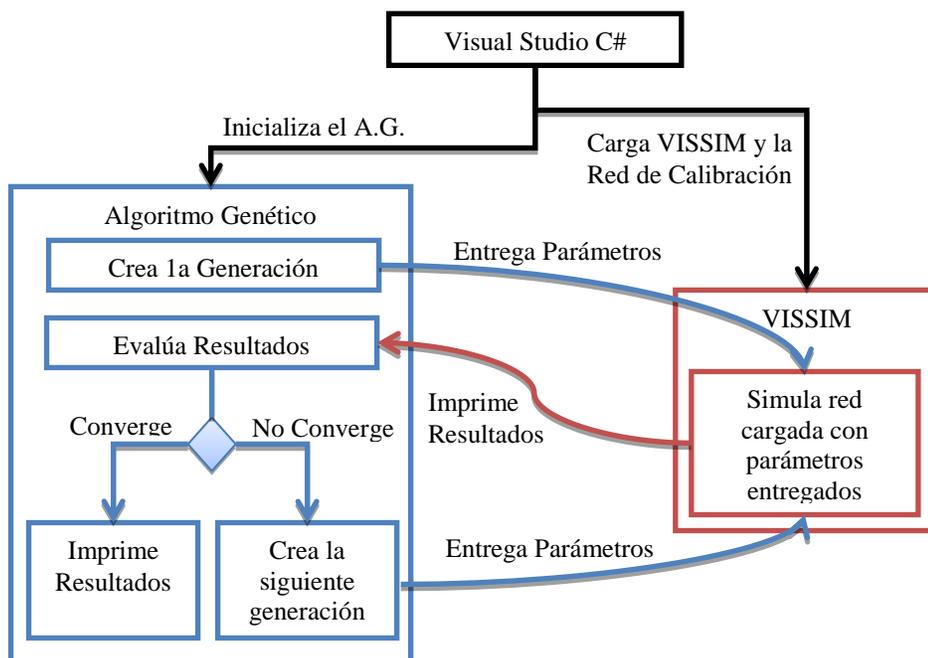


Ilustración 17: Esquema de Calibración. Fuente: Elaboración propia.

Visual Studio C# corresponde a la plataforma de programación donde se codificó el algoritmo genético. Al abrir este programa manualmente y ejecutar el código diseñado para la calibración, lo que hace en primer lugar es abrir automáticamente VISSIM y cargar un archivo de red de un directorio escogido, en segundo lugar, empieza a correr el código del Algoritmo Genético (A.G.), que se encuentra dentro de Visual Studio. De ahí en adelante, toda la calibración es llevada a cabo por el A.G. Este parte creando la primera generación de genes (cada gen corresponde a un set determinado de parámetros), luego le entrega la información de los parámetros a VISSIM, donde se simula la red con la información de parámetros otorgada por el A.G. Una vez que termina la simulación, VISSIM imprime los resultados en su formato estándar, y es el A.G. que recoge los archivos de texto, y los procesa de manera automatizada para ver los resultados de interés, en este caso calcula el índice de desempeño (I.D.). Una vez que calcula el índice de desempeño para todos los genes (o set de parámetros de la generación), el A.G. revisa si se cumplen los criterios de convergencia definidos, los cuales son dos: hay un I.D. menor a 5% y/o se cumplen la cantidad de generaciones máxima. En el caso de que no converja, el A.G. crea una nueva generación de genes, utilizando los resultados de la generación anterior como información para crear la nueva generación, y le entrega estos parámetros nuevamente a VISSIM para poder evaluar el desempeño de esta nueva generación. En el caso de converger, el A.G. imprime los resultados finales, el programa es finalizado y tanto el A.G. como VISSIM se cierran. Es importante destacar el ciclo que se crea en el caso de que no se converja, donde la interacción entre ambos programas sigue iterando para poder seguir evaluando nuevos parámetros en la búsqueda de mejores resultados.

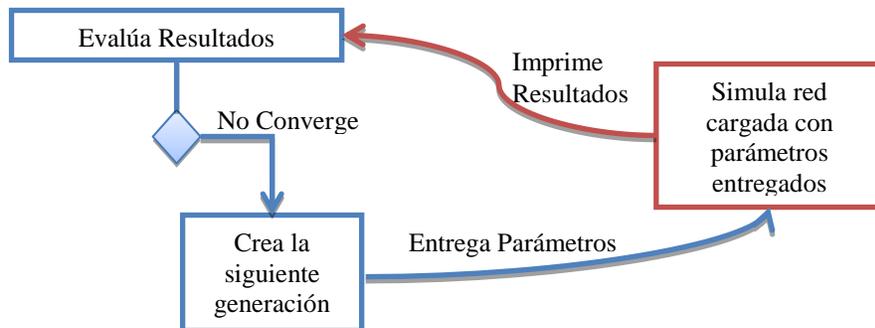


Ilustración 18: Ciclo de calibración. Fuente: Elaboración propia.

Es este ciclo lo que permite que el A.G. siga funcionando hasta encontrar el mejor resultado posible, creando la nueva generación en base a los genes y resultados de la generación anterior, para obtener de la manera más rápida posible, un resultado deseable y concluir la calibración de forma acelerada.

La red modelada para esta investigación, debido a la gran cantidad de intersecciones, dimensión total y cantidad de semillas por simulación (10), tarda alrededor de 5 minutos 40 segundos. Este corresponde al tiempo en que se demora VISSIM en simular e imprimir los resultados para un gen de la generación. Si la generación cuenta con 20 genes (o 20 set de parámetros distintos), cada generación tardaría 113 minutos y 20 segundos, que corresponde a casi 2 horas. Este tiempo es muy grande, considerando que solo se ha analizado 1 generación que contiene una cantidad relativamente chica de genes para un problema que tiene 16 variables en su vector de solución. Por otro lado, el A.G. es una heurística evolutiva, lo que quiere decir que aprende de las soluciones y resultados que ha evaluado hasta el momento para poder encontrar soluciones que tengan mayor probabilidad de desempeñarse de mejor manera en el problema. Dicho esto, es necesario que el A.G. pueda analizar la mayor cantidad de genes y generaciones posibles para encontrar el mejor resultado posible. Claramente, el tiempo que se demora en analizar una generación, es un factor limitante para esta investigación. Es por esto que se definieron y utilizaron una serie de medidas que

permitieron disminuir el tiempo de simulación, y por ende el tiempo de optimización del A.G.

La primera medida utilizada para disminuir el tiempo de simulación de VISSIM fue bajar la cantidad de semillas que se ocuparían por gen. En un principio, se utilizaban 10 semillas para evaluar cada set de parámetros, lo que provocaba que cada set se demorara un total aproximado de 5 minutos 40 segundos. Para disminuir este tiempo, se redujo esta cantidad a 1 semilla por gen, haciendo que el tiempo de simulación bajará a 35 segundos, aproximadamente. Al hacer este cambio, una generación de 20 genes, solo demoraría 11 minutos 40 segundos, lo que representa una disminución de 89,7% del tiempo total por generación.

El principal problema con la medida anterior es que no se puede utilizar una sola semilla y afirmar que los parámetros encontrados son estadísticamente válidos, ya que con una semilla se pueden haber encontrado parámetros que sean exclusivamente ciertos para esa semilla y no para el general de los casos. Dado este problema, se definió la segunda medida. Para ver el desempeño real de los parámetros encontrados de esta forma, lo que se optó por hacer, es evaluar el set de parámetros encontrados al final del A.G., con 10 semillas distintas, lo que tarda 5 minutos 40 segundos adicionales. A pesar de que 5 minutos 40 segundos representa un 48,6% del tiempo total que demora una generación de 20 genes bajo estas nuevas condiciones, es solo un 2,4% del tiempo de un A.G. que tenga 20 genes por generación y 20 generaciones (demora 3 horas 54 minutos aproximadamente bajo estas nuevas condiciones), lo que representa un tiempo marginal para el problema siendo analizado.

A partir de las dos medidas anteriores, se comenzó a utilizar el A.G. y ver los resultados que se obtenían. Se partió con un A.G. de 20 genes y 20 generaciones, lo que demora casi 4 horas en llevarse a cabo. Lamentablemente, se encontró que eran muy pocas las generaciones y los genes, ya que los resultados encontrados de esta forma eran deficientes. Se optó en un principio por aumentar la cantidad de genes a 40 genes por generación dejando 20 generaciones como máximo. El algoritmo seguía sin converger,

ya que no lograba alcanzar un I.D. menor a 5%, sino que corría las 20 generaciones. Por otro lado, los resultados seguían siendo deficientes y el tiempo por A.G. corrido ascendió a 7 horas 50 minutos aproximadamente debido al aumento en la cantidad de genes por generación. Este tiempo de modelación nuevamente volvió a ser muy alto para poder llevar a cabo la investigación. Esto se debe a una serie de factores, los cuales son:

- La licencia solo permite correr el programa en un computador por vez, por lo que no se pueden correr algoritmos genéticos de distintas características en más de un computador para ir probando el A.G. óptimo para la calibración.
- Los recursos del computador que utiliza la interacción entre Visual Studio y VISSIM son muchos si se busca minimizar el tiempo de simulación de VISSIM, por lo que la capacidad de hacer otras cosas en el computador utilizado era limitada si se estaba corriendo el programa.
- El algoritmo genético es una heurística eficiente ya que aprende de generación en generación debido a los resultados que se han calculado hasta un cierto punto, sin embargo para que sea efectivo el aprendizaje, es necesario tener una gran cantidad de genes por generación. Esto se debe a que en un problema con 16 variables, donde hay variables reales, son infinitos los set de parámetros que se pueden crear, por lo que tener una gran cantidad de genes por generación es de gran importancia. En este caso, 40 genes parece ser muy poco, y subirlo al doble (80) significa que el tiempo de modelación superaría las 15 horas y media.

Debido a estos factores, se optó por modificar la metodología de uso del algoritmo genético para que no tardara tanto en buscar una solución. Se probó reduciendo la dimensión del problema. El vector de solución pasó de ser R^{16} a R^1 . Esto se hizo dejando todas las variables constantes excepto una, la cual sería la variable de decisión para el algoritmo.

Con esta nueva metodología, se logró realizar algoritmos genéticos de 15 generaciones en alrededor de 45 minutos (varía la duración según el parámetro siendo analizado por alguna razón), sin embargo habría que hacer más de un algoritmo para obtener una calibración completa. Por otro lado, debido a que se está corriendo un algoritmo completo por variable, esta metodología permite que la calibración se pueda hacer de manera discontinua. Esto quiere decir que se puede calibrar una variable, y en otra instancia, a partir de los resultados obtenidos, ocupando el valor óptimo encontrado por el algoritmo genético anterior y dejándolo fijo, se puede calibrar una segunda variable. La ventaja de esto es que racionaliza los tiempos de uso de los recursos computacionales, y se tiene un aprendizaje entre algoritmos genéticos, ocupando un punto de partida mejor cada vez que se corre un A.G., por lo que el resultado, necesariamente debe ser mejor cada vez que se corre una nueva vez. El esquema a continuación es una ilustración de lo que se realizó, ejemplificando con un vector de soluciones R^5 .

$$\begin{bmatrix} x \\ y_0 \\ z_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \rightarrow AG_1 \rightarrow \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ y \\ z_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \rightarrow AG_2 \rightarrow \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \\ z \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \\ \bar{z}_1 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{w}_1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

En el esquema anterior, se muestran vectores R^5 . En el primer vector, de izquierda a derecha, de las 5 variables hay 4 constantes. La que no es constante es la x . Este será el vector de decisión que será calibrado por el primer algoritmo genético AG_1 . Con el resultado del AG_1 , se encuentra el valor \bar{x}_1 , el cual pasa a ser una de las variables fijas en el segundo vector, en cambio la variable y , ya no es fija, y pasa a ser analizada en el AG_2 , el cual encuentra el valor de la variable y , que corresponde a \bar{y}_1 . El proceso sigue realizando la misma secuencia para el resto de las variables del vector hasta que se encuentra un valor óptimo para cada variable del vector. Este proceso puede ser interrumpido cada vez que se termina un algoritmo genético, y también tiene la característica que toda la información del proceso anterior, es incluida en el siguiente proceso, por lo que va aprendiendo de los resultados calculados hasta el momento.

En definitiva, el proceso descrito en esta sección fue el que se utilizó para encontrar los resultados de la calibración que son presentados en la siguiente sección.

6.3 Resultados de Calibración

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el proceso de calibración planteado a lo largo de esta investigación.

Con la red completamente modelada y el algoritmo genético adaptado exclusivamente para la calibración de esta misma, se vio cuál sería el punto de partida para este proceso, lo que corresponde al nivel de error, o ver que tanto difiere los resultados de la simulación de la red con los parámetros por default de la realidad. Estos resultados se resumen en el cuadro presentado a continuación.

Intersección	Cola Real (m)	Cola Simulada (m)	delta (m)	delta (veq)	Error (%)
QUI-PO	40,25	33,56	-6,69	-1,4	-16,6%
QUI-SN	53,45	83,91	30,45	6,5	57,0%
QUI-NS	50,25	60,44	10,18	2,2	20,3%
LPL-SN	88,00	10,91	-77,09	-16,6	-87,6%
LPL-OP	76,84	55,44	-21,40	-4,6	-27,8%
LPL-NS	39,38	20,72	-18,67	-4,0	-47,4%
OLM-OP	40,12	56,53	16,41	3,5	40,9%
OLM-NS	24,65	53,38	28,72	6,2	116,5%
OLM-PO	31,79	51,66	19,87	4,3	62,5%
OLM-SN	29,43	2,50	-26,93	-5,8	-91,5%

Tabla 6.4: Resultados default. Fuente: Elaboración propia.

Índice de Desempeño, I.D. (%)	54,08%
Error Promedio (%)	56,81%

Tabla 6.5: I.D. Default. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en ambas tablas, los resultados de la simulación sin calibrar difieren bastante de la realidad, promediando un 56,81 % en el error absoluto y presentando un índice de desempeño (I.D.) de 54,08 %. Estos son los indicadores de mayor relevancia al momento de calibrar, específicamente el I.D., ya es utilizado como función objetivo o *fitness* en el algoritmo genético. De los resultados también se puede

ver que hay colas sobrestimadas y colas subestimadas, por lo que no es simple saber hacia dónde mover las variables de calibración para poder obtener mejores resultados.

6.3.1 Calibración BXADD

Según el procedimiento descrito en la sección anterior, se comenzó calibrando solamente una variable, la cual fue la parte aditiva de la distancia de seguridad deseada (BXADD). En 15 generaciones, con una población de 15 genes, el algoritmo genético logro un I.D. de 48,94% de error, que representa una diferencia de 5,14% y una reducción de un 9,5% en el I.D. El vector de solución se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES								
1,679	3	2	5	DESIRESPEED							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	8	8

Tabla 6.6: Vector Solución 1. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar de la tabla anterior, las filas superiores representan 4 de los parámetros a calibrar y las inferiores los restantes 12. Esto es debido a que hay 12 distribuciones de velocidad deseada distintas dentro de la red, una perteneciendo a cada arco relevante. Otra observación que se puede hacer, es que todas las variables están con su valor por default, excepto BXADD, ya que es la variable que se calibró. Sin embargo, hay una distribución de velocidad que no tiene su valor por default, que es la DESIRESPEED 10, que a diferencia de todas las otras distribuciones de velocidad, tiene un 7 en vez de un 8. Esto se debe a la característica del A.G. de mutar sus genes, lo que modifica de manera aleatoria, y en un rango determinado por el programador, el valor de alguna variable con el fin de encontrar mejores soluciones.

6.3.2 Calibración BXMULT

La segunda variable calibrada corresponde a la parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (BXMULT). En 15 generaciones, con una población de

15 genes, el algoritmo genético logro un I.D. de 48,73% de error, que representa una diferencia de 0,21%, y una reducción de apenas un 0,43% en el I.D. Se pueden extraer dos observaciones importantes de este resultado. La primera es que hay variables que influyen de mayor manera que otras en el I.D. y la segunda es que debido a que es una calibración secuencial con aprendizaje, puede que la disminución en el error sea menor a medida que se avanza en el proceso. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES									
1,679	3,615	2	4									
DESIRESPEED												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	

Tabla 6.7: Vector Solución 2. Fuente: Elaboración propia.

6.3.3 Calibración AXADD

La tercera variable calibrada corresponde a la distancia promedio en detención (AXADD). Nuevamente, en 15 generaciones, con una población de 15 genes, el algoritmo genético logró un I.D. de 43,09% de error, que representa una diferencia de 5,64% y disminución de un 11,57% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. Con esto se puede plantear que AXADD, hasta el momento, es la variable de mayor impacto en el I.D. tanto en diferencia, como en reducción porcentual. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES									
1,679	3,615	0,823	5									
DESIRESPEED												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	

Tabla 6.8: Vector Solución 3. Fuente: Elaboración propia.

6.3.4 Calibración DESIREDSPEED general

La cuarta variable calibrada corresponde a la distribución de velocidad deseada (DESIREDSPEED). Debido a que hay 12 distribuciones de velocidad deseada diferentes dentro de la red, en esta cuarta calibración se optó por hacer una calibración general, moviendo todas las distribuciones de velocidad deseada de la misma forma, encontrando una solución única para las 12 variables. Esta vez con solo 4 generaciones y una población de 15 genes, el algoritmo genético logró un I.D. de 35,58% de error, que representa una diferencia de 7,51% y disminución de un 17,43% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. Con esto se puede plantear que la distribución de velocidad deseada de la red es la variable de mayor impacto en el I.D. tanto en diferencia, como en reducción porcentual, superando en 1,87 % en la diferencia a la distancia promedio en detención (AXADD). Sin embargo, es importante recalcar que esta variable está afectando a 12 variables distintas y de igual manera dentro de la red, razón por la cual puede estar causando un mayor impacto. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES								
1,679	3,615	0,823	5								
DESIREDSPEED											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tabla 6.9: Vector Solución 4. Fuente: Elaboración propia.

6.3.5 Calibración SIMRES

La quinta calibración fue de la resolución de la simulación (SIMRES). Esta variable, debido a que presenta solo valores enteros, y además un rango de valores bastante acotado (del 1 al 10), fue calibrada probando todos sus valores posibles. En 10 corridas distintas (el equivalente a un A.G. de 1 generación con 10 genes), el algoritmo genético logró un I.D. de 34,27% de error, que representa una diferencia de 1,31% y disminución de un 3,68% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES									
1,756	3,615	0,823	1									
DESIREDSPEED												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	

Tabla 6.10: Vector Solución 5. Fuente: Elaboración propia.

Existen dos observaciones de relevancia para este vector. La primera es que esta variable, a pesar de no haber sido identificada como de gran relevancia en el análisis de sensibilidad, si tuvo una mayor influencia en el I.D. que otras en esta red. La segunda es que la mutación afectó a 3 variables, BXADD, DESIREDSPEED 7 y 9. Esto implica que la disminución en el I.D. en este caso, es responsabilidad en el cambio de más de una variable.

6.3.6 Calibración DESIREDSPEED específicas

Las siguientes calibraciones corresponden a distintas distribuciones de velocidad específicas dentro de la red. Con “específicas” se hace referencia a que a diferencia de la última calibración, donde se movieron de manera conjunta 12 distribuciones distintas, las calibraciones que serán descritas a continuación, son realizadas moviendo exclusivamente una distribución de velocidad a la vez.

En este procedimiento, no se siguió el orden numérico de las variables de distribuciones de velocidades, sino que se fue escogiendo según cuales eran las colas que aportaban mayor error al I.D.

Es importante mencionar, que la calibración de todas estas variables tomó el tiempo equivalente a 14 corridas, o 1 generación de 14 genes, ya que son variables enteras que van del 1 al 14.

DESIREDSPEED 11

El algoritmo genético logró un I.D. de 25,41% de error, que representa una diferencia de 8,86% y disminución de un 25,84% del I.D. con respecto al último

resultado obtenido. Con esto se puede plantear que esta distribución, hasta el momento, es la variable de mayor impacto en el I.D. tanto en diferencia, como en reducción porcentual. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4

Tabla 6.11: Vector Solución 6. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 4

El algoritmo genético logró un I.D. de 18,82% de error, que representa una diferencia de 5,59% y disminución de un 25,95% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. Con esto se puede plantear que esta distribución, hasta el momento, es la variable de mayor impacto en el I.D. en reducción porcentual de un algoritmo genético a otro. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4

Tabla 6.12: Vector Solución 7. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 3

El algoritmo genético logró un I.D. de 18,34% de error, que representa una diferencia de 0,48% y disminución de un 2,55% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. Con esto se puede plantear que esta distribución es la con menor impacto en el I.D. hasta el momento. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	7	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4

Tabla 6.13: Vector Solución 8. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 5

El algoritmo genético logró un I.D. de 13,92% de error, que representa una diferencia de 4,42% y disminución de un 24,10% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	7	2	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4

Tabla 6.14: Vector Solución 9. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 1

El algoritmo genético logró un I.D. de 13,92% de error, lo que significa que esta variable es la primera analizada de manera individual que no cambia del valor que se encontró en la calibración general. Este resultado no implica que esta variable no sea relevante dentro del modelo, sino que corrobora que la calibración general realizada, fue un aporte significativo a la disminución del I.D. El vector de solución se mantiene igual que en el paso anterior, por lo que no se muestra en esta sección.

DESIRESPEED 8

Al igual que son el DESIRESPEED 1, esta variable tampoco logró mejorar el I.D. El análisis de este resultado es el mismo que para el caso anterior. El vector, se mantiene igual.

DESIRESPEED 6

El algoritmo genético logró un I.D. de 12,87% de error, que representa una diferencia de 1,05% y disminución de un 7,54% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	7	2	6	3	4	4	4	4	4	4	14	4		

Tabla 6.15: Vector Solución 10. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 12

El algoritmo genético logró un I.D. de 12,28% de error, que representa una diferencia de 0,59% y disminución de un 4,58% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	4	7	2	6	3	4	4	4	4	4	4	14	5		

Tabla 6.16: Vector Solución 11. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 10

Nuevamente, esta variable tampoco logró mejorar el I.D. El análisis de este resultado es el mismo que para los casos de DESIRESPEED 1 y 8. El vector, se mantiene igual al último encontrado.

DESIRESPEED 2

El algoritmo genético logró un I.D. de 10,42% de error, que representa una diferencia de 1,86% y disminución de un 15,15% del I.D. con respecto al último resultado obtenido. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES	DESIRESPEED											
1,756	3,615	0,823	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	14	7	2	6	3	4	4	4	4	4	14	5			

Tabla 6.17: Vector Solución 12. Fuente: Elaboración propia.

DESIRESPEED 7 y 9

Nuevamente, estas variables tampoco lograron mejorar el I.D. El análisis de estos resultados es el mismo que para los casos de DESIRESPEED 1 y 8. El vector, se mantiene igual al último encontrado.

6.3.7 Revisión y Resultados

Debido a que se calibraron los parámetros de manera individual, se optó por realizar nuevamente el algoritmo genético para las variables reales y para las variables enteras con mayor influencia en el I.D., para ver si con los valores calibrados de las otras variables se puede mejorar aún más el índice de desempeño. El vector de solución, y definitivo de la calibración general de esta investigación, se presenta a continuación.

Para las variables BXADD (parte aditiva de la distancia de seguridad) y BXMULT (parte multiplicativa de la distancia de seguridad), no se logró encontrar valores que mejoraran los resultados del I.D. al realizar nuevamente un algoritmo genético, por lo que sus valores se mantienen igual que el último vector de solución definido. Sin embargo, para la variable AXADD, con una variación muy pequeña en su valor encontrado anteriormente, se logró disminuir el I.D. a 9,93%, que representa una diferencia de 0,47% y disminución de un 4,70% del I.D. con respecto al último resultado

obtenido. El vector de solución encontrado en esta calibración se presenta a continuación.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES								
1,756	3,615	0,802	1								
DESIRESPEED											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	6	6	2	6	3	4	4	4	4	14	5

Tabla 6.18: Vector Solución Final. Fuente: Elaboración propia.

Las distribuciones de velocidad deseada (DESIRESPEED) del vector de solución, aparecen como el número de la distribución identificador de cada distribución, a continuación se presenta el vector de solución pero con la velocidad promedio en km/hr de cada una de estas distribuciones.

BXADD	BMULT	AXADD	SIMRES								
1,756	3,615	0,802	1								
DESIRESPEED											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	40	40	15	40	20	25	25	25	25	120	30

Tabla 6.19: Vector Solución Final 2. Fuente: Elaboración propia.

Con en el vector encontrado, los resultados obtenidos en una simulación de 10 semillas para la red de calibración, se presentan a continuación.

	Cola Real (m)	Cola Simulada (m)	delta (m)	delta (veq)	error (%)
QUI-PO	40,25	32,17	-8,09	-1,7	-20,1%
QUI-SN	53,45	52,33	-1,13	-0,2	-2,1%
QUI-NS	50,25	48,36	-1,90	-0,4	-3,8%
LPL-SN	88,00	111,92	23,92	5,1	27,2%
LPL-OP	76,84	77,12	0,28	0,1	0,4%
LPL-NS	39,38	34,58	-4,80	-1,0	-12,2%
OLM-OP	40,12	41,17	1,05	0,2	2,6%
OLM-NS	24,65	24,94	0,29	0,1	1,2%
OLM-PO	31,79	34,45	2,66	0,6	8,4%
OLM-SN	29,43	29,48	0,05	0,0	0,2%

Tabla 6.20: Resultados parámetros calibrados. Fuente: Elaboración propia.

Índice de Desempeño, I.D. (%)	9,32%
Error Promedio (%)	7,81%

Tabla 6.21: I.D. Vector Solución Final. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en ambas tablas, los resultados de la simulación calibrada, ya no difieren en gran medida de la realidad, promediando un 7,81 % en el error absoluto y presentando un índice de desempeño (I.D.) de 9,32 %. Este resultado representa una disminución de un 82,77% en el I.D. desde los resultados obtenidos con los parámetros por default. De los resultados también se puede ver que solo hay 3 colas simuladas que difieren en la predicción por más de 1 vehículo equivalente y solo una de estas por más de 2 vehículos equivalente, por lo que todo el resto de los errores son casi despreciables. Por otro lado, con los valores simulados previos a la calibración, todas las colas erraban por más de 1 vehículo equivalente, y 7 de estas colas erraban por más de 4 vehículos equivalentes de distancia.

6.4 Validación

Según Espinosa (2004), la validación es una corroboración de los resultados obtenidos en el proceso de calibración, utilizando los parámetros calibrados en una red distinta a la que se utilizó para obtener dichos valores. Para esta investigación, la red de validación utilizada para corroborar que los parámetros encontrados en la sección anterior, efectivamente funcionen y disminuyan el error de simulación, corresponde al eje de Pedro de Valdivia. Las intersecciones, de donde se levantó información de los largos de cola para realizar la validación de esta investigación corresponden a Pedro de Valdivia con Los Olmos, Los Plátanos y Quilín, sin embargo no se consideran todas las colas formadas en estas intersecciones, sino que solamente las presentadas en la tabla 6.22 debido a que se encontraron errores de medición en tres de las colas catastradas por lo que fueron excluidas de la muestra, como había sido mencionado anteriormente.

	Cola Real (m)	Cola Simulada (m)	delta (m)	delta (veq)	error %
OLM-PO	31,13	22,27	-8,87	-1,91	-28,48%
OLM-NS	24,95	40,66	15,71	3,38	62,98%
OLM-SN	44,66	45,46	0,80	0,17	1,78%
OLM-OP	36,30	45,05	8,75	1,88	24,10%
LPL-OP	81,03	98,03	17,01	3,66	20,99%
LPL-NS	29,22	35,13	5,91	1,27	20,23%
QUI-NS	50,02	64,67	14,65	3,15	29,29%

Tabla 6.22: Resultados Default Validación. Fuente: Elaboración propia.

Índice de Desempeño, I.D. (%)	24,11%
Error Promedio (%)	26,83%

Tabla 6.23: I.D. Validación Default. Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados corresponden a la simulación con los parámetros por default. Se puede apreciar que el error por default no es tan alto como en la red de calibración, sin embargo sigue siendo sustancial para poder simular los largos de cola de manera efectiva, obteniendo un índice de desempeño de más de 24% y un error promedio de casi 27%. Por otro lado, se puede ver que las diferencias entre los largos de cola simulados y reales, para 6 de las 7 colas consideradas, tienen un error mayor a un vehículo equivalente de diferencia, incluso 3 de estas 6 colas, tienen una diferencia de más de 3 vehículos equivalentes, lo que puede ser perjudicial en la modelación para la evaluación de medidas de transporte.

Al utilizar los valores calibrados, en la misma red de validación, los resultados obtenidos son los presentados a continuación.

	Cola Real (m)	Cola Simulada (m)	delta (m)	delta (veq)	error %
OLM-PO	31,13	19,66	-11,47	-2,47	-36,85%
OLM-NS	24,95	28,99	4,05	0,87	16,23%
OLM-SN	44,66	36,96	-7,70	-1,66	-17,25%
OLM-OP	36,30	36,73	0,42	0,09	1,16%
LPL-OP	81,03	83,77	2,74	0,59	3,39%
LPL-NS	29,22	28,16	-1,06	-0,23	-3,62%
QUI-NS	50,02	55,27	5,25	1,13	10,50%

Tabla 6.24: Resultados Validación parámetros calibrados. Fuente: Elaboración propia.

Índice de desempeño, I.D. (%)	11,00%
% Error Promedio	12,71%

Tabla 6.25: I.D. Validación parámetros calibrados. Fuente: Elaboración propia.

Hay una clara mejora en los resultados de los largo de colas simulados al utilizar los valores de los parámetros calibrados. Se puede ver que el índice de desempeño toma un valor de 11% que corresponde a una disminución del 54,39% en el I.D. y es apenas 1,68 puntos porcentuales más que el valor del I.D. obtenido en la red de calibración. Con respecto a la diferencia en los largos de cola, utilizando los valores calibrados, hay solo 3 colas que superan el vehículo equivalente de diferencia y ninguna que tenga un error de más de 3 vehículos equivalentes a diferencia de los resultados con los valores sin calibrar, donde un 43% de las colas simuladas tenían un error que superaba los 3 vehículos equivalentes de diferencia.

Con estos resultados, se puede plantear que la calibración de los parámetros generales de VISSIM, en el contexto de tráfico urbano interrumpido, se ha realizado de manera correcta. Esto se debe a que se logró disminuir el error en la red de calibración, medido a través del I.D., de un 54,08 % a un 9,32% y en la red de validación de un 24,11% a un 11%.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La realización del presente estudio permitió realizar las siguientes conclusiones:

1. El modelo de microsimulación utilizado por VISSIM, de muy bajo empleo en Chile, fue estudiado en lo práctico y teórico, con el fin de comprender y aplicar correctamente a una situación real este programa.
2. El análisis de sensibilidad realizado en este estudio, que consistió en un análisis de estudios realizados y experimentos diseñados para esta investigación, permitió identificar los parámetros de relevancia para la calibración del modelo en el contexto de tráfico urbano interrumpido, en un país en vías de desarrollo.
3. Se concluyó que los valores por default para los parámetros relevantes, no son correctos, por lo que una calibración es necesaria para poder simular de manera correcta el comportamiento vehicular en el contexto especificado.
4. Se escogieron 2 redes de tráfico que cumplieron las condiciones necesarias para poder realizar el levantamiento de datos requerido para la investigación y la simulación de las intersecciones utilizando VISSIM. La red de calibración utilizada fue el eje de Exequiel Fernández y la red de validación utilizada fue el eje de Pedro de Valdivia, ambos ejes en la comuna de Macul, a la altura de la calle Quilín.
5. Se diseñó una metodología de levantamiento de flujos vehiculares que permitió, de manera eficiente en términos de costos monetarios y temporales, recolectar información en terreno para la calibración del modelo. Este diseño contempló la elaboración y utilización de un factor de ajuste y

una recolección de datos que no requiere ser realizada completamente al mismo tiempo. El modelo diseñado, tiene además la característica de ser replicable para otros estudios y contextos de investigación de tráfico.

6. Respecto a los resultados finales, se calibraron los parámetros seleccionados, mediante el uso de un algoritmo genético (A.G.) programado especialmente para esta investigación a través de Visual Studio, que utiliza el lenguaje de programación C#. Se diseñó una metodología especialmente adaptada a la interacción con VISSIM que permitió disminuir aproximadamente en 90% el tiempo de calibración con respecto a si se hubiese utilizado un A.G. común.
7. Los valores obtenidos mediante el proceso de calibración logran disminuir el error en las estimaciones realizadas por VISSIM a un 9,93%, desde un 54,1%, logrando disminuir el error en 81,64%, en la red de calibración. Esta calibración logra un Indicador de Desempeño (I.D.) calibrado mejor que en la calibración realizada el 2004 para GETRAM (Velasco, 2004), tanto en valor final (9,93% vs 10,18%) como en el porcentaje que se logró disminuir desde el error inicial (81,64% vs 65,5%).
8. En la red de validación, se logra un error, con los valores calibrados de 11% de error, desde un 24,11% de error, logrando disminuir el error en 54,38%. Al igual que en el caso de calibración, los resultados obtenidos en esta instancia son más favorables que los obtenidos en la calibración de GETRAM (Velasco, 2004).
9. Con los resultados obtenidos en esta tesis, se puede afirmar que los valores calibrados son utilizables para futuros estudios que se realicen dentro del mismo contexto que se analizó en esta investigación, tráfico urbano

interrumpido, para estudios realizados en la plataforma de VISSIM 5.4 o futuras versiones del programa.

10. Esta metodología, donde se realiza una calibración automatizada mediante la interacción de una heurística de optimización adaptada y un programa de microsimulación, es replicable para futuros estudios de calibración ya sea en VISSIM o en otro software de microsimulación de tráfico. Además el uso de esta metodología, demostró obtener resultados con un menor nivel de error que estudios que no utilizan heurísticas de optimización.

7.2 Recomendaciones

Las principales recomendaciones que se pueden realizar son las siguientes:

1. La influencia del transporte público en las variables de tráfico es alta, por lo que realizar estudios posteriores, para determinar el grado de influencia de este flujo en los parámetros calibrados y en las estimaciones realizadas es fundamental si se quieren modelar redes con alta concentración de transporte público.
2. Los peatones deben ser considerados para realizar una simulación lo más apegada a la realidad posible. Dicho esto, se debe estudiar su comportamiento e integrar esta información en el programa para aumentar su realismo.
3. En esta investigación, no se calibraron todos los parámetros presentes en el programa, por lo que se recomienda realizar tomas de datos en otras situaciones de flujo, que permitan calibrar aquellos parámetros de menor relevancia (que no fueron calibrados en esta investigación) o aquellos

parámetros que no se podían calibrar con la información levantada en el presente estudio.

4. Debido al alto costo económico de realizar una medición única y simultánea en todas las intersecciones de la red, sería interesante comparar los resultados de una investigación que efectivamente levante los datos de esta manera, para ver si vale la pena incurrir en el costo económico de tomar todos los datos necesarios de una sola vez.
5. El comportamiento de los automovilistas varía con el tiempo, por lo que las simulaciones realizadas para horizontes de tiempo muy grandes, pueden no reflejar de manera certera la realidad. Por lo mismo, son necesarias futuras calibraciones para los mismos parámetros una vez que pasen un par de años.
6. Debido a que la metodología utilizada en esta investigación presentó mejores resultados que investigaciones de calibración anteriores, se recomienda altamente la implementación y utilización de metodologías lo más similares a esta en futuros estudios.

BIBLIOGRAFÍA

Adimark (2003). Mapa Socioeconómico de Chile. Retrieved from www.adimark.cl/medios/estudios/informe_mapa_socioeconomico_de_chile.pdf.

Bernauer, E., Breheret, L., Algers, S., Boero, M., Di Taranto, C., Dougherty, M., Grabard, J.-F. (1998). A Review of Micro-Simulation Models (pp. 1 – 60). Retrieved from <http://www.its.leeds.ac.uk/smartest>

Coeymans, J.E., Neely, C. (1984). Parámetros fundamentales de tráfico en el caso de Santiago. *Apuntes de Ingeniería*, Vol 15, 85-113.

Doung, D. (2011). Calibration and validation of VISSIM microscopic traffic simulation model parameters using Pareto Archived Dynamically Dimensioned Search. *Thesis*, University of Waterloo, Ontario.

Espinosa, C., Coeymans, J. E. (2004). Calibración de parámetros de transporte público y privado en tráfico mixto para modelos micro: Getram en Santiago. *Masters of Science Thesis*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Gao, Y. (2008). Calibration and Comparison of the VISSIM and INTEGRATION Microscopic Traffic Simulation Models. *Masters of Science Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Gomes, G., & Horowitz, R. (2004). Calibration of VISSIM for a Congested Freeway (pp. 1–36). *California PATH Research Report*.

Jie, L., Fangfang, Z., van Zuylen, H., & Shoufeng, L. (2011). Calibration of a Microsimulation Program for a Chinese City. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20, 263–272. doi:10.1016/j.sbspro.2011.08.032

Jobanputra, R., & Vanderschuren, M. (2012). Calibration and Validation of a Micro-Simulation Model for a Local Arterial in Cape Town. In *Abstracts of the 31st Southern African Transport Conference (SATC 2012)* (Vol. 27, pp. 12–23). Pretoria, South Africa.

Lacalle, M., Coeymans, J. E. (2003). Calibración del microsimulador Aimsun para flujo ininterrumpido en la ciudad de Santiago. *Masters of Science Thesis*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Manjunatha, P., & Vortisch, P. (2012). Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic. *TRB 2013 Annual Meeting*. Retrieved from <http://docs.trb.org/prp/13-3677.pdf>

McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *TECHNOMETRICS*, 21(2), 239 – 245.

Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer.

Miller, D. M. (2009). Developing a Procedure To Identify Parameters for Calibration of a VISSIM Model. *Masters of Science Thesis*, Georgia Institute of Technology.

Otkovic, I., Tollazzi, T., & Sraml, M. (2013). Calibration of microsimulation traffic model using neural network approach. *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5965 – 5974.

Park, B. (Brian), & Qi, H. (Maggie). (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. *Transportation Research Record*, 1934(1), 208–217. doi:10.3141/1934-22

Park, B. B., & Qi, H. M. (2006). Microscopic simulation model calibration and validation for freeway work zone network - a case study of VISSIM. *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 1471–1476. doi:10.1109/ITSC.2006.1707431

Park, B. B., & Schneeberger, J. D. (2002a). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation : A Case Study of VISSIM for a Coordinated Actuated Signal System by. *TRB Annual Meeting*, (November 2002), 1–18.

Park, B. B., & Schneeberger, J. D. (2002b). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Case Study of VISSIM Simulation Model for a Coordinated Actuated Signal System. *Transportation Research Record*, (03), 185–192.

Park, B. B., & Won, J. (2006). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook. *Virginia Transportation Research Council*. Retrieved from http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/07-cr6.pdf

PTV Planung Transport Verkehr AG. (2012). VISSIM 5.40 - User Manual. Retrieved from www.ptv-vision.com

Velazco, L., Coeymans, J. E. (2004). Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: GETRAM en Santiago. *MSc Thesis*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Yongzheng, K., Man, Z., Huili, Z., & Changchun, Z. (2007). Parameter Calibration of VISSIM Simulation Model based on the Orthogonal Experiment. *School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang, Hebei, China*, 1–7.

Yu, L., Yu, L., Chen, X., Wan, T., Guo, J., & Transportation, B. (2006). Calibration of Vissim for Bus Rapid Transit Systems in Beijing Using GPS Data. *Journal of Public Transportation*, 239–257.

Zhizhou, W., Jian, S., & Xiaoguang, Y. (2005). Calibration of Vissim for Shanghai Expressway using Genetic Algorithm. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, E.E.U.U.*, 2645–2648.

ANEXOS

8 ANEXOS

Esta sección fue destinada para mostrar el código utilizado para la programación del algoritmo genético (A.G.) en Visual Studio, *software* de programación que emplea el lenguaje C#.

Cada clase del proyecto programado se presenta en una sección distinta. Se omite el código de los métodos debido a que ocupan mucho espacio y para que el código no pueda ser reutilizado de manera directa, sin autorización.

8.1 Clase SensitivityA

```
public class SensitivityA
{
    private Vissim vissim;
    private Net net;
    private Graphics graf;
    private DrivingBehaviorParSet urbano;
    private Simulation sim;
    private QueueCounter contadorCola;
    private DesiredSpeedDecision speedDecision;
    private Evaluation eval;
    private List<int> distribucionesVelocidad;
    private List<double> colasMedidas;
    private List<DesiredSpeedDecision> speedDecisions;
    private List<double> colasSimuladas;

    public SensitivityA(Vissim vissim){}
    public void sensAXADD(double delta){}
    public void evaluacionParámetros(double[] parámetros, int idEvaluacion){}
    public void sensBXADD(double delta){}
    public void sensBXMULT(double delta) {}
    public void sensSIMRES(int delta) {}
    public void sensOBSERVEDVEHICLES(int delta) {}
    public void sensMAXLOOKAHEAD(int delta){}
    public void sensMINHEADWAY(double delta) {}
    public void sensDESIREDSPED(){}
```

```
    public double calibrar(double[] parámetros){}
    public List<double> ultColaSim(){}
```

```
    public void calibrarSanPablo(double[] parámetros){}
    public double nCalibrar(List<double> parámetros){}
```

```
}
```

8.2 Clase nGen

```

class nGen : ICloneable
{
    private bool hasResult = false;
    private double result = Double.MaxValue;
    private List<double> coefs = new List<double>();
    private List<double> colasSimuladas;
    private static Random r = new Random();

    public List<double> Coefs{}

    public double Result{}
    public nGen(){}
    public List<double> ColasSimuladas{}
    public void CheckCoefs(){}
    public static nGen GenerateRandomGen(){}
    private static double GetRandomNumber(double minimum, double maximum)
    {}
    public double Eval(){}
    public object Clone(){}
    public override bool Equals(object obj){}
}

```

8.3 Clase Principal

```

public class Principal
{
    public static string rutaNico
    public static string rutaU
    public static string rutaNueva
    public static string rutaSanPablo
    public static string rutaValidacion
    public static string rutaValidacionF

    public static void Main(string[] args)
    {
        string ruta = rutaValidacionF + ".INP";
        Vissim vissim = new VissimClass();

        vissim.LoadNet(ruta, 0);

        SensitivityA prueba1 = new SensitivityA(vissim);

        #region Validar Red Definitiva
        #endregion

        #region probar1setDeParámetros
        #endregion

        Config.sens = prueba1;
        nGA nsimulation = new nGA();
    }
}

```

```

        nsimulation.Init();
        nsimulation.Print();
        nsimulation.Simulate();
        nsimulation.PrintResult();
        Console.ReadLine();

        Finish:
    }
}

```

8.4 Clase nGA

```

class nGA
{
    private int generations = 1000;
    private double tolerance = 2.0;
    private int popSize = 50;
    private double crossRate = 0.5;
    private double mutRate = 0.1;
    private List<nGen> startGeneration;
    private nGen best;
    private double min = double.MaxValue;
    private int numGen;
    private string errorMessage = "";
    private Random r = new Random((int)DateTime.Now.Ticks);

    public nGA(){}
    public void Init(string paramsFile){}
    private void ReadParams(string file) {}
    public void Print(){}
    public void PrintGen(nGen gen){}
    public void PrintActualBest(){}
    public void PrintActual(List<Gen> list){ }
    public void PrintResult(){}
    public void WriteGeneration(List<nGen> list, int nGeneracion){}
    public void Simulate(){}
    private void Crossover(nGen mom, nGen dad, ref nGen son1, ref nGen son2)
    { }
    private void CrossPrueba(nGen mom, nGen dad, ref nGen son1, ref nGen
son2) {}
    private void Mutate(ref nGen gen, double factor){}
    private nGen Torneo(nGen g1, nGen g2){}
    private nGen RandomGen(List<nGen> list){}
    private nGen Ranking(List<nGen> list){}
    private int Compare(double x, double y){}
}

```