



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

DISEÑO DE UN PLAN DE EVACUACIÓN PARA ALUVIONES EN LA CUENCA DEL
RÍO SALADO (ATACAMA) USANDO MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JAVIERA ANTONIA YBAR MIÑOS

PROFESORES GUÍA:
CRISTIÁN EDUARDO CORTÉS CARRILLO
PABLO ANDRÉS REY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO TIRACHINI HERNANDEZ
LUIS YAÑEZ SANDIVARI

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE
Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: JAVIERA ANTONIA YBAR MIÑOS
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: CRISTIÁN EDUARDO CORTÉS CARRILLO, PABLO ANDRÉS REY

DISEÑO DE UN PLAN DE EVACUACIÓN PARA ALUVIONES EN LA CUENCA DEL RÍO SALADO (ATACAMA) USANDO MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

El modelamiento del comportamiento de las personas durante una evacuación producto de un desastre es complejo debido a que los usuarios se comportan de manera muy difícil de predecir. Cada emergencia en particular tiene sus características propias y, por lo mismo, se debe tener especial cuidado con las peculiaridades y el impacto producto de la emergencia para cada caso estudiado, así como el comportamiento de los usuarios que también se ve modificado de acuerdo a la evolución y al impacto que produce el desastre en el espacio y en el tiempo sobre el funcionamiento de la ciudad. Este trabajo de tesis se enfoca en la construcción de una herramienta de microsimulación de tráfico que permite modelar con detalle y realismo un proceso de evacuación de vehículos y peatones de una ciudad de tamaño moderado ante el evento de una emergencia. En este caso de estudio, se considera un evento de aluvión en la cuenca del río Salado, ciudad de Chañaral, norte de Chile.

Como apoyo al análisis y a la toma de decisiones en esta situación excepcional, los modelos usuales de equilibrio no entregan información con el suficiente detalle para tomar buenas decisiones de evacuación. Por ello, se propone la construcción de una metodología innovadora para modelar adecuadamente el movimiento de vehículos y peatones siguiendo una estrategia de evacuación ante el evento de una emergencia, con énfasis en generar módulos especializados en el microsimulador Paramics vía API, diseñados para modelar en detalle la interacción entre vehículos y peatones en condición de congestión, lo cual requirió cambios medulares al software empleado, lo que figura una contribución importante del presente trabajo.

El enfoque que se propone es dinámico por sus características de movimiento de entidades siguiendo la dinámica de la evacuación. Además, el modelamiento está inmerso en un entorno con incertidumbre (estocástico), y en ese contexto, esta plataforma permitirá simular de mejor manera el comportamiento de los individuos durante la emergencia y así poder considerar no solo los parámetros asociados a estándares o peculiaridades de los casos en estudio, sino también, estrategias para permitir una evacuación más eficiente.

Para evaluar la metodología propuesta, esta se aplica a diferentes escenarios con enfoques de aumento de población y diferencias en la cantidad de evacuados según modos de transporte, considerando dos estrategias, aumento de refugios y disposición de buses de emergencia, estrategias que son empleadas para reducir los tiempos de viaje promedio y brindar apoyo a los evacuados. Esto permite reconocer el tamaño de la población necesario para saturar la red y la capacidad del simulador, también establecer la conveniencia de las estrategias según proporción de evacuados en vehículos o a pie y finalmente, identificar que los tiempos de viaje promedio para cada modo de transporte disminuyen de forma considerable al aumentar los refugios. Finalmente, se observa que los buses no presentan mejoras relevantes en los tiempos totales, lo cual se explica por el aumento en los tiempos de espera dentro de los buses de emergencia que solo parten una vez que se ha completado su capacidad de transporte.

A mis padres, Lucía y Mario

Agradecimientos

En primer lugar, expresar mi eterna gratitud a mi familia: Mis padres Lucía y Mario, por confiar plenamente en mis capacidades y decisiones, gracias por la crianza y la sabiduría que me brindan. A mis hermanos Carlos, David, Yasfir y Marito, que toda mi vida han estado presentes y han sido fundamentales para el desarrollo de mi profesión. A mis primas Adriana, Ma. Luisa, Francisca y Marta, que siempre estuvieron preocupadas por mí a lo largo de la carrera, me acogieron en sus casas como una hija más y me cuidaron cada vez que (de porfiada) no quería ir al médico para seguir estudiando.

Agradezco a mis amigos Paredes y Gabi, son mi alegría y orgullo, el apoyo de ustedes y el cariño incondicional me dieron fuerza para enfrentar los nuevos desafíos y no rendirme en el intento, también a Benja, Sol, Matías, Esteban, Felipe. Todos ustedes no solo me entregaron amistad, sino también me entregaron una familia para contar lejos de mi pueblo. Al gran equipo del básquetbol, que durante años fue la salvación al constante estrés de la Universidad y fue el medio para conocer personas maravillosas en mi vida.

Dar las gracias a las personas que ayudaron a llevar a cabo este trabajo de tesis. Partiendo por los inicios de la especialidad, con los profesores del departamento de transporte y por el apoyo indiscutible de Mónica Chávez y Jacqueline Suárez. También, mi gratitud eterna a Raúl por ser una persona comprometida en términos académicos y laborales, al mismo tiempo, una persona que me brindó una gran amistad. Asimismo, agradecer profundamente a mis profesores guías Cristián Cortés y Pablo Rey, quienes me entregaron no solo las herramientas necesarias para esta etapa, sino también la orientación y el apoyo suficiente en todo momento. Particularmente, esta Tesis comenzó a inicios de la pandemia 2020, prácticamente dos años de teletrabajo, fueron momentos complicados donde me sentí más de alguna vez desorientada y estancada, aún así, cada vez que me reunía virtualmente con Cristián y Pablo lograban mostrarme la luz al final del túnel y llenarme de esperanza con respecto a mi trabajo y su progreso.

Finalmente, se agradece el soporte de los proyectos ANID/FONDECYT/REGULAR 1191200, del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería ANID PIA/APOYO AFB180003 y del Concurso de Proyectos Regulares de Investigación LPR19-11, año 2019, Universidad Tecnológica Metropolitana.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos Generales	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Resultados Esperados	3
1.4. Estructura de la tesis	4
2. Marco Conceptual	5
2.1. Modalidades de evacuación ante emergencia	6
2.2. Enfoques para modelos de evacuación	9
2.2.1. Modelos estáticos y dinámicos	12
2.2.2. Enfoques deterministas y estocásticos	13
2.3. Objetivos de los modelos de evacuación	14
2.3.1. Modelos orientados a maximizar el número de evacuados	14
2.3.2. Modelos orientados a minimizar el tiempo total de evacuación	15
2.4. Simulación de tráfico para enfrentar problemas de evacuación	19
2.4.1. Simuladores de tráfico más usados	20
2.4.2. Microsimulador de tráfico PARAMICS	22
2.5. Síntesis y observaciones finales	24
3. Metodología para la modelación	25
3.1. Caso de Estudio	25
3.1.1. Antecedentes	25
3.1.2. Situación Actual	28
3.2. Preparación de la Red de Simulación e Interfaz de Programación de Aplicaciones para el Comportamiento de la Demanda	29
3.2.1. Codificación de la Red	29
3.2.2. Definición de la población	30
3.2.3. Rutas fijas para peatones	32
3.2.4. Generación de viajes	33
3.2.5. Evacuación mixta para vehículos y peatones	35
4. Aplicación de la metodología	43
4.1. Escenarios y Estrategias	43
4.1.1. Escenarios	43

4.1.2. Estrategias	44
4.2. Resultados y análisis	45
4.2.1. Escenario: Caso Base	47
4.2.1.1. Comportamiento de la evacuación	47
4.2.1.2. Tiempos de viaje promedio	53
4.2.2. Escenarios: Aumento de población	55
4.2.3. Escenarios: Cambios proporción modos de transporte	62
4.2.4. Síntesis de resultados	70
5. Conclusión	72
5.1. Síntesis del estudio	72
5.2. Resultados y contribuciones	72
5.3. Limitaciones e investigaciones futuras	73
Bibliografía	75

Índice de Tablas

2.1. Modelos y simulación para evacuación. Clasificación de la literatura considerada.	19
3.1. Sistemas de Alertamiento Técnico por Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Remoción de Masas	27
3.2. Datos recolectados para la definición de la población	32
3.3. Distribución de modos de transporte según parque vehicular Chañaral.	34
3.4. Parámetros fijados para cada ventana de tiempo	39
3.5. Parámetros para velocidades en vectores mixtos.	40
4.1. Escenarios considerados en los experimentos computacionales.	44
4.2. Tiempo de viaje (Caso Base, 6 horas).	53
4.3. Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 6 horas).	53
4.4. Tiempo de viaje (Caso Base, 5 horas).	54
4.5. Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 5 horas).	54
4.6. Tiempo de viaje (Caso Base, 4 horas).	54
4.7. Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 4 horas).	55
4.8. Tiempo de viaje (Caso Base, 3 horas).	55
4.9. Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 3 horas).	55
4.10. Tiempo de viaje sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas).	57
4.11. Intervalos de confianza sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas).	57
4.12. Tiempo de viaje 3 refugios (Aumento de población, 4 horas).	59
4.13. Intervalos de confianza 3 refugios (Aumento de población, 4 horas).	59
4.14. Tiempo de viaje buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas).	60
4.15. Intervalos de confianza buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas).	61
4.16. Tiempo de viaje 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas).	62
4.17. Intervalos de confianza 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas).	62
4.18. Tiempo de viaje sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas).	64
4.19. Intervalos de confianza sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas).	64
4.20. Tiempo de viaje 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas).	66
4.21. Intervalos de confianza 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas).	66
4.22. Tiempo de viaje buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas).	68

4.23. Intervalos de confianza buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas).	68
4.24. Tiempo de viaje 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas).	70
4.25. Intervalos de confianza 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas).	70

Índice de Ilustraciones

2.1. Curvas de respuesta de comportamiento de evacuación (<i>Fuente:</i> Li et al. (2013))	7
2.2. Intersección típica de cuatro ramas (<i>Fuente:</i> Zhang y Chang (2014))	9
2.3. Inclusión a la intersección de una fase exclusiva de giro a la derecha (<i>Fuente:</i> Zhang y Chang (2014))	9
2.4. Gráfico acíclico desplegado (<i>Fuente:</i> Desrosiers et al. (1995))	11
2.5. Red de evacuación que conecta las zonas de evacuación y los destinos (<i>Fuente:</i> Stepanov y Smith (2009))	11
3.1. Impacto provocado por Aluvión 2015.	27
3.2. Plano de Evacuación por Remoción de Masas, Región de Atacama, Chañaral 2019	27
3.3. Impacto Aluviones 2015 y 2017 en Chañaral.	28
3.4. Mapa Chañaral. <i>Fuente:</i> Bing Maps.	28
3.5. Modelo para deslizamiento de material (Alves et al., 2019)	29
3.6. Zonas seguras para la evacuación (Alves et al., 2019)	29
3.7. Intersecciones con prohibición de movimientos.	30
3.8. Ejemplo de movimientos permitidos en intersecciones conflictivas.	31
3.9. Zonificación Red Chañaral.	32
3.10. Red Chañaral codificada en PARAMICS.	33
3.11. Representación vehículos en PARAMICS.	34
3.12. Rutas fijas para peatones.	35
3.13. Generación de viajes variando parámetro α para vehículos.	38
3.14. Generación de viajes variando parámetro β para vehículos.	38
3.15. Generación de viajes variando parámetro α para peatones.	38
3.16. Generación de viajes variando parámetro β para peatones.	38
3.17. Rutas fijas en el contexto de evacuación mixta.	40
3.18. Representación densidad en los arcos mixtos respecto a peatones.	42
3.19. Velocidad con respecto a la densidad de los peatones según número de vehículos.	42
3.20. Flujo con respecto a la densidad de los peatones según número de vehículos.	42
4.1. Zonificación Caso de Estudio Chañaral	45
4.2. Zonas mixtas entorno a cada refugio y nuevas rutas fijas evacuar peatones	46
4.3. Puntos de encuentro y rutas para buses de evacuación	46
4.4. Generación de viajes Grupos de personas durante 6 horas Caso Base.	47
4.5. Generación de viajes Vehículos durante 6 horas Caso Base.	48
4.6. Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 6 horas).	48

4.7. Generación de viajes Grupos de personas durante 5 horas Caso Base.	49
4.8. Generación de viajes Vehículos durante 5 horas Caso Base.	49
4.9. Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 5 horas).	50
4.10. Generación de viajes Grupos de personas durante 4 horas Caso Base.	50
4.11. Generación de viajes Vehículos durante 4 horas Caso Base.	51
4.12. Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 4 horas).	51
4.13. Generación de viajes Grupos de personas durante 3 horas Caso Base.	52
4.14. Llegadas de los evacuados a los refugios Caso Base.	52
4.15. Generación de viajes Vehículos durante 3 horas Caso Base.	52
4.16. Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 3 horas).	53
4.17. Generación de viajes de peatones sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas).	56
4.18. Generación de viajes de vehículos sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas	57
4.19. Generación de viajes de peatones 3 refugios (Aumento de población, 4 horas).	58
4.20. Generación de viajes de vehículos 3 refugios (Aumento de población, 4 horas	58
4.21. Generación de viajes de peatones buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas).	60
4.22. Generación de viajes de vehículos buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas	60
4.23. Generación de viajes de peatones 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas).	61
4.24. Generación de viajes de vehículos 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas	62
4.25. Generación de viajes de peatones sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas).	63
4.26. Generación de viajes de vehículos sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas	64
4.27. Generación de viajes de peatones 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas).	65
4.28. Generación de viajes de vehículos 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas	65
4.29. Generación de viajes de peatones buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas).	67
4.30. Generación de viajes de vehículos buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas	67
4.31. Generación de viajes de peatones 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas).	69
4.32. Generación de viajes de vehículos 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas	69

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En operación normal de una ciudad, los subsistemas de transporte, producción y servicios interactúan de manera dinámica y la oferta se ajusta a la demanda que ocurre tanto en dimensiones espaciales como temporales. Sin embargo, cuando ocurre un desastre, las condiciones de los subsistemas cambian, y el comportamiento de los usuarios también se modifica de acuerdo con la evolución y el impacto que produce el desastre en espacio y tiempo sobre el funcionamiento de la ciudad. En esta tesis el foco estará en los desastres naturales y su impacto potencial producto de aluviones, los cuales representan un problema real en la zona de la cuenca del río Salado, en particular considerando recientes ocurrencias de estos fenómenos en el sector cercano a la ciudad de Chañaral. La idea es explorar la forma de realizar una evacuación frente a la alerta de este tipo de desastre natural, donde existe un tiempo limitado para reaccionar y poder dar instrucciones a las personas para evacuar, tanto en vehículo particular, en buses destinados a este objetivo, así como personas moviéndose a pie. Para apoyar el análisis y la toma de decisiones en esta situación excepcional, los modelos usuales de equilibrio no entregan la información necesaria respecto del comportamiento de los usuarios que son evacuados con el suficiente detalle. En este caso, un esquema de simulación y en particular de microsimulación de tráfico se vislumbra como una herramienta apropiada para modelar los movimiento de vehículos y personas durante un proceso de evacuación. Se debe mencionar que actualmente se dispone de un modelo detallado de la propagación de aluviones en el sector de Chañaral, con mapas precisos y modelos predictivos del impacto para diversos escenarios de ocurrencia de aluviones (Alves et al., 2019).

Con respecto a la simulación para la evacuación de la ciudad, el proceso de evacuación depende de las características del desastre y del comportamiento de la población (Murray-Tuite y Wolshon, 2013), además del entorno en que se desarrolla, considerando puntos de referencia, señales de evacuación y experiencias con desastres pasados (Liu et al., 2008). Respecto de los modelos de optimización a formular para hacer eficiente el proceso de evacuación, es posible basarse en distintos medios de evacuación, ya sea en vehículos privados, modos de transporte masivo o la integración de los anteriores (Bayram, 2016); además, se debe incluir la gestión con respecto al *departure time*, para la representación en forma simultánea o por

etapas, junto con procesos en colas (Chen y Zhan, 2014). En general, en los problemas de ruteo se presentan embotellamientos y cambios en la red que obligan a replantear las condiciones del modelo. Es decir, se debe trabajar sobre una formulación dinámica, que permita realizar cambios según los acontecimientos que se presentan; para abarcar este aspecto, las revisiones de Yang et al. (2018) y Dhamala et al. (2018) entregan las herramientas necesarias, en especial el segundo artículo mencionado, que en conjunto con Bayram (2016), entregan un enfoque de modelamiento que considera no sólo la dinámica del sistema, sino también, la incertidumbre con el fin de generar un modelo más realista del proceso de evacuación de un desastre natural. Zhang y Chang (2014) proponen un modelo de naturaleza dinámica, que integra la optimización de los movimientos de flujo mixto (vehículos y peatones) en un contexto de evacuación, comparando la eficiencia de un sistema de fases de semáforos que cambia dinámicamente versus un escenario bajo señales pre-temporizadas .

La exploración realizada en la literatura entrega herramientas que permiten resolver algoritmos heurísticos para problemas de evacuación a gran escala. Si bien, las revisiones contemplan objetivos similares, las consideraciones que se presentan excluyen ciertos parámetros y etapas de resolución, o simplemente se enfocan en un tema específico. En la búsqueda de complementar este tipo de estudios, la literatura sobre microsimulación de tráfico considera aspectos complementarios para estos análisis, incluyendo enfoques de asignación de tráfico, modelamiento del tiempo de viaje para representar la congestión y los enfoques de propagación del flujo. También se explora literatura en temas tales como el comportamiento de los usuarios, la existencia de modos de viajes mixtos, capacidades del sistema de transporte, características de los refugios y sincronización en los tiempos de fases en los semáforos. Todos estos elementos permitirán elaborar una nueva metodología, donde la innovación consiste en abordar todas las etapas mencionadas de forma integrada, lo que permitirá enfrentar el problema de manera eficiente otorgándole originalidad y complejidad al trabajo de tesis.

Si bien el problema de ruteo de vehículos ha sido analizado en varios estudios, no todos consideran las características mencionadas anteriormente de forma integrada. Para enfrentar el desafío planteado, se propone desarrollar un *Application Programming Interface* (API) previo al diseño de la red, por medio del software Paramics, lo que permitirá construir nuevas una herramienta concreta de modelamiento de una proceso de evacuación, que incluye aspectos realistas del proceso a nivel microscópico. Esta herramienta permitirá implementar estrategias y analizar sus impactos bajo diversos escenarios. Posteriormente, se valida la herramienta a partir de un caso de estudio real que se simula en forma muy realista, lo que permite además establecer los alcances tanto del simulador como del propio caso de estudio.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo principal de esta tesis es diseñar de forma sistemática una metodología para enfrentar la evacuación de los habitantes de una zona urbana que son candidatos a sufrir un impacto importante frente a un evento de desastre natural. Esta metodología implica combinar herramientas de simulación con optimización, con un énfasis especial en la comunicación del simulador con la Interfaz de Programación, lo que permite construir nuevas herramientas

de modelamiento capaces de representar comportamientos de los evacuados con detalles imposibles de modelar bajo un esquema de simulación estándar. Además, se busca definir las rutas que deben seguirse, la reoptimización de señalética y semáforos, decidir como particionar a los habitantes, con el fin de que se muevan en vehículos, a pie, e incluso por medio de otros modos tales como buses o vans de emergencia. Asimismo, esta tesis propone protocolos de evacuación frente a diversas magnitudes del evento bajo análisis, los cuales serán evaluados posteriormente ante eventos de diversa magnitud, cuantificando el impacto de tales medidas usando la plataforma de simulación propuesta en esta tesis.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar modelos existentes para resolver problemas de evacuación, considerando los distintos enfoques presentados, junto con las consideraciones planteadas.
- Integrar de forma eficiente distintos modos de viaje, y poder simular tanto vehículos como peatones, además de evaluar la opción de disponer de vehículos destinados específicamente para este tipo de emergencia.
- Construir el caso de estudio basándose en las características de la cuenca del río Salado y su impacto en la ciudad de Chañaral.
- Desarrollar una API que permita construir nuevas herramientas y metodologías de modelamiento como también implementar estrategias y analizar sus impactos bajo distintos escenarios.
- Definir en detalle las características del modelo; entre ellas, la demanda de viajes de evacuación y los atributos de los arcos de la red.
- Presentar un análisis detallado de los resultados, comparar las alternativas e identificar los alcances del simulador y el caso de estudio.
- Desarrollar conclusiones, entregar recomendaciones útiles y direcciones futuras de investigación.

1.3. Resultados Esperados

Con este trabajo se espera poder desarrollar una metodología que permita obtener resultados eficientes en un problema de evacuación a gran escala ante la emergencia de un desastre natural. Se espera contar con una metodología que considere de forma integrada una selección de los enfoques estudiados, y de aspectos realistas de los procesos de evacuación. Se espera contar con una herramienta robusta que ante la variación de parámetros del problema pueda generar resultados consistentes permitiendo extender el uso del modelo a otro tipo de catástrofes de características similares. También se desarrolla una herramienta de simulación adaptada a casos genéricos de diseño con capacidad de entregar reportes y bases de datos en forma estructurada. El simulador final es Paramics con un API construido *ad-hoc* para esta tesis, con redes codificadas y bases de datos con el registro de los resultados de las pruebas que se reportan en el capítulo cuatro de esta tesis.

1.4. Estructura de la tesis

A continuación, en el segundo capítulo de esta tesis se procede a realizar una revisión bibliográfica abarcando temas variados relevantes para este trabajo: modalidades de evacuación ante emergencia; enfoques para modelos de evacuación; objetivos para modelos de evacuación y literatura sobre los distintos microsimuladores de tráfico y sus diferencias.

Luego, en el capítulo tres se detalla la metodología de modelación, inicialmente se presenta la información correspondiente al caso de estudio y la información recopilada, en ello se describe la preparación de la red de simulación, considerando la codificación de la red y definición de la demanda. A su vez, dentro del mismo capítulo se especifica el desarrollo y los algoritmos adoptados para trabajar dentro de la Interfaz de Programación de Aplicaciones con el fin de representar el comportamiento de la demanda durante la evacuación. Para esto, se cuenta con la librería de funciones que viene incorporada en el software PARAMICS, permitiendo manipular los modelos de Seguimiento Vehicular y Cambio de Pista.

En continuidad, el capítulo cuatro presenta la aplicación de la metodología detallada en el capítulo previo. Primero, se definen los escenarios que representan distintos enfoques para el caso de estudio, ya sea aumento de población como diferencias en la cantidad de evacuados según modos de transporte; luego, se describen las estrategias que se emplean con el fin de reducir los tiempos de viaje promedio y entregar más herramientas disponibles a los individuos para la evacuación. Posteriormente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos a raíz de las simulaciones. Para finalizar, el último capítulo de esta tesis sintetiza los logros del trabajo, entrega las conclusiones tanto de la metodología como de los resultados y explora líneas de investigación futura.

Capítulo 2

Marco Conceptual

En este capítulo se revisa la literatura sobre planes de evacuación ante emergencia, con especial énfasis en el modelamiento y simulación. Se observan las modalidades de evacuación ante emergencia, considerando los modos de transporte y la interacción entre ellos, junto con los métodos para la evacuación de cada modo en particular. Se estudian y clasifican diferentes enfoques de modelamiento frente a la evacuación. Se consideran modelos estáticos y dinámicos, como también problemas deterministas y bajo incertidumbre. A su vez, se analizan los objetivos de los modelos de evacuación y las variables utilizadas para modelar decisiones de ruteo de vehículos, asignación a refugios y la localización de estos, reparto de demanda y programación de semáforos. Este análisis se resume en una tabla que muestra la literatura revisada sobre los temas estudiados de modelos de optimización o simulación ante evacuación. Finalmente, se presenta una revisión para la literatura de simulación de tráfico para enfrentar problemas de evacuación, seguido del análisis de distintos programas de simulación, con especial énfasis en la microsimulación a través del programa computacional PARAMICS.

La evacuación ante emergencia hace referencia al abandono o retiro de personas de un cierto lugar con el fin de asegurar y permitir salvaguardar la integridad física de ellas. Los problemas de evacuación suelen identificarse por las componentes planteadas por Southworth (1991) y Tuydes (2005). Para estos autores, el análisis de riesgos se centra de forma genérica en el tipo de desastre, dónde y cuándo se generará, considerando el alcance de los posibles daños. Para los aspectos de riesgos en la población, se refieren a posibles daños a la infraestructura y la red de transporte. Además, el análisis de refugios se debe encargar de determinar e identificar las ubicaciones seguras, dónde y cómo abrir los refugios y con cuánta capacidad. Para el comportamiento social, se investiga la respuesta de la población a una orden de evacuación y se determinan las tasas de participación en la evacuación, los tiempos de movilización y las opciones de destino de los evacuados. Estos aspectos influyen en los movimientos y retrasos en la red de forma interesante. Por último, la gestión del tráfico incluye la asignación de la demanda de tráfico especificada por peligros, vulnerabilidad y análisis de comportamiento en las rutas de evacuación.

2.1. Modalidades de evacuación ante emergencia

Junto con las componentes mencionadas anteriormente que permiten representar y entender de forma general los problemas de evacuación, se requiere una planificación con etapas bien establecidas. Dentro de la revisión de literatura de Stepanov y Smith (2009), se plantean cinco pasos para la planificación de evacuación ante emergencia.

- El primer paso corresponde a la *generación de viajes*, donde es necesario evaluar el tamaño de la población presentada en un área específica y un momento determinado.
- Luego, la *evaluación de la tasa de carga de tráfico*, es decir, evaluar un plan que considere horas establecidas para evacuar y procedimientos específicos o identificar la función distribución que represente el comportamiento asociado al proceso de partida de los evacuados.
- Seguido de la *definición e identificación de centros de refugio o áreas seguras*.
- El cuarto se refiere a la *asignación de ruta de tráfico*. La práctica del modelamiento de evacuación utiliza como criterios más comunes a optimizar, el tiempo de despeje total, la distancia total recorrida, el tamaño de la cola y la probabilidad de bloqueo.
- Finalmente, los autores consideran la *verificación del plan de evacuación* como el quinto paso. Este consiste en determinar si el plan diseñado es propenso a la congestión del tráfico o no proporciona una evacuación oportuna. Para ello se deben considerar algunos escenarios alternativos o la aplicación de herramientas de control de tráfico.

En torno a la generación de viajes y la evaluación de la tasa de carga de tráfico, generalmente se intenta capturar algunos de los factores sociales y de amenaza que influyen en la decisión de evacuar con el objetivo de producir una demanda de simulación de tráfico dependiente del tiempo. Esta demanda dependiente del tiempo se puede representar por el enfoque de un paso, el cual determina simultáneamente el número de hogares de evacuación y los horarios de salida. Pel et al. (2012) plantean que la demanda dinámica de viaje se modela mediante la aplicación de un modelo logit binario repetido en el que, a menudo, se pronostica el porcentaje de personas que deciden evacuar y partir en el presente, o se pospone la decisión de evacuar. También es posible representar la generación de viajes a partir del enfoque de dos pasos, donde el primer paso consiste en estimar el número de hogares evacuados y el segundo paso determina el tiempo de partida de estos hogares (Murray-Tuite y Wolshon (2013)). Particularmente, en el segundo paso del último enfoque se trabaja a partir de los tiempos de partida. El tiempo dedicado a responder a una advertencia a menudo sigue una curva en S (Sorensen (2000)). Para observar un claro ejemplo de esta curva, Li et al. (2013) analiza la curva de respuesta de evacuación durante el huracán Irene en *Cape May County, New Jersey* (ver Figura 2.1). Para modelar la elección del horario de salida de los viajeros se aplica una curva de respuesta exógena que indica el porcentaje de desviaciones en cada intervalo de tiempo, la curva de respuesta de salida puede elegirse entre muchas distribuciones diferentes, entre ellas, salida instantánea, distribución uniforme, Poisson, Weibull, Sigmoide (Pel et al. (2012)). Estas dos últimas se utilizan con mayor frecuencia y se dice que son las más realistas. Ambas distribuciones se abordan con mayor detención por Pel et al. (2012). La distribución Weibull está dada por $D(t) = 1 - \exp(-\beta t^\gamma)$, donde $D(t)$ es el porcentaje acumulado de personas que han evacuado hasta el instante t y la forma de distribución está dada por los parámetros β y γ , ambos representados para distintos valores en la Figura 2.1. La distribución Sigmoide esta dada por $D(t) = (1 + \exp(-\alpha(t - h)))^{-1}$, donde $D(t)$ tiene la misma finalidad

que en la expresión anterior y los parámetros α y h definen la forma de la curva (Figura 2.1). A raíz de referencias sólidas, las distribuciones explicadas por Pel et al. (2012) entregan herramientas útiles y una base fundamental para el modelado del comportamiento de los individuos en un contexto de evacuación. Con el objetivo de adquirir un dominio sobre las

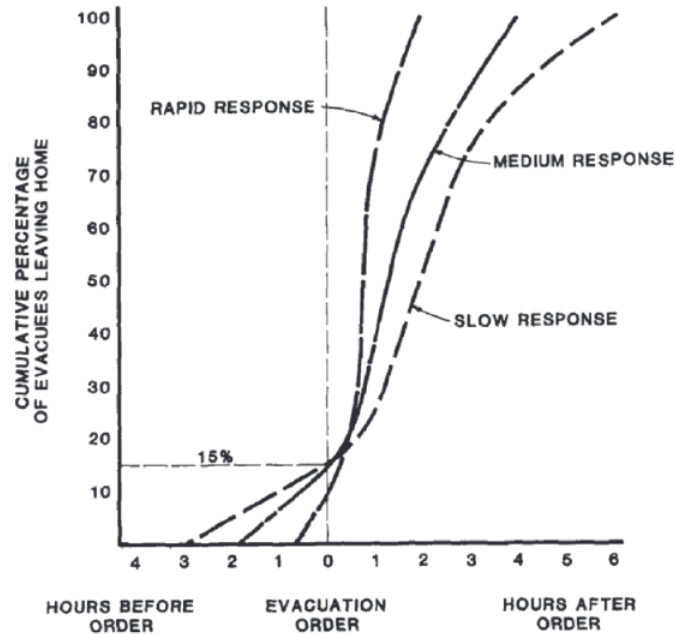


Figura 2.1: Curvas de respuesta de comportamiento de evacuación (*Fuente: Li et al. (2013)*)

salidas de los individuos, Stepanov y Smith (2009) utiliza modelos de colas dependientes del estado M/G/c/c para hacer frente a la congestión y los retrasos en los enlaces de carretera. Esto permite tomar decisiones ante dificultades durante la emergencia. También es posible plantear una estrategia de control como la propuesta por So y Daganzo (2010), esta entrega un modelo que utiliza la estrategia “lo más interno, primero en salir” (*the innermost first out (InFO) control strategy*) esto es para permitir la evacuación de las zonas que estén más cerca de las rutas de evacuación o los mismos destinos, luego es posible descongestionar estas áreas e inyectar el flujo de forma controlada a partir de datos disponibles en tiempo real. La evacuación ante emergencia podría abarcar múltiples modos de transporte y sus interacciones. En este contexto, Yang et al. (2018) entrega un enfoque que aplica el modelo de *point queue* para describir las colas de personas en las paradas de autobús y estaciones de metro, interacciones intermodales en los puntos de transferencia y el modelo de *double queue* para interacciones dinámicas vehiculares.

Como se mencionó, el estudio de Yang et al. (2018) trabaja con múltiples modos de transporte, donde los evacuados tienen la posibilidad de preferencia hacia ciertos modos y así el modelo permite una mejor representación del sistema. Los modos que se consideran en el estudio se componen por el automóvil, el autobús, el metro y el ferrocarril. También tiene en cuenta a los peatones y ciclistas, aunque son considerados de una manera simple. Este modelo no optimiza el transporte facilitado para la emergencia pero sí, los vehículos privados. Existe una gran cantidad de estudios sobre evacuación ante emergencia donde el transporte único es vehicular. Estos trabajos suelen plantearse ante escenarios a gran escala, donde las rutas de evacuación son compuestas por vías suficientes y carreteras. Entre estos estudios se pueden

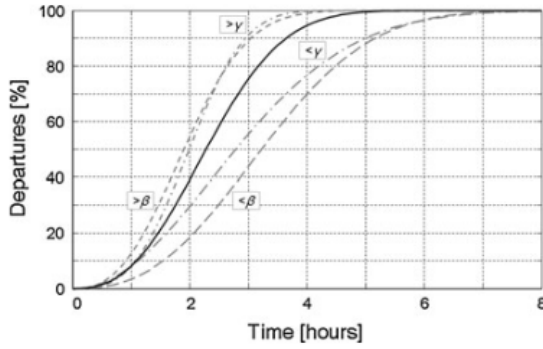


figure Curva de respuesta de evacuación siguiendo la distribución de Weibull para diferentes ajustes de parámetros: *gráfico discontinuo* $\beta = 0,135$, $\gamma = 2,55$; *gráfico de puntos* $\beta = 0,085$, $\gamma = 3,05$; *gráfico de línea* $\beta = 0,085$, $\gamma = 2,55$; *gráfico de puntos largos* $\beta = 0,085$, $\gamma = 2,05$; *gráfico discontinuo largo* $\beta = 0,035$, $\gamma = 2,55$. (Fuente: Pel et al. (2012))

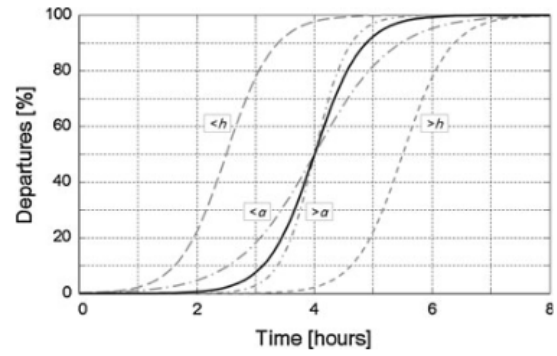


figure Curva de respuesta de evacuación siguiendo la distribución de Sigmoide para diferentes ajustes de parámetros: *gráfico discontinuo largo* $\alpha = 2,5$, $h = 2,5$; *gráfico de puntos largos* $\alpha = 1,5$, $h = 4$; *gráfico de línea* $\alpha = 2,5$, $h = 4$; *gráfico de puntos* $\alpha = 3,5$, $h = 4$; *gráfico discontinuo* $\alpha = 2,5$, $h = 5,5$. (Fuente: Pel et al. (2012))

destacar Li y Ozbay (2015), Campos et al. (2012), So y Daganzo (2010), Üster et al. (2018), Stepanov y Smith (2009) y Bretschneider y Kimms (2012).

En pocos casos existe un trato especial hacia la evacuación para peatones. Makinoshima et al. (2018) modelan el funcionamiento en la simulación microscópica para la evacuación a gran escala ante tsunamis en un entorno urbano real. En este trabajo, el flujo de peatones se trata como “masas”, lo que permite trabajar con fuerzas direccionales. Esto permite representar fuerzas contrarias que entorpecen y retrasan el flujo, por ejemplo edificios caídos, postes, entre otros. Dado que es imposible conocer las condiciones iniciales prospectivas exactas cuando ocurre un desastre, el estudio asume varias condiciones para la simulación, como las posiciones iniciales de los agentes, sus velocidades preferidas y los tiempos de salida que se asignan aleatoriamente a los agentes basados en estadísticas. Otro caso para la inclusión de peatones es el modelo construido por Zhang y Chang (2014), siendo la optimización de los movimientos de flujo mixto y los tiempos de fases en los semáforos lo fundamental en este estudio. Lo interesante es la integración de los peatones al modelo, donde el problema real se encuentra en las intersecciones. Se compara la eficiencia de los semáforos pre-temporizados versus los semáforos dinámicos. El modelo requiere parámetros previos de la zona en la que se trabaje y permite representar escenarios variados. Las variables de decisión para la optimización de la red de flujo mixto incluyen las distribuciones de flujo dinámico tanto para los vehículos como para los evacuados en la red, la conexión de diferentes movimientos en las intersecciones y los parámetros de los semáforos, como la longitud del ciclo y las divisiones verdes. A manera de ejemplo de esta última variable, Zhang y Chang (2014) muestra una intersección típica de cuatro ramales (ver Figura 2.2) y el impacto al dividir cada fase de peatón a la derecha en uno solo de peatón y uno principalmente para vehículos (ver Figura 2.3). El tercer paso de Stepanov y Smith (2009) es la localización de refugios. Además de las localizaciones, las capacidades de los refugios son características claves en las decisiones para las

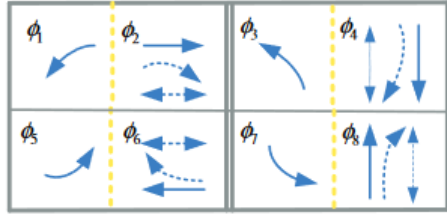


Figura 2.2: Intersección típica de cuatro ramas (*Fuente: Zhang y Chang (2014)*)

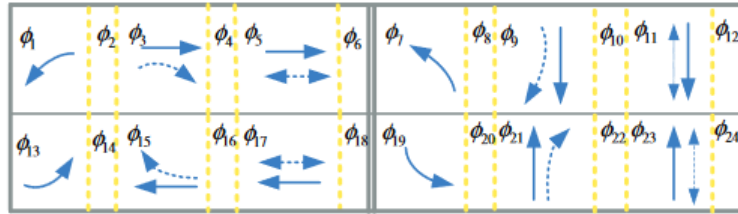


Figura 2.3: Inclusión a la intersección de una fase exclusiva de giro a la derecha (*Fuente: Zhang y Chang (2014)*)

rutas de evacuación. Determinar la ubicación de los refugios puede depender directamente de las experiencias pasadas. Liu et al. (2008) consideran dentro de su modelo, la familiaridad de los residentes con la ciudad y experiencias con emergencias similares, permitiendo conocer a través de encuestas las rutas usadas y los destinos acudidos anteriormente. En algunos casos, la localización para los refugios está predefinida pero es necesario planificar el resto de la estrategia. Por ejemplo, Campos et al. (2012) se enfocan en la distribución de tráfico hacia las zona seguras y también en la redistribución de los vehículos facilitados desde los refugios hacia las zonas de peligro para evacuar a los afectados.

Las decisiones sobre dónde ubicar los refugios y cómo se hace la asignación de tráfico son igualmente importantes y afectan el tiempo de evacuación de la región del desastre. Abordar estos dos problemas por separado puede generar resultados subóptimos. Sin embargo, pocos modelos de evacuación en la literatura deciden de manera simultánea la cantidad de refugios y su ubicación (Bayram (2016)). Dentro de la sección 2.3 se analizarán aquellos estudios donde se considera la localización de refugios e incluso la asignación de evacuados hacia cada destino como variables de decisión.

2.2. Enfoques para modelos de evacuación

En la sección anterior se menciona como cuarto paso la asignación de ruta de tráfico; dentro del contenido para este paso se tratarán los enfoques estáticos y dinámicos, como también deterministas y estocásticos. Para iniciar, se trabaja en base al problema de ruteo de vehículos (VRP), el cual permite plantear un enfoque en la evacuación ante emergencias. Determinar un conjunto de rutas o vías de evacuación que guíen a los vehículos a llegar a los refugios, o incluso, permitir al transporte de emergencia acudir a las zonas de demanda para evacuar personas en riesgo. Es por esto que el interés en el desarrollo de un VRP está motivado tanto por su relevancia práctica, como por su considerable dificultad.

Las cuestiones planteadas por Hamacher et al. (2013), se enfocan en la cantidad de personas

que pueden ser evacuadas antes de un tiempo determinado (límite), el tiempo total que llevaría evacuar la zona en peligro por completo y la identificación de los cuellos de botella en la red de evacuación. Estas preguntas son fundamentales para tener un objetivo claro en el desarrollo de la planificación y gestión en la evacuación.

Para entender la base del VRP, Desrosiers et al. (1995) entrega una formulación más sencilla que cumple con un único *depot*/nodo tanto para el origen, como para el destino (ver Figura 2.4). A continuación, se muestra la formulación *The single depot vehicle scheduling problem* descrita por Desrosiers et al. (1995):

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A} c_{i,j} X_{i,j} + \sum_{j \in N} c X_{n+1,j} \quad (2.1)$$

$$\text{s.a} \quad \sum_{j \in V} X_{i,j} = 1, \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in N} X_{n+1,j} \leq v \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in V} X_{i,j} + \sum_{i \in V} X_{j,i} = 0, \quad \forall j \in V \quad (2.4)$$

$$X_{i,j} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A \quad (2.5)$$

En este modelo, A corresponde al conjunto de arcos, N el conjunto de nodos sin considerar el *depot* y V la unión $N \cup \{n+1\}$, con $\{n+1\}$ representando el único *depot*. La variable de decisión $x_{i,j}$ es una variable binaria que toma el valor 1 si se cubre el viaje en el arco (i,j) , La función objetivo (1.1) busca minimizar la suma de los costos del viaje (tiempo) y el costo fijo de utilización de los vehículos. La restricción (1.2) asegura que cada nodo se visita una vez. La restricción (1.3) limita el tamaño de la flota y la restricción (1.4) es la conservación de flujo en los nodos. Por último la restricción (1.5) corresponde a la naturaleza de las variables $X_{i,j}$.

Para extender el problema, se debe considerar la existencia de varios nodos de origen y destino (ver Figura 2.5). Stepanov y Smith (2009) realizan un revisión exhaustiva para planes ante evacuación de emergencia, examinan el diseño y análisis óptimo de las rutas de evacuación en las redes de transporte, junto con sugerir una metodología para la asignación óptima de la ruta de salida.

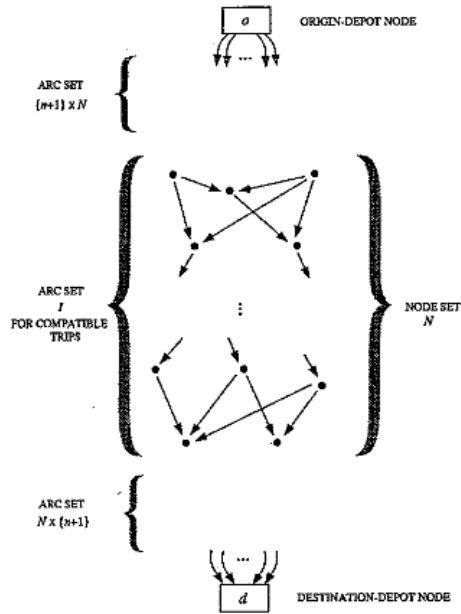


Figura 2.4: Gráfico acíclico desplegado (Fuente: Desrosiers et al. (1995))

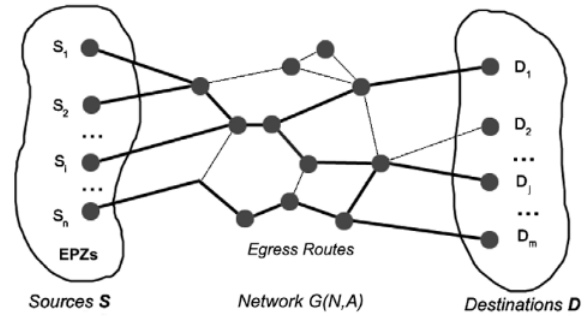


Figura 2.5: Red de evacuación que conecta las zonas de evacuación y los destinos (Fuente: Stepanov y Smith (2009))

Si bien los casos anteriores presentan una mirada hacia la estructura y la finalidad de los problemas de ruteo/evacuación, no presentan un enfoque claro hacia las características del modelo, ya sea enfoques estáticos o dinámicos, o incluso deterministas o estocásticos. Bayram (2016) muestra una revisión exhaustiva de la literatura de planificación y gestión de evacuación de emergencia a gran escala, donde los enfoques de planificación y gestión de la evacuación se basan principalmente en enfoques de asignación de tráfico. Bayram (2016) permite incluir las características fundamentales del sistema, cubriendo la literatura relevante en el transporte urbano, enfoques de asignación de tráfico, el modelado del tiempo de viaje para representar la congestión (sistemas dinámicos) y los enfoques de propagación del flujo de tráfico. A su vez, Murray-Tuite y Wolshon (2013) presentan una revisión del modelamiento y simulación de evacuación en carretera. Esta revisión considera los componentes principales de la planificación y las operaciones de transporte por carretera, incluido el estado actual del problema en el pronóstico de la demanda de viajes de evacuación, distribución y asignación de la demanda de evacuación, asignación de evacuados a varios modos de transporte, y evaluación y prueba de estrategias de gestión de alternativas para aumentar la capacidad de las redes de evacuación o gestionar la demanda. Ambas revisiones tratan sobre los enfoques mencionados y amplían las revisiones de literatura hacia los temas tratados en la sección anterior.

En el trabajo de investigación de Dhamala et al. (2018) se presenta una revisión sistemática de la literatura principal que se desarrolló originalmente para resolver problemas de flujo en redes, pero que ahora se puede implementar para manejar diferentes problemas de planificación de evacuación. Se incluyen problemas computacionales de flujos a lo largo del tiempo, donde se permiten flujos dinámicos, la posibilidad de pérdida de flujos en las rutas durante el viaje, modelos de contraflujo, entre otros. Los temas también incluyen las redes de distribución de socorro, ubicación y asignación de instalaciones, características de criterios múltiples

y modelos de flujo basados en tránsito breve.

Tomando en consideración las revisiones mencionadas anteriormente, el planteamiento de los modelos matemáticos debe ser riguroso, para que sean capaces de considerar e integrar las características y los desafíos planteados para los problemas de evacuación.

2.2.1. Modelos estáticos y dinámicos

Los enfoques de flujo estático y dinámico se relacionan con características temporales de los flujos de tráfico en modelos de evacuación. Para los modelos estáticos, los flujos de tráfico son fijos y se trabaja con parámetros predefinidos, permiten tener rutas planificadas que son beneficiosas cuando no hay posibilidad de comunicación entre los terminal durante el evento (Hashimoto y Tamiya (1997)), mientras que en el caso dinámico, permite cambiar las condiciones del tráfico para encontrar las mejores rutas de evacuación.

En el contexto de los modelos estáticos, la investigación de Campos et al. (2012) sugiere un método para planificar la ruta de evacuación en situaciones de desastre aplicando iterativamente un algoritmo heurístico para definir dos rutas independientes desde el área del desastre hacia cada refugio. Esto, con el fin de obtener una asignación del flujo de vehículos para la planificación de la evacuación, considerando tanto el tiempo de viaje como la capacidad de la red de transporte. Por otro lado, Üster et al. (2018) proponen un modelo de optimización para el diseño de red de evacuación estratégica (SEND), considerando regiones y capacidades de refugio, ubicaciones intermedias que apoyan/suministran a los evacuados en ruta, así como segmentos de carreteras y sus capacidades bajo limitaciones de tiempo de evacuación. Üster et al. (2018) desarrollan un programación entera mixta. Para la solución eficiente del modelo se propone una metodología basada en la descomposición de Benders. Este enfoque permite resolver instancias a gran escala de SEND con tiempos de solución razonables y *gaps* de optimilidad pequeños.

Para Han et al. (2006) los modelos de evacuación que representan una asignación estática rara vez conduce a un resultado eficiente y óptimo, debido a que la demanda de tráfico y las condiciones de la carretera fluctúan y cambian durante el período de evacuación. Entorno a los modelos dinámicos, Liu et al. (2008) proponen un modelo dinámico de decisión de ruta que considera explícitamente la evacuación grupal, los puntos de referencia y los signos de evacuación y la familiaridad con el entorno local. Además, Zhang y Chang (2014) presentan un modelo para integrar la optimización de los movimientos de flujo mixto y los tiempos de fases en los semáforos. Stepanov y Smith (2009) citados anteriormente por sus revisiones sobre planes ante evacuación de emergencia, también proponen una metodología que permite generar un plan de evacuación que minimiza simultáneamente la distancia recorrida total, el bloqueo y el tiempo total de despeje de las rutas de salida. Un estudio reciente para la evacuación es Yang et al. (2018), el cual trabaja con múltiples modos de transporte y sus interacciones. Además, este trabajo incluye los efectos de la congestión, el comportamiento cooperativo de los evacuados y las capacidades del sistema de transporte y los refugios, con el fin de capturar la dinámica del tráfico. Si bien, los aspectos de los problemas dinámicos ya generan complejidad en el modelamiento algunos autores también consideran parámetros que tienen naturaleza incierta. Por ejemplo, Li y Ozbay (2015) sugiere un marco analítico junto con una metodología de solución eficiente para evaluar el impacto de los riesgos determinados endógenamente, para luego estimar el tiempo de evacuación.

2.2.2. Enfoques deterministas y estocásticos

Los eventos producto de la naturaleza se identifican por ser esencialmente aleatorios, ya que se basan en un conjunto de factores impredecibles que hacen que los resultados varíen según el azar (Alvear et al. (2014)). A pesar de ello, en algunos casos la influencia de la aleatoriedad puede generar un impacto leve que no necesariamente se requiere una consideración sustancial en el modelado. En consecuencia, la mayoría de la literatura que propone nuevas ideas o metodologías de solución tienen un enfoque determinista, donde adoptan un escenario de amenaza único, como el peor de los casos o el más probable (Bayram (2016)).

Representando al enfoque determinista, Liu et al. (2008) no solo consideran la localización de refugio, sino también información sobre las decisiones y las rutas elegidas por los residentes, para así, estructurar los componentes del sistema. Asimismo, Zhang y Chang (2014) trabaja con información previa, donde su principal objetivo es realizar un modelo que permita realizar una evacuación efectiva teniendo especial consideración los conflictos de congestión entre los flujos de vehículos y peatones. Si bien, estas revisiones trabajan con datos recopilados previamente, ambos modelos permiten representar variados escenarios. Esto admite la posibilidad de considerar escenarios con características determinadas de forma aleatoria.

Otras revisiones con enfoque determinista y sus respectivos métodos de solución son Campos et al. (2012), So y Daganzo (2010), Bretschneider y Kimms (2012), donde las metodologías de solución se identifican principalmente por estrategias de control y heurísticas, además, revisiones más actuales como Üster et al. (2018) con solución a través del enfoque descomposición de Benders, Farahani et al. (2018) con metodologías de relajación langrangeana y heurísticas, y Yang et al. (2018) a través de solución heurística.

La planificación de la evacuación se realiza con información inexacta o incompleta, ya que no es fácil predecir cuándo y dónde ocurrirán los desastres y con cuánto impacto. Debido al tiempo, el lugar y la gravedad imprevista de un desastre, además del comportamiento humano, existe una incertidumbre significativa representada comúnmente por la demanda de evacuación. Si bien, como se mencionó anteriormente, los estudios para evacuación ante emergencia contemplan en su mayoría enfoques deterministas, también existen estudios que incluyen la incertidumbre, permitiendo una coexistencia entre ambos enfoques para entregar un modelo que se adapte de la forma más aproximada a la realidad.

Es así, como Ng y Lin (2015) utiliza técnicas para determinar las rutas de evacuación óptimas cuando se conoce información limitada sobre la demanda de evacuación y las capacidades en carretera. El estudio emplea el modelo determinista de transmisión basado en celdas (CTM) propuesto por Ziliaskopoulos (2000), con el fin de modelar con precisión la dinámica del tráfico. El CTM se caracteriza por discretizar en celdas las redes de carreteras, en cada paso de tiempo, los vehículos se mueven a la siguiente celda, si hay espacio disponible, de lo contrario, permanecen en la celda actual. Para esta configuración, Ng y Lin (2015) definen las siguientes variables aleatorias: la demanda de evacuación en la celda i para el momento t como D_i^t y el número máximo de vehículos que pueden entrar o salir de la celda i en el tiempo t como Q_i^t . Similar al estudio previo, Li y Ozbay (2015) formulan una extensión del modelo descrito por Ziliaskopoulos (2000) al agregar restricciones para capturar el impacto de los riesgos relacionados con el flujo y definir una función objetivo probabilística compuesta por la suma de los valores esperados de los flujos de celda. El modelo propuesto asume que la capacidad de la celda i para un cierto paso de tiempo t (Q_i^t) cambia según una función de capacidad de enlace probabilística que usa el flujo de celda en el paso de tiempo anterior. Una característica importante del modelo propuesto en este artículo es su naturaleza macros-

cópica permitiendo resolver el problema de optimización estocástica utilizando algoritmos de flujo de red conocidos y también garantizando teóricamente la convergencia a una solución óptima del sistema como se analiza en la revisión.

Por otro lado, Stepanov y Smith (2009) proponen un modelo dinámico, donde se incluye un parámetro incierto que representa el límite superior en las llegadas a los *inputs* $\lambda_i^{L^{max}}$, asegurando que la probabilidad de bloqueo no exceda el valor umbral ε . Al establecer un valor umbral en la probabilidad máxima de bloqueo en la red de evacuación, Stepanov y Smith (2009) asegura en su modelo que los flujos de evacuados en las rutas de salida no se interrumpen.

Para evaluar la aplicación del enfoque de modelado determinista o estocástico en escenarios de evacuación Alvear et al. (2014) proponen dos métodos. El *método exacto* analiza el error relativo cuando se usa un enfoque determinista y también ofrece criterios de aceptación o rechazo. El *método a priori* predice cuándo se puede aceptar o rechazar un enfoque determinista considerando las características de la variable independiente del modelo correspondiente. Además, ambos métodos se aplican a dos escenarios de evacuación: 1) trenes de pasajeros y 2) túneles de carretera. Estos escenarios pueden no ser representativos de un sistema de evacuación a gran escala, no obstante permiten comprender las metodologías, además de entregar herramientas claves para realizar la selección de enfoque según tipo de evento.

2.3. Objetivos de los modelos de evacuación

Dependiendo del tipo y particularidades del desastre, de acuerdo con el objetivo de la autoridad de planificación de la evacuación se pueden emplear diferentes objetivos para una evacuación (Bayram (2016)). Los objetivos más utilizados en la literatura son maximizar el número de evacuados durante una ventana de tiempo y minimizar el tiempo necesario para evacuar todos los vehículos. Según las características del modelo, también pueden considerar los costos asociados a las instalaciones para la emergencia, como lo son aspectos de los refugios, señalizaciones, transporte asignado para evacuar, entre otros.

2.3.1. Modelos orientados a maximizar el número de evacuados

Para escenarios donde pueden dañarse la integridad de las personas es importante evacuar la mayor cantidad posible afectados. Aproximándose a este fin, Bretschneider y Kimms (2012) propone un modelo que tiene como objetivo maximizar el número de evacuados dentro de una ventana de tiempo, con el fin de asegurar la evacuación total antes de acontecer el desastre. El modelo se caracteriza por un enfoque heurístico de dos pasos. En el paso 1 se considera y resuelve el enrutamiento del tráfico y el flujo de vehículos de la red de calles sin el modelado detallado de las intersecciones. Luego, en el paso 2, se calculan las rutas y el flujo del tráfico de la red de calles detallada, incluidas todas las entradas/salidas de las intersecciones y todos los giros posibles dentro de las intersecciones. Cabe mencionar que los cálculos realizados en el paso 2 dependen de los resultados del paso 1. Las variables de decisión para este modelo trabajan en torno a la elección de rutas y el flujo de vehículos en las conexiones. Zhang y Chang (2014) mencionado en las secciones anteriores por su aporte en la integración de flujos mixtos por medio de la programación de semáforos, indica tres propósitos comunes para imponer el control y la gestión del tráfico en una red congestionada. La primera es

enviar a la mayoría de los viajeros al área de seguridad fuera de la zona de peligro dentro de una ventana de tiempo determinada, la segunda es reducir el costo total para todos los viajeros (por ejemplo, tiempo de viaje) y el tercero es prevenir cualquier bloqueo o derrame de carriles. La función objetivo para el modelo propuesto por Zhang y Chang (2014) apunta hacia el primer propósito: maximizar el rendimiento total del sistema, es decir, el número de evacuados, durante una ventana de tiempo. El estudio indica que es posible reformular fácilmente la función objetivo para que se ajuste al segundo o tercer propósitos. Las variables de decisión incluyen las distribuciones dinámicas de flujo tanto para los vehículos como para los evacuados en la red, la conexión de diferentes movimientos en las intersecciones y los parámetros de los semáforos, como la duración del ciclo y las divisiones verdes. Con el mismo objetivo que los últimos dos estudios, pero esta vez considerando la localización de potenciales refugios, Farahani et al. (2018) plantea el objetivo de maximizar el flujo total de evacuación máx ϑ , estructurando el modelo por medio de las variables que representan la cantidad de flujo en la red, ϑ , los flujos en los arcos, x_{ij} y variables binarias y_i que indican las ubicaciones que se seleccionan.

2.3.2. Modelos orientados a minimizar el tiempo total de evacuación

El segundo enfoque que se menciona como objetivo de los problemas de evacuación es la minimización de tiempo total para el sistema, donde se considera la evacuación total de los afectados. A través del modelo de transmisión de celdas, Ng y Lin (2015) minimizan el tiempo necesario para evacuar todos los vehículos de sus celdas de origen(es) a la celda de sumidero(única):

$$\min_{(x,y)} \sum_{(i,j) \in E_s} \sum_{t \in T} ty_{ij}^t,$$

donde las variables de decisión x_i^t y y_{ij}^t se definen por el número de vehículos en la celda i en el tiempo t y el número de vehículos moviéndose de la celda i a la celda j en el tiempo t respectivamente,. Además, E_s representa el conjunto de *links* a la celda sumidero y T el conjunto de intervalos de tiempo disjuntos que cubren el período de planificación. La consideración de múltiples modos de transporte requiere tener especial consideración en la formulación del modelo. El estudio de Yang et al. (2018) permite minimizar el tiempo de evacuación del sistema, incluyendo el tiempo total de viaje en la red en auto, autobús y metro, y el tiempo total de espera en los orígenes, paradas de autobús y estaciones de metro de todos los evacuados. Para este tipo de problema, las variables de decisión deben representar las propiedades para cada modo, por lo tanto, incluyen las demandas de diferentes modos en los orígenes indicados por los vectores d_a y d_n , las tasas de flujo de entrada del enlace p y las tasas de flujo de salida ν , el número de evacuados esperando en las estaciones de autobuses ϕ y estaciones de metro $\hat{\phi}$, el número de evacuados que abordan los autobuses u y metro \hat{u} , el número de evacuados que se trasladan en las estaciones de autobuses φ y las estaciones de metro $\hat{\varphi}$, y el número de evacuados en autobús en las estaciones de autobuses χ y en el metro en las estaciones de metro $\hat{\chi}$.

Algunos estudios trabajan con características específicas o funciones objetivo planteadas de forma diferente a las mencionadas anteriormente. Por ejemplo, So y Daganzo (2010), buscan maximizar el número de evacuados y minimizar el tiempo de evacuación a la vez por medio del enfoque INFO (descrito en la sección anterior), mientras que Liu et al. (2008) buscan maximizar el grado de eficiencia para elegir carreteras utilizando los comportamientos de los

locatarios en experiencias anteriores. Campos et al. (2012) trabaja en torno a la maximización de la razón entre la capacidad de la ruta y el tiempo de viaje que requiere. Como las rutas utilizadas para el modelo son independientes, el estudio hace énfasis a la logística de los vehículos asignados para evacuar a los afectados. Adicionalmente, Stepanov y Smith (2009) proponen como función objetivo la combinación lineal del exceso de distancia total recorrida y del exceso de tiempo libre, con el fin de minimizar los costos correspondientes.

En pocos casos existe especial consideración no sólo para el ruteo de vehículos, sino también en la localización de refugios y la asignación de los evacuados. Es por esto que Üster et al. (2018) tienen como objetivo minimizar el costo total del diseño de la red de evacuación, donde la función objetivo considera el costo variable total asociado al volumen de tráfico (incluidos los costos relacionados con la respuesta accidental, el mantenimiento de las instalaciones, etc.), el costo total fijo asociado a las selecciones de las capacidades existentes y las instalaciones adicionales de capacidad y los costos fijos totales asociados con las transferencias utilizadas y los refugios (incluidas las instalaciones adicionales de capacidad de refugio). Además, las variables de decisión incorporan la localización de los refugios como la asignación de evacuados a cada uno, junto con la elección de rutas.

Üster et al. (2018) incluyen varios de los objetivos adoptados por las revisiones mencionadas. A modo de ejemplo se presenta la formulación del modelo correspondiente, con el fin de permitir una mayor comprensión y claridad del enfoque en los modelos de evacuación.

Formulación del modelo

Conjuntos:

O Conjunto de nodos origen, $o \in O$

D Conjunto de nodos destino potenciales, $d \in D$

I Conjunto de nodos de transferencia potenciales, $i, j \in I$

ε Conjunto de arcos no dirigidos $\{i, j\} \in \varepsilon$

A Conjunto de arcos dirigidos $(i, j) \in A$

P_i Conjunto de nodos predecesores del nodo i , $j \in P_i$ and $(j, i) \in A$

S_i Conjunto de nodos sucesores del nodo i , $j \in S_i$ and $(j, i) \in A$

Parámetros:

s_o Población en la región $o \in O$

q_d^D Capacidad base del nodo de destino $d \in D$

q_{ij}^ε Capacidad base de arco no dirigido $\{i, j\} \in \varepsilon$

q_{ij}^{ε} Aumento admisible de la capacidad en arco no dirigido $\{i, j\} \in \varepsilon$

f_d^D Costo fijo para abrir un refugio en el nodo $d \in D$

m^e Límite superior del aumento de la capacidad de alojamiento

m^f Magnitud del aumento del costo fijo del refugio por unidad de capacidad adicional del refugio

f_i^I Costo fijo por incluir nodo de transferencia $i \in I$

f_{ij}^ε Costo fijo por incluir arco no dirigido $\{i, j\} \in \varepsilon$

g_{ij}^ε Costo fijo para agregar un nuevo carril en un arco no dirigido $\{i, j\} \in \varepsilon$

b_{ij}^ε Número original de carriles en arco no dirigido $\{i, j\} \in \varepsilon$

c_{ij}^A Costo variable para una unidad de flujo en arco $(i, j) \in A$

t_{ij} Estimación del tiempo de viaje del arco $(i, j) \in A$

T *Tiempo seguro de evacuación*

Variables de decisión:

r_d^D : 1 si el refugio es abierto en el nodo d , 0 en otro caso

e_d^D : Magnitud del aumento de capacidad en el refugio d

r_{ij}^ε : 1 si se usa la conexión (i, j) en el diseño final de la red, 0 en otro caso

e_{ij}^ε : Número de carriles nuevos agregados a la conexión (i, j)

r_i^I : 1 si el nodo i es usado como un nodo de transferencia, 0 en otro caso

z_{odij} : 1 si el flujo desde el nodo de origen o al nodo de destino d atraviesa el arco (i, j) , 0 en otro caso

x_{odij} : Demanda desde el nodo fuente o hasta el nodo destino d en el arco (i, j) .

y_{od} : La fracción de población del nodo de origen o que ingresa al nodo de destino d

Formulación del problema:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^A X_{odij} + \sum_{ij \in \varepsilon} f_{ij}^\varepsilon r_{ij}^\varepsilon + \sum_{ij \in \varepsilon} g_{ij}^\varepsilon e_{ij}^\varepsilon \\ & + \sum_{i \in I} f_i^I r_i^I + \sum_{d \in D} f_d^D (r_d^D + m^f e_d^D) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{s.a} \quad \sum_{j \in S_i} z_{odij} \leq 1, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall i \in I \quad (2.7)$$

$$\sum_{d \in D} y_{od} = 1, \quad \forall o \in O \quad (2.8)$$

$$x_{odij} \leq S_o z_{odij}, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall (i,j) \in A \quad (2.9)$$

$$z_{odij} \leq x_{odij}, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall (i,j) \in A \quad (2.10)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i \in P_d} x_{odid} - \sum_{o \in O} \sum_{i \in S_d} x_{oddi} \leq q_d^D (r_d^D + e_d^D), \quad \forall d \in D \quad (2.11)$$

$$e_{ij}^\varepsilon \leq r_{ij}^\varepsilon q_{ij}^\varepsilon, \quad \forall \{i,j\} \in \varepsilon \quad (2.12)$$

$$z_{odij} \leq r_j^I, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall (i,j) \in A, i \neq 0 \quad (2.13)$$

$$z_{odij} \leq r_i^I, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall (i,j) \in A, j \neq d \quad (2.14)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} (x_{odij} + x_{odji}) \leq q_{ij}^\varepsilon (r_{ij}^\varepsilon + \frac{e_{ij}^\varepsilon}{b_{ij}^\varepsilon}), \quad \forall \{i,j\} \in \varepsilon \quad (2.15)$$

$$e_d^D \leq r_d^D m^e, \quad \forall d \in D \quad (2.16)$$

$$\sum_{j \in S_i} x_{odij} - \sum_{j \in P_i} x_{odji} \begin{cases} y_{odS_o} & \text{si } i = 0 \\ -y_{odS_o} & \text{si } i = d \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}, \quad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall d \in D \quad (2.17)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} z_{odij} t_{ij} \leq T, \quad \forall o \in O, \forall d \in D \quad (2.18)$$

$$r_d^D, r_i^I, z_{odij} \in \{0, 1\}, x_{odij} \geq 0, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall i \in I, \forall (i,j) \in A \quad (2.19)$$

$$0 \leq y_{od} \leq 1, r_{ij}^\varepsilon \in \{0, 1\}, e_d^D \geq 0, e_{ij}^\varepsilon \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall \{i,j\} \in \varepsilon \quad (2.20)$$

Para facilitar el análisis de los trabajos revisados, se elabora una tabla de clasificación que agrupa los artículos de modelos y simulación para evacuación ante emergencia según sus características principales.

Tabla 2.1: Modelos y simulación para evacuación. Clasificación de la literatura considerada.

Autor(es) (año)	Tipo de revisión	Objetivo de modelo	Modos de evacuación	Sistemas dinámicos	Parámetros inciertos	Decisiones	Metodologías de solución
Tufekci y Kisko (1991)	Sistema de apoyo para la evacuación	Minimizar tiempo de evacuación	No específica	✓	-	Elección de ruta	Heurística
Liu et al. (2008)	Estudio de modelo y simulación	Maximiza eficiencia de elección de ruta	No específica	✓	-	Elección de ruta	Solucionador comercial
Stepanov y Smith (2009)	Estudio de modelo y simulación	Minimizar combinación lineal entre congestión, tiempo de despeje y distancia total recorrida	Solo vehículos	✓	Demanda de evacuación	Elección de ruta	Exacta, estrategia de control
So y Daganzo (2010)	Estudio de modelo y simulación	Maximiza y n°evacuados, minimiza tiempo de evacuación	Solo vehículos	-	-	Hora de reparto	Estrategia de control
Campos et al. (2012)	Algoritmo heurístico	Maximiza <i>trade-off</i> entre capacidad y tiempo de viaje	Solo vehículos	-	-	Elección de ruta	Heurística
Bretschneider y Kimms (2012)	Modelo matemático y heurístico	Minimizar tiempo de evacuación	Solo vehículos	✓	-	Elección de ruta	Heurística (dos etapas)
Zhang y Chang (2014)	Estudio de modelo y simulación	Maximiza y n°evacuados	Multimodal (incluye peatones)	✓	-	Elección de ruta, programación de semáforos	Solucionador comercial
Ng y Lin (2015)	Estudio de simulación	Minimizar tiempo de evacuación	Solo vehículos	-	Demanda de evacuación, capacidad carretera	Elección de ruta	-
Li y Ozbay (2015)	Modelo matemático y heurístico	Maximiza y n°evacuados	Solo vehículos	✓	Capacidad celular	Elección de ruta	Heurística
Yang et al. (2018)	Estudio de modelo y simulación	Minimizar tiempo de evacuación	Multimodal	✓	-	Elección de ruta, asignación de refugios, hora de reparto	Heurística
Üster et al. (2018)	Estudio de modelo y simulación	Minimizar costo total diseño de la red	Solo vehículos	-	-	Elección de ruta, asignación a refugios, localización de refugios	Descomposición de <i>Benders</i>
Farahani et al. (2018)	Modelo matemático y heurístico	Maximiza n°evacuados	No específica	-	-	Elección de ruta, localización de refugios	Relajación lagrangeana, exacta, heurística

2.4. Simulación de tráfico para enfrentar problemas de evacuación

Para realizar estudios de tráfico inicialmente se debe definir el sistema con el cual se trabaja. Para Barceló (2010) una descripción del sistema, se deben identificar y caracterizar todos los componentes relevantes, o las diferencias del sistema, incluyendo las relaciones estructurales y de proceso entre ellos y cómo determinan o son determinados por los objetivos

del sistema. Esta descripción constituye la base de una representación formal o modelo de sistema, que será estudiado y utilizado para manipular problemas que sean de interés para el analista. Las componentes del sistema identificadas por Barceló (2010) se refieren a 1) el(los) proceso(s) de transformación o actividades del sistema, 2) los límites del sistema, 3) las componentes y subsistemas, y las relaciones estables entre ellos o la estructura, 4) las entradas al sistema (*inputs*) y 5) los resultados del sistema (*outputs*).

Los flujos de tráfico pueden modelarse *macroscópicamente* desde un punto de vista agregado basado en una analogía hidrodinámica. Los flujos de tráfico se consideran como un proceso fluido particular cuyo estado se caracteriza por variables macroscópicas agregadas: densidad, volumen y velocidad. Modelar *microscópicamente* también es una opción para representar el flujo de tráfico, es decir, desde un punto de vista totalmente desagregado destinado a describir el proceso del fluido a partir de la dinámica de las partículas individuales (los vehículos) que lo componen. Esta opción permite ser riguroso en el modelamiento y obtener resultados significativos e imprescindibles para evacuar el mayor número de personas en el menor tiempo. Sin embargo, puede contribuir a costos computacionales importantes. Por consiguiente, los modelos *mesoscópicos* pueden representar una tercera alternativa de modelamiento. Esta alternativa consiste en una simplificación del flujo del tráfico vehicular que, si bien captura lo esencial de la dinámica, requiere menos datos. En consecuencia, los modelos mesoscópicos son computacionalmente más eficientes que los modelos microscópicos. Este enfoque combina aspectos microscópicos (en la medida en que tratan o pueden tratar con vehículos individuales) y aspectos macroscópicos, como los relacionados con la dinámica del vehículo.

Los estudios e investigaciones enfocados en modelos de tráfico para la evacuación, junto con la planificación y diseño de red del sistema, utilizan comúnmente la simulación computacional para representar características específicas del contexto. En el extenso estudio de Barceló (2010), se afirma que la simulación es una técnica que puede verse como un experimento de muestreo en un sistema real dinámico a través de un modelo de computadora que lo representa formalmente. La simulación supone que la evolución del modelo del sistema a lo largo del tiempo imita adecuadamente la evolución del sistema estudiado a lo largo del tiempo. El proceso de determinar si el modelo de simulación está lo suficientemente cerca del sistema real generalmente se logra mediante la validación del modelo y la información obtenida, con el fin de mejorar el modelo hasta que se considere que la precisión es aceptable. La validación del modelo es un proceso iterativo que calibra los parámetros del modelo, compara el modelo con el comportamiento real del sistema y utiliza las discrepancias entre los dos y la información obtenida para mejorar el modelo hasta que se considere que la precisión es aceptable. También, se debe llevar a cabo el proceso de calibración, el cual tiene como objetivo encontrar los valores de estos parámetros que producirán un modelo válido representativo del problema. A continuación, se presentan los simuladores de tráfico más usados que permiten trabajar con los aspectos mencionados anteriormente, además se presenta un análisis específico para el microsimulador de tráfico PARAMICS.

2.4.1. Simuladores de tráfico más usados

Dentro de la literatura es posible encontrar estudios destinados a la identificación, análisis y comparación de simuladores de flujo de tráfico. Mubasher y ul Qounain (2015) realizan una revisión sistemática de los simuladores de flujo de tráfico vehicular presentados y utilizados en la literatura de investigación. En la exploración se encuentran 54 simuladores, donde se identifican los cinco simuladores que aparecen con mayor frecuencia en la literatura: VISSIM

(PTV Group, 2020); PARAMICS (Quadstone Paramics, 2020); CORSIM (McTrans Center, 2020); AIMSUN (TSS-Transport Simulation Systems, 2020) y SUMO (DLR Institute of Transportation Systems, 2020), siendo VISSIM el más popular.

CORSIM y AIMSUN son comparados minuciosamente por Jones et al. (2004), junto con el simulador SimTraffic (Trafficware, 2020). Se utiliza una variedad de criterios, incluidos los requisitos de *hardware/software*, dificultad/facilidad de codificación de red, requisitos de datos y adecuación de los valores predeterminados y relevancia/precisión de las medidas de desempeño informadas en el resultado. Cada paquete de simulación se evalúa utilizando todos los tipos de corredores, incluidas las autopistas, las arterias principales con semáforos y un colector urbano. Las principales deducciones son que los tres paquetes de simulación funcionan razonablemente bien, pero con limitaciones que deben entenderse antes de seleccionar un simulador para la evaluación de la red. El simulador SimTraffic es el más fácil de usar y su interfaz gráfica resulta en tiempos de codificación significativamente más cortos que los otros dos modelos. La capacidad de CORSIM para modelar situaciones más complejas que SimTraffic puede hacer que sea más adecuado para modelar redes urbanas. Sin embargo, las capacidades de asignación de tráfico de CORSIM se limitan a tipos de red únicos y actualmente no funcionan con redes combinadas de calles y autopistas. Esta es una limitación seria si se planean modelos regionales. Además, sus funciones de distribución de viajes son estáticas, lo que significa que las rutas óptimas permanecen constantes durante una simulación independientemente del rendimiento de la red o las condiciones del tráfico. Aún así, CORSIM tiene muchos atributos positivos, incluido su uso generalizado, flujo de tráfico bien documentado y algoritmos de comportamiento de los conductores, y requisitos de codificación modestos. Finalmente, AIMSUN posee características que son útiles para crear grandes redes urbanas y regionales, donde su capacidad de asignación de tráfico dinámico no tiene comparación con SimTraffic o CORSIM. La desventaja de AIMSUN, se indica, son sus requisitos de codificación bastante engorrosos. En este estudio, tanto los modeladores novatos como los experimentados encontraron que la codificación en AIMSUN requería de cuatro a ocho veces el tiempo requerido para codificar una red equivalente en SimTraffic o CORSIM, aunque parte de ese tiempo se compone de un proceso de depuración mucho más simplificado.

Otra revisión que hace referencia al estudio de simuladores es Kotusevski y Hawick (2009). Este trabajo incluye seis simuladores, de los cuales, cuatro están entre lo más frecuentes identificados por Mubasher y ul Qounain (2015). A grandes rasgos, esta investigación analiza las aplicaciones de software de simulación de tráfico, sus características y atributos, así como los problemas que enfrentan estas aplicaciones. Específicamente, se examina el atributo de creación de redes de tráfico y patrones de vehículos asociados. Por ello, el estudio identifica aquellos simuladores que poseen esta alternativa y entrega descripción de las técnicas disponibles de cada uno. En resumen se identifican los simuladores SUMO, PARAMICS y AIMSUN, donde SUMO presenta una redacción manual de la red de tráfico en un archivo del tipo XML, con la posibilidad de importar redes creadas en otros simuladores, además existe la posibilidad de utilizar un generador automático de redes predefinidas; dado las limitaciones de la versión de demostración de PARAMICS, aparentemente se permite crear automáticamente una red de tráfico usando el asistente, para luego tener la posibilidad de personalizar aún más la red usando el editor gráfico; para AIMSUN se dibujan manualmente la red de tráfico utilizando el editor gráfico de red disponible. También se examina la capacidad de simular redes de tráfico muy grandes, para este atributo el estudio localiza información sobre el paquete de SUMO, el cual está limitado a simular redes de tráfico de hasta 10,000 carreteras. Otras características

analizadas son las capacidades adicionales que pueden poseer los simuladores, siendo este un atributo que permite simular con mayor exactitud ciertos comportamientos, por ejemplo, en el caso de la simulación para diferentes tipos de vehículos, Paramics Modeller permite usar una biblioteca de distintos vehículos, pero también permite definir vehículos personalizados mientras se ingrese el tipo, tamaño, peso, color y otras características.

El documento presentado por Ratrouf y Rahman (2009) revisa principalmente las características de los modelos de simulación de tráfico con enfoques tanto macroscópicos, como microscópicos, junto con un análisis comparativo que se enfoca en las operaciones de autopistas, redes urbanas congestionadas, modelado de emisiones a nivel de proyecto y variaciones en las estimaciones de demora y capacidad. El estudio contribuye con un resumen sobre el análisis comparativo de los programas de simulación de tráfico entregando información de forma clara para ayudar al analista en la elección de *software* según las características del problema que posea. Para tres de los programas de simulación populares, el resumen entrega como características lo siguiente: CORSIM para enfoques microscópicos permite trabajar con calles superficiales, autopistas, semáforos accionados, secciones de red, incidentes, señales de mensajes variables y animación 2-D; AIMSUN para enfoques microscópicos y técnica de computación distribuida posee las mismas características de CORSIM, agregando telemática y una animación 3-D; PARAMICS también para enfoques microscópicos y técnica de computación distribuida permite trabajar con calles superficiales, autopistas, operaciones de tránsito, animación 3-D, rotondas y redes congestionadas; por último, VISSIM para enfoques microscópicos permite trabajar con calles superficiales, autopistas, medición de rampas, peatones, operaciones de tránsito y animación 3-D.

Si se desea comprender en mayor detalle los simuladores descritos, es recomendable el libro de Barceló (2010), donde es posible encontrar descripciones detalladas de los programas de simulación y sus distintas componentes.

2.4.2. Microsimulador de tráfico PARAMICS

El paquete de microsimulación de tráfico PARAMICS (Quadstone Paramics, 2020) será fundamental para el desarrollo de la presente tesis, y por ese motivo, a lo largo de esta sección se entregan características específicas del *software*, particularmente obtenidas de uno de los capítulos del libro de Barceló (Sykes, 2010).

PARAMICS se ha utilizado en una amplia variedad de proyectos de modelamiento de sistemas de transporte a nivel microscópico. Por ejemplo, en evaluaciones de mejora de solo cruces y análisis de impacto del tráfico a pequeña escala. Los modelos a mayor escala incluyen modelos urbanos o regionales de áreas extensas que se utilizan para evaluar el impacto de los planes principales o que se utilizan como una herramienta de planificación disponible de forma continua para estudiar el efecto de varios planes de tráfico en una zona. Se encuentran disponibles interfaces desde sistemas de control de tráfico urbano, así como para investigar opciones para la optimización de los sistemas de control urbano y de los sistemas de control de autopistas. También presenta la capacidad para aplicar microsimulación a modelos de áreas grandes. Estos modelos pueden llegar a cubrir decenas de kilómetros cuadrados con cientos de zonas y cientos de kilómetros de red de carreteras (Sykes, 2010).

Para plantear la construcción de la red donde se aplica el modelo correspondiente, Sykes (2010) afirma que PARAMICS permite crear redes de carreteras y cruces que representen el área establecida. También permite construir intersecciones con semáforos y definir su programación. Los orígenes y destinos de la demanda se incorporan definiendo *zonas*. Asimismo, la

demanda puede incluir distintos vehículos según sus características, así poder representar sin problemas autos, camiones, buses, entre otros. A través de matrices de demanda de origen-destino (OD) admite el control de la carga de vehículos en la red.

En el contexto de simulación descrito por Sykes (2010), se identifican dos componentes necesarios para simular los movimientos del vehículo y el comportamiento del conductor. El primero es lo mencionado anteriormente respecto a la provisión del entorno para que los vehículos se mueven. El segundo es la implementación de los algoritmos de comportamiento que simulan las respuestas del conductor al entorno percibido. El simulador tiene una variedad de algoritmos para encontrar rutas dentro del modelo de simulación. La más simple es una asignación de “todo o nada”, aplicable cuando no hay elección de ruta en el modelo. Los algoritmos de enrutamiento más complejos dividen el viaje en secciones entre los principales puntos de ruta e incluyen los efectos de la percepción imprecisa del conductor de los costos relativos de diferentes rutas. La derivación de los costos depende de la jerarquía de clases de carreteras y puede incluir un proceso de aprendizaje tanto sobre la congestión como una respuesta variable a ella.

Con respecto a la calibración y la validación, en el *software* deben estar disponibles dos conjuntos de datos observados durante el proceso de desarrollo del modelo. Uno se utiliza para calibrar el modelo, ajustando los parámetros de modo que la salida del modelo coincida adecuadamente con estos datos observados. El segundo conjunto se utiliza para verificar que otros aspectos del desempeño del modelo calibrado están de acuerdo con este conjunto de datos observados. En particular para la calibración, Sykes (2010) menciona que el modelo permite ajustar parámetros relacionados a la asignación para la matriz de demanda, jerarquía en las carreteras y características de las uniones y enlaces para obtener costos de congestión realistas.

Finalmente, diversos estudios han utilizado PARAMICS para la simulación de tráfico, particularmente, dentro del enfoque de evacuación ante emergencia. HOU et al. (2009) por medio del *software* busca obtener el tiempo de evacuación ante emergencia para un estadio de gran magnitud. Los autores utilizan observaciones en los cambios de los parámetros de tráfico antes y después de los incidentes ocurridos en el tercer anillo de Beijing para poder estimar el tiempo de evacuación ante un incidente similar. Asimismo, Song et al. (2010) presentan un sistema de simulación de transporte de emergencia urbano basado en PARAMICS y sus aplicaciones para el área metropolitana de Beijing. Esta herramienta se puede utilizar para simular movimientos de vehículos y peatones en situaciones de emergencia a partir del análisis de comportamiento realizado a través del simulador. Además, el sistema propuesto tiene en cuenta todo el proceso de evacuación bajo un evento hipotético de emergencia. Como resultado del estudio, el desarrollo del paquete demuestra su eficacia para producir estrategias de rutas de evacuación, optimizar los recursos de emergencia, identificar el tiempo total de evacuación y evaluar el desempeño de las operaciones de evacuación. Por último, Tu et al. (2010) establecen un marco de simulación microscópico a través de PARAMICS en condiciones de evacuación para evaluar el impacto de las variaciones del comportamiento de conducción en el tiempo necesario para la evacuación. El estudio desarrolla diferentes escenarios en términos de tasa de aceleración, velocidad máxima, avance medio y distancia mínima de separación. Como resultado se muestran que los aumentos en la tasa de aceleración y en la velocidad máxima no tienen un impacto significativo en el tiempo necesario para la evacuación. También se encuentra una reducción tanto en el avance medio como en la brecha mínima, lo cual reduce significativamente el tiempo total de evacuación.

2.5. Síntesis y observaciones finales

En este capítulo, se presenta una revisión de literatura completa sobre planes de evacuación ante diversas emergencias, con un especial énfasis en el modelamiento y simulación. A lo largo del capítulo se ha permitido entender con mayor profundidad las posturas de cada enfoque para los problemas de evacuación. Se establece claramente que es necesario definir el sistema y la estructura correspondiente según el tipo de problema que se quiera enfrentar, identificando las características de la demanda, tanto el tamaño de la población como la localización de esta y las ubicaciones tentativas para los refugios. También es fundamental, la forma de asignar y distribuir a los evacuados para lograr realizar la operación dentro del tiempo límite. En este último punto, los enfoques analizados en cada sección del capítulo permiten describir el modelo. Algunos recrean de forma más realista los eventos que otros, pero esto puede usualmente conlleva un mayor costo computacional. Esto puede no ser conveniente durante emergencias imprevistas .

Se destaca el enfoque dinámico por sobre el estático, ya que permite la toma de decisiones de los vehículos y peatones durante la evacuación evitando rutas congestionadas. También se destaca el enfoque estocástico por sobre el determinista, específicamente en la demanda y la generación de viajes por periodos. Ambos enfoques destacados permiten una mejor representación de la realidad. Sin embargo, como se menciona en el párrafo anterior, se debe tener en consideración las limitaciones computacionales y temporales.

Al estudiar la emergencia de forma anticipada, se suele identificar el tiempo límite para evacuar, las zonas seguras y de peligro, las herramientas disponibles para la evacuación, entre otras; lo anterior permite diseñar el modelo que resolverá el problema de evacuación. De forma recurrente se identifican dos objetivos en los modelos de los estudios analizados: maximizar el número de evacuados y minimizar el tiempo total de evacuación. Ambos objetivos logran solucionar la esencia del problema, pero la elección de cada uno dependerá netamente del tipo de emergencia al que se enfrentan.

Para validar los resultados de los modelos propuestos, la mayoría de los estudios utilizan la simulación por medio de programas computacionales. Varios estudios han utilizado el *software* PARAMICS Quadstone Paramics (2020), el cual se caracterizado por ser un microsimulador de tráfico que cumple satisfactoriamente con los requerimientos usuales en los problemas de evacuación.

Capítulo 3

Metodología para la modelación

El problema que se busca enfrentar son las emergencias producto de un fenómeno natural, el cuál según su magnitud y la posibilidad de impacto en zonas pobladas, requiera generar una alerta de evacuación para retirar posibles afectados hacia zonas seguras. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es desarrollar una metodología aplicable para distintos escenarios, donde a partir de la modelación y simulación a través del microsimulador Paramics sea posible evaluar un plan de evacuación para el caso de estudio.

La idea es construir un microsimulador que replique computacionalmente las condiciones de la evacuación considerando un tiempo limitado para reaccionar y el comportamiento de las personas al evacuar, tanto en vehículo particular, como a pie o en buses destinados a este objetivo. Una parte importante del trabajo se centra en la utilización de la Interfaz de Programación del *software* Paramics para modelar comportamientos específicos de la evacuación mixta no presentes en el simulador basal que solo contempla las condiciones habituales del tránsito urbano. De esta manera se consigue integrar apropiadamente los distintos modos de transporte utilizados en la evacuación. Cabe destacar que la red considera las características del caso de estudio: tanto la demanda de viajes, como los atributos correspondientes de estos viajes.

3.1. Caso de Estudio

3.1.1. Antecedentes

Entre los desastres naturales que impactan el país, un tipo muy frecuente y que usualmente se produce en la zona norte del territorio nacional son los *aluviones*. Estos fenómenos corresponden a flujos de barro donde el agua arrastra el material suelto por una ladera, quebrada o cauce, que pueden viajar muchos kilómetros desde su origen, aumentando de tamaño a medida que avanza pendiente abajo transportando rocas, hojas, ramas, árboles y otros elementos, alcanzando gran velocidad¹. En los últimos años se ha presenciado un aumento de precipitaciones en la zona norte de Chile, generando en los años 2015 y 2017 aluviones de gran impacto en la cuenca del río Salado (Fig. 3.3). Chañaral (Fig. 3.4) se convirtió en

¹<https://www.onemi.gov.cl/aluviones/>

la comuna ícono del desastre por estas inundaciones, donde no solo hubo un impacto material, sino que también aislamiento de la población e incluso pérdidas de vidas. La Fig. 3.1 ilustra el nivel desastre provocado por el aluvión del 2015 en la Región de Atacama ². Según la ONEMI, para el aluvión del 2015 se reportaron 31 personas fallecidas, 16 desaparecidas, 16.588 damnificados en la Región de Antofagasta y Atacama, siendo Chañaral una de las comunas más afectadas ³.

El problema real de la emergencia es abordado en la tesis de Cornejo (2017), quien explica que debido a la urbanización y el estrechamiento de los márgenes de la rivera del río Salado se propicia una relación conflictiva en el momento que ocurren las lluvias y el río vuelve a ocupar su cauce natural. A pesar de que el historial de los aluviones en Chañaral se remonta del año 1848, se continúa formando un ciclo propiciado por la reconstrucción y destrucción de un ámbito urbano.

La Región de Atacama cuenta con un Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Remoción de Masas⁴, el cual tiene como objetivo:

“Establecer la acciones de respuesta que desarrolla el nivel regional en las distintas fases operativas, ante situaciones de emergencia, desastre y/o catástrofe, por evento de remoción en masa, a través de la coordinación de organismos técnicos y de primera respuesta, para brindar protección a las personas, sus bienes y medio ambiente.”

Específicamente, el Plan entrega Sistemas de Alertamiento Técnico, indicando a los organismos responsables por tipo de alerta y el tiempo en el que se emiten las alertas previo al desastre. En la Tabla 3.1 se entrega de forma resumida esta información. El caso relevante para la presente tesis es el “Aviso Meteorológico de carácter cuantitativo que alcanzará categoría de intensa o extrema” el cual debe ser avisado con 12 horas de anticipación. Si bien, este periodo de tiempo podría ser suficiente para evacuar a los posibles afectados, los testimonios de aluviones recientes han dejado en evidencia que la evacuación se inicia con menos anticipación. La siguiente cita es extraída de (Cornejo, 2017, pág. 92) y cuenta lo siguiente por la Sra. Sonia Ovalle:

“Si bien es cierto nuestro río [Salado] no trae agua, pero cuando viene, ¡viene! Pero no creímos que llegara con tanta fuerza [...] recién a las 12 de día alguien gritó que debemos evacuar porque viene una ola gigante de barro junto con mi hermana y madre mayor, que tiene 95 años, nos dispusimos a subir hacia la parte alta, al escuchar la alerta de aluvión que pasaron los bomberos, pero ya era muy tarde para que todos los vecinos evacuemos [...] cuando estamos en la calle Merino Jarpa, doy la vuelta atrás [hacia el río] y no logro creer lo que veo, miro una masa de barro, postes, restos de casa, envueltos en barro, quedé en estado de shock, cuando vuelvo en mí, me encuentro en la parte superior mirando como vecinos luchaban como salir de esa masa de barro, desde esa vista, el barro tapaba mi casa [...]”

²https://www.bbc.com/mundo/ultimas_noticias/2015/04/150406_ultnot_chile_computo_desastre_atacama_ch

³<https://www.onemi.gov.cl/alerta/monitoreo-por-evento-hidrometeorologico/>

⁴<https://www.onemi.gov.cl/planes-nacionales/>

Complementario al Plan Específico por Variable de Riesgo Remoción en Masas se cuenta con un Plano de Evacuación por Remoción de Masas para la ciudad de Chañaral⁵ (Fig. 3.2). Este plano muestra el área a evacuar y puntos tentativos de encuentro. Sin embargo, no presenta vías de evacuación, indicaciones, ni tampoco refugios tentativos.

Chañaral ha realizado simulacros ante emergencia en los últimos años, la mayoría ha sido para riesgos de tsunami, estos entregan zonas seguras y vías de evacuación, pero no logran conversar con emergencias por aluvión, ya que los tiempos, distancias e incluso los destinos no coinciden con lo estudiado en el presente trabajo. El año 2016 se realizó un simulacro de aluvión, el cual movilizó a 500 personas en los sectores de las quebradas Conchuelas y Cabritos (zona sur-poniente de Chañaral)⁶. A pesar de ello, el número de participantes y la escala de simulacro no estuvo al nivel de evacuación que se espera modelar y simular en la presente Tesis.

Tabla 3.1: Sistemas de Alertamiento Técnico por Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Remoción de Masas

Organismo Responsable de la Alerta/Alarma	Amenaza/Variable de Riesgo	Alerta/Alarma	Tiempo de aviso previo al inicio de la ocurrencia de un evento
SERNAGEOMIN	Remoción en Masa	Minuta técnica que establece posibilidad de ocurrencia Alta, Media o Baja.	-
Dirección Meteorológica de Chile	Hidrometeorológica	Aviso Meteorológico de carácter cualitativo que alcanzará categoría de normal a moderada	5 días
Dirección Meteorológica de Chile	Hidrometeorológica	Aviso Meteorológico de carácter cuantitativo que alcanzará categoría de moderado a fuertes	2 días
Dirección Meteorológica de Chile	Hidrometeorológica	Aviso Meteorológico de carácter cuantitativo que alcanzará categoría de intensa o extrema	12 horas
Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas	Crecida de cauces	Alerta de Crecida de Ríos y Lagos	-



Figura 3.1: Impacto provocado por Aluvión 2015.

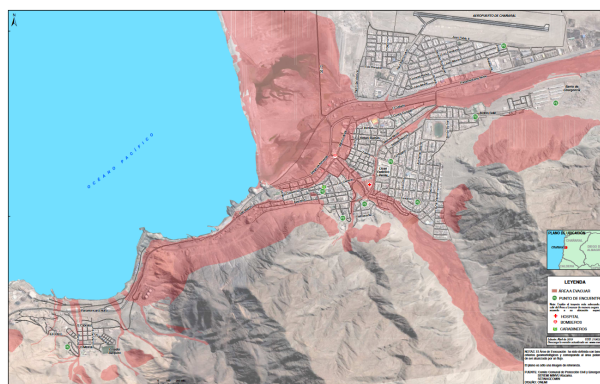


Figura 3.2: Plano de Evacuación por Remoción de Masas, Región de Atacama, Chañaral 2019

⁵<https://www.onemi.gov.cl/mapas/region/atacama/#C>

⁶<https://www.onemi.gov.cl/noticia/simulacro-de-aluvion-movilizo-500-personas-en-chañaral/>

3.1.2. Situación Actual

La ciudad y comuna de Chañaral se localiza en la costa y es una zona típicamente árida con escasas lluvias durante al año. La población de Chañaral el año 2017 era de 12.219 habitantes según el Censo nacional ⁷ Adicionalmente, gracias a los datos recolectados a partir del Instituto Nacional de Estadística (INE), para el año 2017 el parque vehicular de Chañaral era de 3.717 vehículos motorizados livianos y medianos⁸. Si bien, se podría trabajar con proyecciones futuras de población y del parque vehicular, para construir el caso de estudio se decide trabajar en base al año 2019. Por lo tanto, se utilizan las proyecciones para el año 2019 a partir de los datos del censo 2017: la población se estima en 13.123 habitantes y el parque vehicular es de 4.935 vehículos. Con estos valores, la tasa de motorización es de 2,67 (per/veh). Esta tasa de motorización permite tener una referencia para las calibraciones que se harán respecto de la demanda de la red. Como se menciona en los antecedentes la



Figura 3.3: Impacto Aluviones 2015 y 2017 en Chañaral.

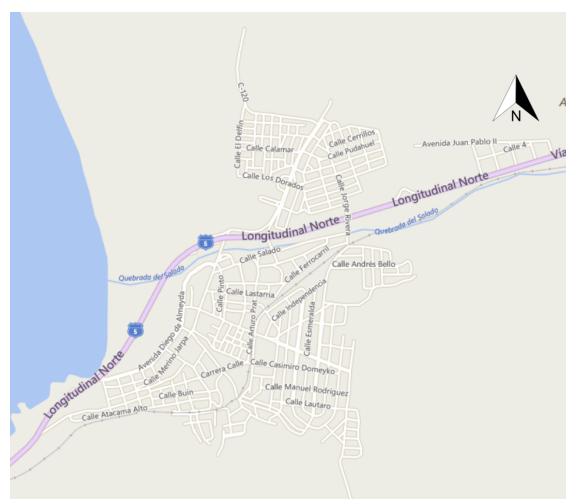


Figura 3.4: Mapa Chañaral. Fuente: Bing Maps.

información existente sobre plan de evacuación ante remoción de masas existe, pero carece de detalle con respecto al transcurso de la evacuación y los destinos finales para posibles refugios. No obstante, a modo de proyección de futuras catástrofes, se cuenta con un modelo detallado de la propagación de aluviones en el sector de Chañaral (Fig. 3.5), con mapas precisos y modelos predictivos del impacto para diversos escenarios de ocurrencia de aluviones (Alves et al., 2019). Esto permite identificar las zonas de mayor peligro y a su vez, aquellas que podrían ser destinos tentativos para los evacuados. De estos, para el proyecto se considera como destino la zona norte de la ciudad (el aeropuerto) (Fig. 3.6).

⁷<https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/demografia-y-migracion>

⁸<https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>

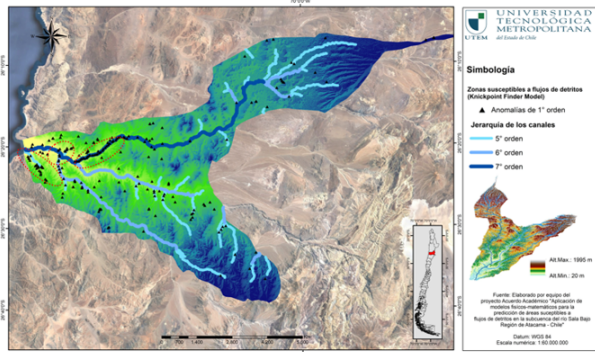


Figura 3.5: Modelo para deslizamiento de material (Alves et al., 2019)

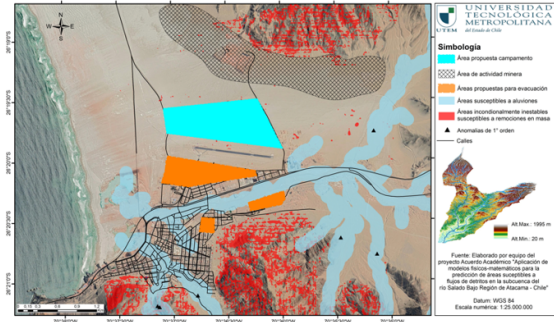


Figura 3.6: Zonas seguras para la evacuación (Alves et al., 2019)

3.2. Preparación de la Red de Simulación e Interfaz de Programación de Aplicaciones para el Comportamiento de la Demanda

3.2.1. Codificación de la Red

Una vez estructurado el Plan de Evacuación y definido los objetivos principales del trabajo, se debe recrear la situación a través de una plataforma simulación que sea capaz de representar el caso de estudio considerando la estructura base de la red, como también atributos de los modos de transporte y comportamiento durante la evacuación. El *software* PARAMICS corresponde a un microsimulador de tráfico donde es posible definir en detalle las características del modelo, entre ellas, la demanda de viajes de evacuación y los atributos de los arcos de la red. Una característica de este simulador en particular, es que permite programar por medio de la interfaz de programación (API), una variedad amplia y flexible de modelos de comportamiento, con lo que será posible representar de forma realista y ajustada ciertas peculiaridades que surgen al momento de una evacuación de emergencia, para así también proponer y cuantificar el rendimiento de varias estrategias tentativas. Gracias al Departamento de Transporte de la Universidad de Chile se dispone de la licencia para el uso de este simulador, por lo tanto, las características descritas anteriormente, junto con el conocimiento previo del estudiante sobre el programa recae en la decisión del uso del Software PARAMICS para desarrollar la presente Tesis.

Una de las herramientas que entrega PARAMICS es la visualización de la plataforma de asignación geoespacial Bing Maps, la cual funciona como capa y facilita la codificación de la red. Por lo tanto, con ayuda de esta herramienta se crean los siguientes 3 principales objetos:

- **Nodos:** Un total de 882 intersecciones son representados por nodos de Paramics. Por efectos del comportamiento de la simulación se prohíben 174 virajes en un total de 96 intersecciones (Fig. 3.7), con el fin de evitar conflictos irreales en la red durante la evacuación. Estos problemas ocurrían a raíz de la existencia de los peatones que de por sí tienen una velocidad considerablemente menor que los vehículos reales, por lo tanto, el cálculo para la elección de ruta provocaba que los vehículos motorizados tomaran

rutas más largas que terminaban por hacer círculos de tráfico imposibles de resolver o despejar al termino de la evacuación. A modo de ejemplo, en la Fig. 3.8 se muestran las intersecciones próximas al aeropuerto con sus respectivos movimientos permitidos y prohibidos.

- Arcos: Un total de 2054 arcos representan las calles de Chañaral, de ellas, 1786 son de Categoría 1 (una pista) y 269 son de Categoría 2 (dos pistas). Para todas la velocidad límite es de $48[km/h]$.
- Zonas: Un total de 22 zonas se crearon, donde se tomó como referencia las áreas censadas el año 2017, estas permiten definir una matriz de origen y destino para poder dirigir a los evacuados a los respectivos refugios (Fig. 3.9).

También, se trabaja con el parámetro *Feedback Period*, el cual cada cierto tiempo permite a los usuarios modificar su elección de ruta dinámicamente de acuerdo con los tiempos de viaje que se vayan observando. Luego de múltiples pruebas de simulación se llega a la conclusión de que el parámetro debe ser fijado en 15 minutos, ya que para efectos de la modelación, este valor permite evitar grandes aglomeraciones que interfieran con el flujo hacia los destinos y colapsos que escapan de la realidad de la evacuación.

Finalmente, una vez completa la Red en su totalidad (Fig. 3.12) se empieza a estructurar la demanda, definiendo su población y construyendo comportamientos a través del API de Paramics.

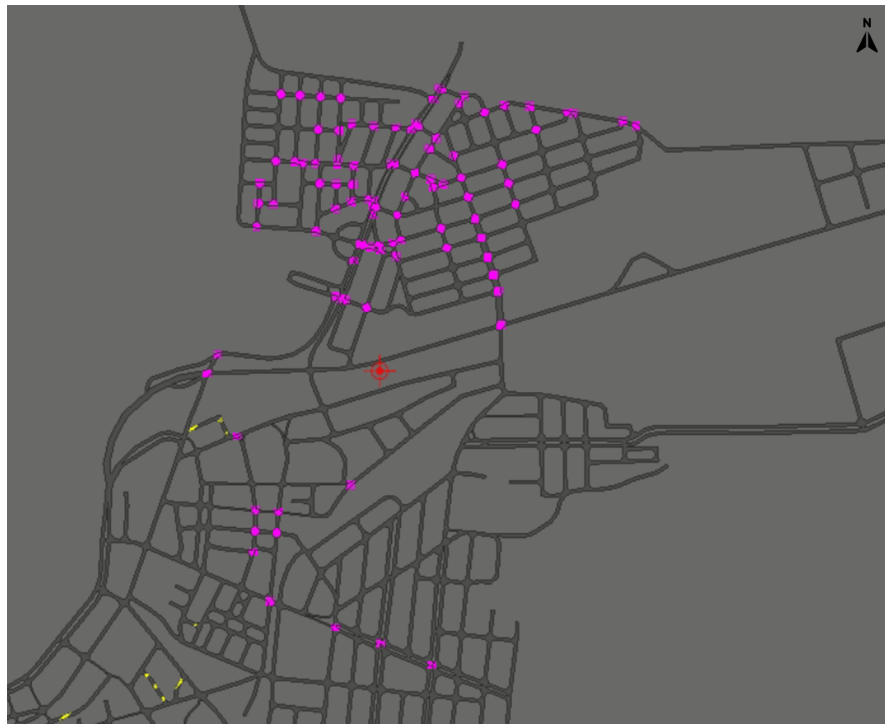


Figura 3.7: Intersecciones con prohibición de movimientos.

3.2.2. Definición de la población

La distribución de los modos de transporte se realiza a partir de los datos recolectados previamente. Con respecto a la población los datos se extraen de los resultados del Censo

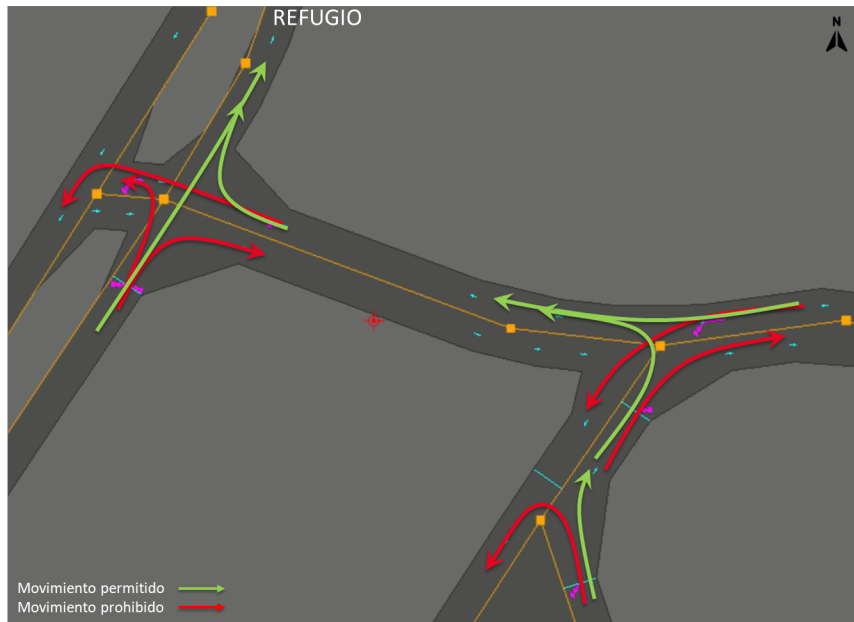


Figura 3.8: Ejemplo de movimientos permitidos en intersecciones conflictivas.

2017 a partir de su sitio web⁹ que entrega forma esquemática y desagregada la población por zonas o manzanas censadas. Esto permite no sólo definir las zonas descritas en la sección anterior, sino también, entregarle a cada una la proporción correspondiente de población. Por otra parte, en relación al parque vehicular, los datos se obtienen a partir del Instituto Nacional de Estadística¹⁰, el cual permite saber el número total de vehículos motorizados livianos y medianos y la distribución de estos por tipo de vehículos para cada comuna.

Con la población total y el parque vehicular se calcula la tasa de motorización, para su cálculo se debe realizar una depuración de las cifras de acuerdo con estándares internacionales, que sólo toman en consideración los vehículos livianos y medianos¹¹. La ecuación para la tasa de motorización es la siguiente:

$$\text{Tasa Motorizacion} = \frac{\text{Total Población}}{\text{Total Veh. Mot. Livianos y Medianos}}$$

y en la Tabla 3.2 se presenta los valores totales de los datos recolectados, cabe mencionar que para el cálculo de la tasa de motorización se usa el parque vehicular del año y la proyección de la población total para el 2019, año elegido debido a sus cifras representativas.

Para la distribución de los evacuados para cada medio de transporte se define la siguiente organización: se destina el 25 % de la población para evacuar a pie y el 75 % para evacuar en vehículos motorizados livianos y medianos; estos últimos se clasifican en siete tipos, y a partir de la Base de Datos extraída del INE, es posible identificar los porcentajes de cada vehículo y representarlos en PARAMICS con tamaños y velocidades aproximadas. Además, a partir de la tasa de motorización, se destina un promedio de tres personas por vehículo, esto se traduce en un total de 3.281 vehículos.

⁹<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=bc3cfbd4feec49699c11e813ae9a629f>

¹⁰<https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>

¹¹<https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2017/11/Anuario-2017.pdf>

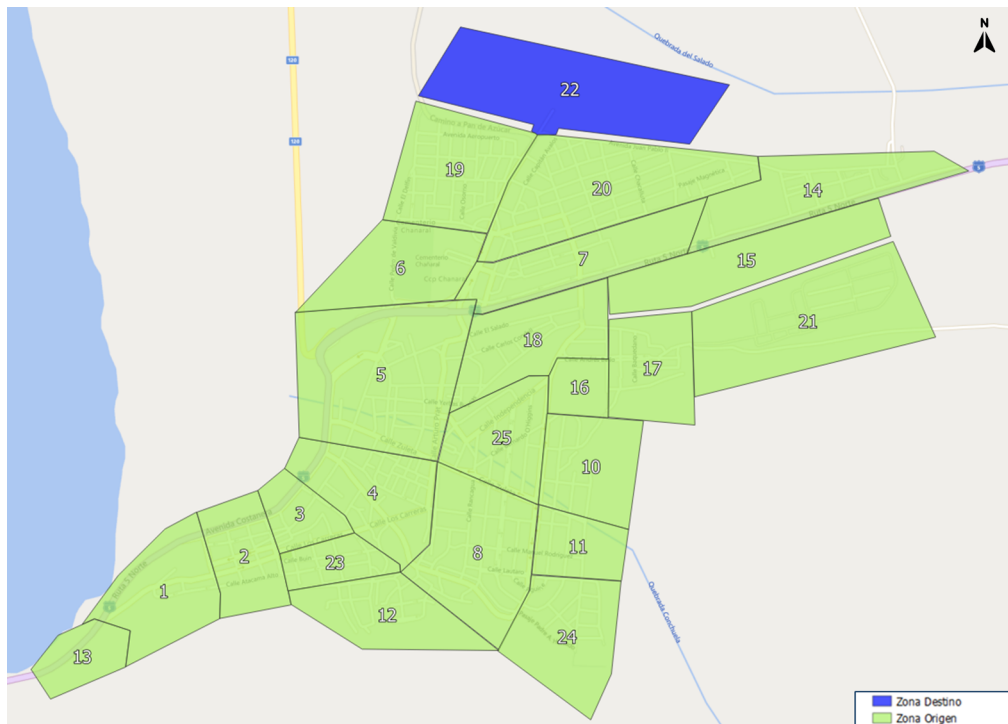


Figura 3.9: Zonificación Red Chañaral.

Tabla 3.2: Datos recolectados para la definición de la población

Año	Población	Veh. Livianos y Medianos
2017	12.219	3.717
2019	13.123	4.935
Tasa Motorización	2,67 %	

Si bien, es posible simular peatones en el *software*, estos no tendrían interacción con los vehículos más allá de intersecciones de la red, ya que las personas en PARAMICS solo se mueven por la acera de las calles. Esto simularía una situación poco realista, ya que lo que se busca representar en el problema es una evacuación mixta de individuos y vehículos usando el mismo espacio vial. Para salvar esta dificultad, se decide incluir a los peatones como pelotones de 10 personas modelados como pequeños vehículos, con velocidad máxima de 5 [km/hr]. De esta manera, el número total de vehículos representando *grupos de personas* (GP) es igual a 329. A modo de ejemplo, en la Figura 3.11 se visualiza los tipos de vehículos y en la Tabla 3.3 se muestra un resumen de la información descrita anteriormente.

3.2.3. Rutas fijas para peatones

Es usual instalar señales dentro de una ciudad para guiar a los peatones hacia la ruta correcta en caso de evacuación. Esto permite establecer rutas fijas para los peatones en el modelo. De esta manera, se espera reproducir el comportamiento de la evacuación a pie, el cual debe seguir ciertas reglas según las señalizaciones de evacuación de la ciudad. Adicionalmente, con esta implementación se observa una evacuación más ordenada, incentivando



Figura 3.10: Red Chañaral codificada en PARAMICS.

a los vehículos a tomar distintas rutas y a los peatones a seguir las rutas dispuestas sin ser afectadas por el *Feedback Period* fijado.

Para obtener este comportamiento dentro del simulador, se modela a los vehículos que representan peatones como transporte público. Esto permite definir las rutas fijas previamente a la simulación y las características de velocidad mencionadas en la *Definición de la población*. Se establecen 49 rutas para peatones dentro de toda la red con destino a la área segura “Aeropuerto” ubicada en la zona norte de Chañaral. Además, se distribuye el total de GP en todas las rutas tal de cumplir con la población destinada a evacuar a pie y las proporciones de población en cada zona. La Fig. 3.12 representa de manera esquemática se representan los caminos que seguirían los peatones desde varios puntos de la ciudad de acuerdo a las rutas fijas definidas.

3.2.4. Generación de viajes

Dentro de la codificación de la ciudad se construyeron subdivisiones de la red llamadas *zonas*, las cuales permiten asignar demanda de viajes desde varios orígenes hacia varios destinos, esto facilita la generación de viajes, ya que basta con definir el o los destinos y entregar los valores de la matriz. Estudios mencionados en la revisión de literatura indican que el tiempo dedicado a responder a una advertencia a menudo sigue una curva en S (Sorensen, 2000), con un aumento de número de viajes en periodo intermedio. Una de las distribuciones empleadas con mayor frecuencia en los estudios es la distribución Weibull (Pel et al., 2012).

Por defecto, PARAMICS recibe la información de demanda de viajes a través de una

Tabla 3.3: Distribución de modos de transporte según parque vehicular Chañaral.

Tipo Vehículo	Porcentaje población	Num. de vehículos
Auto	33,5 %	1.468
Furgón	2,2 %	97
Minibús	2,4 %	105
Camioneta	23,4 %	1.021
Moto	0,9 %	40
Taxi	1,6 %	68
Bus	11,0 %	482
GP	25,0 %	329

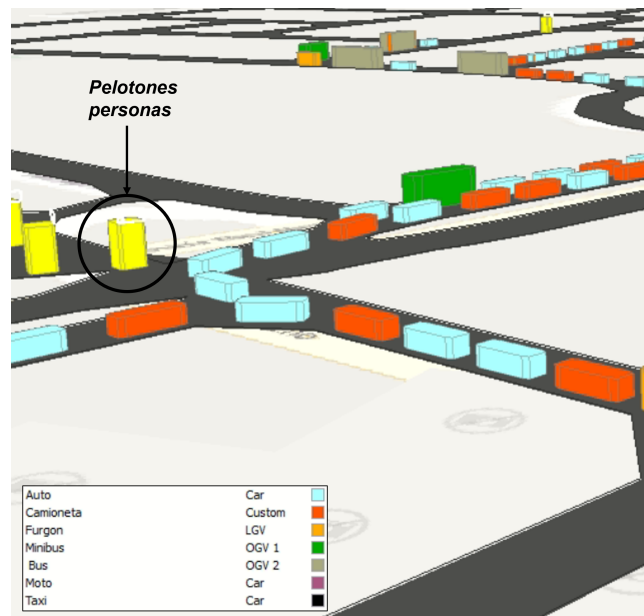


Figura 3.11: Representación vehículos en PARAMICS.

matriz que indica el número total de viajes en el horizonte de simulación para cada par de zonas origen-destino. Durante la ejecución de la simulación PARAMICS genera los viajes indicados distribuyéndolos de manera uniforme en el tiempo.

Para reproducir el comportamiento deseado en el que la tasa de viajes varía en el tiempo, la matriz O/D debe ser actualizada dinámicamente de manera de reflejar las tasas apropiadas en cada instante del tiempo. Para lograr esto se plantea el siguiente procedimiento: En primer lugar, para cada par origen-destino, se construye una lista de horarios de partida de viajes a partir de realizaciones de una variable aleatoria con distribución Weibull. Luego, el horizonte de evacuación es discretizado en un conjunto de intervalos de tiempo y se agrupan las salidas correspondientes a cada intervalo. El número de viajes en cada intervalo es utilizado para estimar las tasas de generación de viajes para las matrices O/D dinámicas. Para desarrollar el algoritmo para la generación de viajes se procede a trabajar en la Interfaz de Programación de PARAMICS el cual utiliza el lenguaje computacional *C++*.

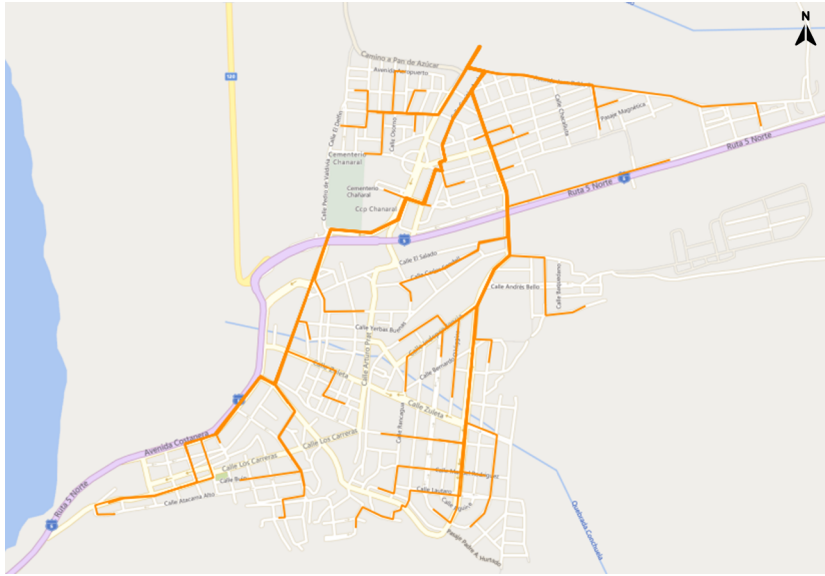


Figura 3.12: Rutas fijas para peatones.

La interfaz entrega herramientas claves para gatillar acciones antes y durante la simulación. Debido a esto, los algoritmos de generación de viajes, tanto para vehículos como para peatones, se separan en dos etapas: la primera se realiza previo a la simulación, en ella se crean los horarios de salida de los viajes a partir de realizaciones de una variable aleatoria $X \sim Weibull(\alpha, \beta)$ con función de distribución acumulada: $F(x) = 1 - e^{-(\alpha x)^\beta}$ para $x > 0$. La segunda etapa se lleva a cabo durante la simulación y es gatillada en cada instante de tiempo, permitiendo así actualizar la matriz O/D. Los Algoritmos 1 y 2 detallan los procedimientos para llevar a cabo la generación de viajes.

Los parámetros α y β permiten concentrar la generación de viajes o extender el tiempo de simulación total del problema. Luego de construir e implementar estos algoritmos, con el objeto de determinar los valores apropiados para los parámetros de las distribuciones, se realizaron simulaciones en PARAMICS para distintos valores de α y β tanto para vehículos y como para peatones. Las Figuras 3.13 y 3.14 muestran la fluctuación de los parámetros para el caso de los vehículos y las Figuras 3.15 y 3.16 para el caso de los peatones. Luego de estos experimentos, se elige $\alpha = 4$ para ambos casos y el valor para β se extiende entre 6.000 y 14.000 para lograr evacuar a la población en ventanas de tiempo del orden de 3 a 6 horas. La Tabla 3.4 resume los parámetros elegidos para los escenarios descritos en el próximo capítulo.

3.2.5. Evacuación mixta para vehículos y peatones

Si bien, la posibilidad de representar a los peatones como vehículos resuelve una de las restricciones del simulador, a través de análisis exhaustivos se determina que la existencia de colas vehiculares en las zonas de atochamiento permite representar la realidad con respecto a los vehículos. Sin embargo, esta situación no representa de manera apropiada el comportamiento de los peatones para los cuales se espera que continúen avanzando entre las filas de vehículos detenidos o muy baja velocidad.

La naturaleza del simulador no permite recrear situaciones de adelantamiento en una

Algorithm 1: Generación de viajes para vehículos

```
1 Parámetros
2  $X_{i,j} \leftarrow N^\circ$  vehículos evacuados de  $i$  a  $j$ 
3  $\alpha \leftarrow$  parámetro Weibull
4  $\beta \leftarrow$  parámetro Weibull
5  $I \leftarrow$  zonas de origen :  $\{1, \dots, 25\}$ 
6  $J \leftarrow$  zonas de destino :  $\{16, 21, 22\}$ 
7 Variables
8  $H_{i,j} \leftarrow$  diccionario vacío asociado a  $i, j$  (Llave : segundos)
9  $llave_{i,j} \leftarrow$  lista que guarda los segundos asociados a los histogramas
10 Fase 0 (qpx_NET_POSTOPEN) (previo a la simulación)
11 for  $i, j \in I, J$  do
12   for  $p = 0$  hasta  $X_{i,j} - 1$  do
13     generar V.A  $S \sim Weibull(\alpha, \beta)$  (corresponde a un viaje en el segundo  $S$ );
14     insertar  $S$  a  $H_{i,j}$  (con el fin de formar el histograma); agregar  $S$  a  $llave_{i,j}$ ;
15   end
16   ordenar  $llave_{i,j}$  de menor a mayor;
17 end
18 Fase 1 (qpx_NET_TIMESTEP): durante la simulación
19  $time \leftarrow qpg\_CFG\_simulationTime()$  (instante de la simulación);
20 for  $i, j \in I, J$  do
21   if  $llave_{i,j}[0] = time$  then
22      $qps\_DMD\_demand(1, i, j, F(H_{i,j}\{time\}))$  (set nueva demanda,  $F$ : función
23     ponderadora que depende de los histogramas creados);
24   end
25 end
```

Algorithm 2: Generación de viajes para peatones

```
1 Parámetros
2  $Y_{p_o, p_d, s} \leftarrow N^\circ$  peatones evacuados de  $p_o$  a  $p_d$  en el tiempo de partida  $s$ 
3  $\alpha \leftarrow$  parámetro Weibull
4  $\beta \leftarrow$  parámetro Weibull
5  $P_o \leftarrow$  paraderos origen
6  $P_d \leftarrow$  paraderos destino
7 Variables
8  $K_{p_o, p_d} \leftarrow$  diccionario vacío asociado a  $p_o, p_d$  (Llave : segundos)
9  $llave2_{p_o, p_d} \leftarrow$  lista que guarda los segundos asociados a los histogramas
10 Fase 0(qpx_NET_POSTOPEN) (previo a la simulación)
11 for  $p_o, p_d \in \bar{P}_o, P_d$  do
12   for  $y = 0$  hasta  $(\sum_s Y_{p_o, p_d, s}) - 1$  do
13     generar V.A  $S \sim Weibull(\alpha, \beta)$  (corresponde al segundo de generación del
14     viaje);
15     insertar  $S$  a  $K_{p_o, p_d}$  (con el fin de formar el histograma); agregar  $S$  a  $llave_{p_o, p_d}$ ;
16   end
17   ordenar  $llave2_{p_o, p_d}$  de menor a mayor;
18 end
19 Fase 1(qpx_NET_TIMESTEP): durante la simulación
20  $time \leftarrow qpg\_CFG\_simulationTime()$  (instante de la simulación);
21 for  $p_o, p_d \in P_o, P_d$  do
22   if  $llave2_{p_o, p_d}[0] = time$  then
23     for  $x = 0$  hasta  $K_{p_o, p_d}\{time\} - 1$  do
24        $qps\_BSR\_nextReleaseTime(x, p_o, p_d, 3)$  (insertar peatones a la red con
25       una diferencia de 3 segundos);
26     end
27     eliminar  $time$  de  $llave2_{p_o, p_d}$ 
28   end
29 end
```

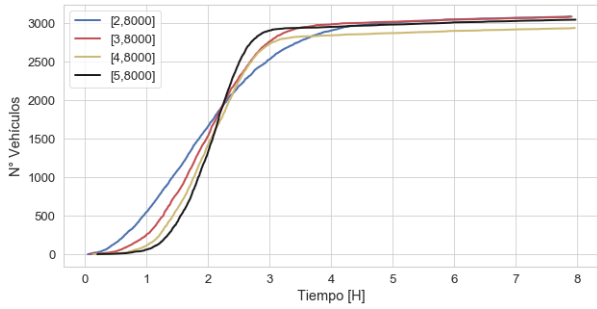


Figura 3.13: Generación de viajes variando parámetro α para vehículos.

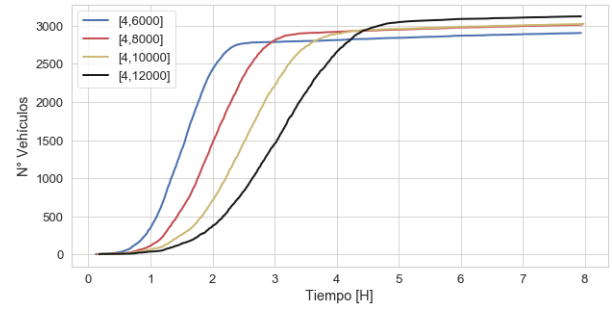


Figura 3.14: Generación de viajes variando parámetro β para vehículos.

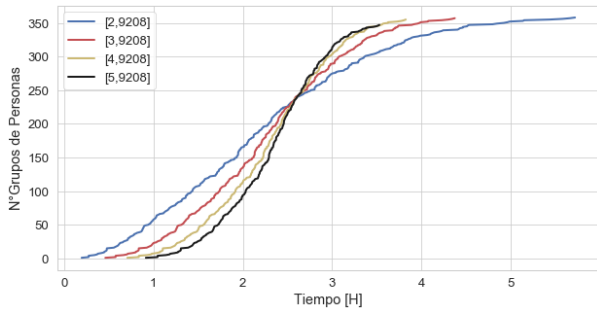


Figura 3.15: Generación de viajes variando parámetro α para peatones.

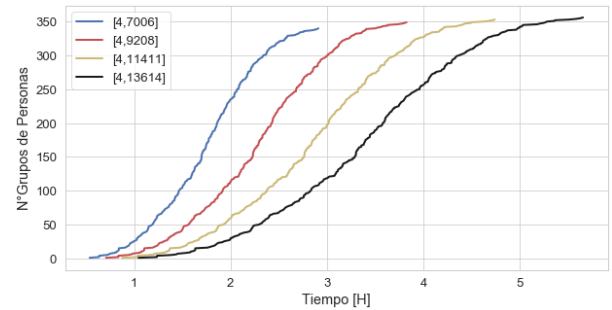


Figura 3.16: Generación de viajes variando parámetro β para peatones.

misma pista, por lo que se propone una solución alternativa para modelar el fenómeno de los peatones caminando entre los vehículos detenidos o casi, que considere: que los peatones siguen avanzando a pesar de la fila de vehículos y que la velocidad de los vehículos se ve afectada por la presencia de peatones.

La idea general consiste en identificar los segmentos de mayor aglomeración y modelar el tráfico mixto vehículos/peatones utilizando lo que denominamos *vectores mixtos*. Cuando un GP llega al inicio de estos segmentos, a partir de las condiciones actuales de tráfico, se determina el tiempo que se demora en atravesarlo. Luego, el GP es eliminado de la red de PARAMICS y es reinsertado al final del vector mixto una vez transcurrido el tiempo determinado. Al atravesar un link que es un vector mixto los vehículos no son eliminados, pero su velocidad es modificada para considerar la congestión generado por los GP que están atravesando en el link en ese momento.

Para implementar esta idea seguimos el siguiente procedimiento:

1. Se evalúa e identifica el área y las calles de mayor aglomeración, donde suelen manifestarse colas de GP a partir de simulaciones preliminares.
2. A partir de lo observado en el primer paso, se definen conjuntos de arcos los llamados “vectores mixtos”, que cumplirán el rol de recibir estos grupos de personas y cambiar las velocidades de los usuarios en el viaje por estas calles.

Tabla 3.4: Parámetros fijados para cada ventana de tiempo

Modo de transporte	Ventana de tiempo	α	β
Vehículos	6 Horas	4	12.000
	5 Horas	4	10.000
	4 Horas	4	8.000
	3 Horas	4	6.000
Peatones	6 Horas	4	13.614
	5 Horas	4	11.411
	4 Horas	4	9.208
	3 Horas	4	7.006

3. Se cambian las rutas fijas de los GP tal de que finalicen en los vectores mixtos. La interfaz del simulador mostrará que los pelotones de personas llegan a cierta zona y desaparecen, no obstante, en el API se entregaran órdenes de reajuste según estas llegadas y calculará tiempos y posición de los GP durante estos vectores mixtos, nuevamente, buscando representar una evacuación mixta en la misma pista. La zona de alta aglomeración identificada, junto con las rutas fijas definidas se esquematizan en la Fig. 3.17, donde se muestra hasta donde llegarían las rutas fijas para luego continuar en la zona de aglomeración a través de vectores mixtos.

Para modelar como son afectadas las velocidades de peatones y vehículos en los vectores mixtos, se utiliza un enfoque basado en la Ecuación Fundamental del Tráfico $q = k \times u$, donde q corresponde al flujo vehicular, k la densidad y u la velocidad en un tramo dado.

Para los grupos de personas, se sigue el modelo Underwood $u = u_f e^{-(k/k_0)}$ sobre la base del estudio de Rastogi et al. (2013), donde u_f corresponde a la velocidad a flujo libre y k_0 es la densidad óptima; además, la densidad $k = \frac{f_p \cdot NP}{L \cdot (W+V) - f_v \cdot NV \cdot (O_v + \frac{1}{k_j})}$ depende de factores tales como largo L y ancho W de pista, ancho de acera V , número de vehículos NV , número de peatones NP , área de ocupación de vehículos O_p , densidad de embotellamiento de vehículos k_j y dos factores f_v y f_p provenientes de la calibración del modelo.

Para la velocidad de los vehículos, se sigue el modelo de Greenshield $u = u_f (1 - k/k_j)$ sobre la base del estudio de Gaddam y Rao (2019), donde u_f corresponde a la velocidad a flujo libre, el cual para este caso será la velocidad de los peatones obtenida por el modelo anterior, k_j es la densidad de embotellamiento y la densidad $k = \frac{1+NV}{(L \cdot W) - (NP \cdot O_p)}$ depende del largo, ancho, número de vehículos, número de peatones y área de ocupación de los peatones.

Los parámetros empleados para ambos modelos se muestran en la Tabla 3.5. Las Figuras 3.19 y 3.20 muestran el comportamiento de la velocidad y el flujo con respecto a la densidad de los peatones (variando número de vehículos) para una calle determinada. La Figura 3.18 presenta un ejemplo en cierto instante de los arcos mixtos, los cuales adquieren cierto color dependiendo del número de peatones que se encuentre en la calle. Cabe recalcar que dado que los vehículos dependen de la velocidad a flujo libre de los peatones, sus variaciones de velocidad durante el trayecto en los vectores mixtos varían de forma limitada.

El Algoritmo 3 describe el procedimiento realizado dentro de la Interfaz de programación.

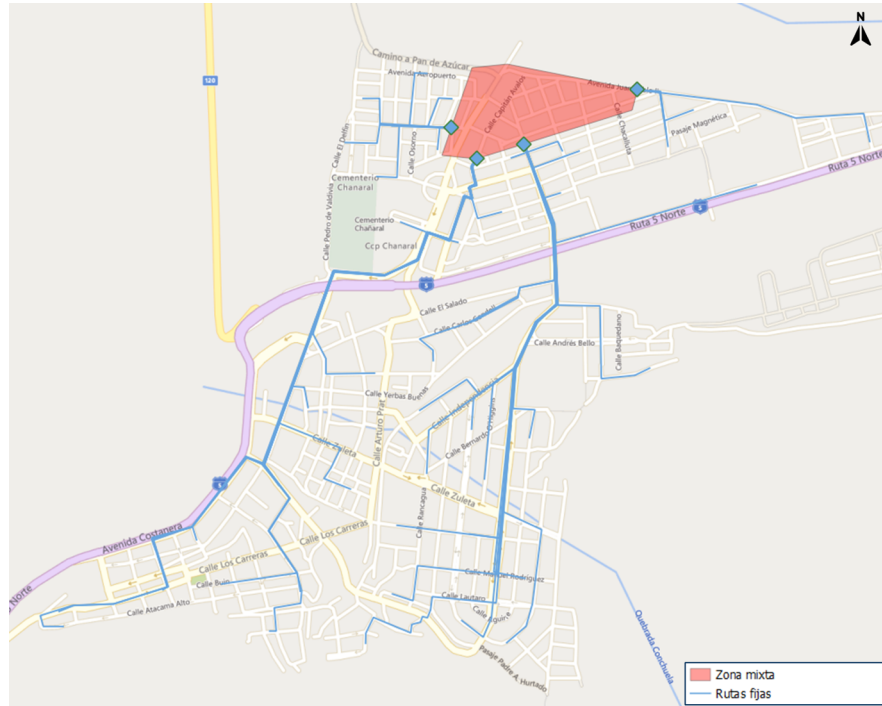


Figura 3.17: Rutas fijas en el contexto de evacuación mixta.

Tabla 3.5: Parámetros para velocidades en vectores mixtos.

Parámetro	Valor
$u_{fPEATON}$	$1,5 \left[\frac{m}{s} \right]$
$k_{0PEATON}$	$3 \left[\frac{peat}{m^2} \right]$
$u_{fVEHICULO}$	v_{PEATON} , para $NP > 0$ $48 \left[\frac{km}{h} \right]$, para $NP = 0$
$k_{jVEHICULO}$	$0,7 \left[\frac{veh}{m} \right]$
f_v	$0,0026 \cdot (L_{arco} \cdot W_{arco} + 0,2551)$
f_p	$0,1975 \cdot (L_{arco} \cdot W_{arco} - 50)$

Algorithm 3: Evacuación mixta

```
1 Parámetros
2  $ID \leftarrow$  dígito relacionado al G. de personas
3  $F \leftarrow$  primer arco del vector mixto
4  $A \leftarrow$  arcos mixtos
5  $B_a \leftarrow$  arco que continúa luego del arco a
6  $u_{fv} \leftarrow$  Velocidad a flujo libre vehículos
7  $u_{fp} \leftarrow$  Velocidad a flujo libre peatones
8  $k_j \leftarrow$  densidad de embotellamiento vehículos
9  $k_o \leftarrow$  densidad óptima peatones
10  $NV_a \leftarrow$  N° de vehculos en el arco a
11  $L_a \leftarrow$  largo del arco a
12  $W_a \leftarrow$  ancho del arco a
13 Variables
14  $D_a \leftarrow$  lista vacía asociada a: a ∈ A donde se guardan los i ∈  

    ID e instante de tiempo en que este avanzará al siguiente arco
15  $VLim_a \leftarrow$  Velocidad límite en el arco a ∈ A
16  $NP_a \leftarrow$  N° de peatones en el arco a (Para t=0, NPa = 0)
17 ACCIÓN GATILLO 1: Llegada de un G. de personas i ∈ ID al arco mixto f ∈ F
18  $NP_{f+} = 1;$ 
19  $VLim_f = u_{fp} (1 - \frac{k(NV_f, NP_f, L_f, W_f)}{k_j})$  Se recalcula la velocidad límite para el arco a  

    según Greenshield;
20  $time = \frac{L_f}{u_{fp} e^{-(k/k_0)}}$  Se calcula el tiempo de demora del G.P. i a partir de Underwood;
21  $instante = time + qpg\_CFG\_simulationTime();$ 
22 insertar [i , instante] a Df;
23 ordenar Df de menor a mayor según instante
24 ACCIÓN GATILLO 2:  $D_a[1] = qpg\_CFG\_simulationTime() \forall a \in A$   

    (Da[1] : instantes de llegada)
25  $NP_{b_a+} = 1;$ 
26  $NP_{a-} = 1$ 
27  $VLim_{b_a} = u_{fp} (1 - \frac{k(NV_{b_a}, NP_{b_a}, L_{b_a}, W_{b_a})}{k_j})$  Se recalcula la velocidad límite para el arco a  

    según Greenshield;
28  $time = \frac{L_{b_a}}{u_{fp} e^{-(k/k_0)}}$ ;
29  $instante = time + qpg\_CFG\_simulationTime();$ 
30 insertar [i , instante] a Dba;
31 ordenar Da de menor a mayor según instante;
32 if  $NP_a = 0$  then
33 |  $VLim_a = u_{fv}$ 
34 end
35
```

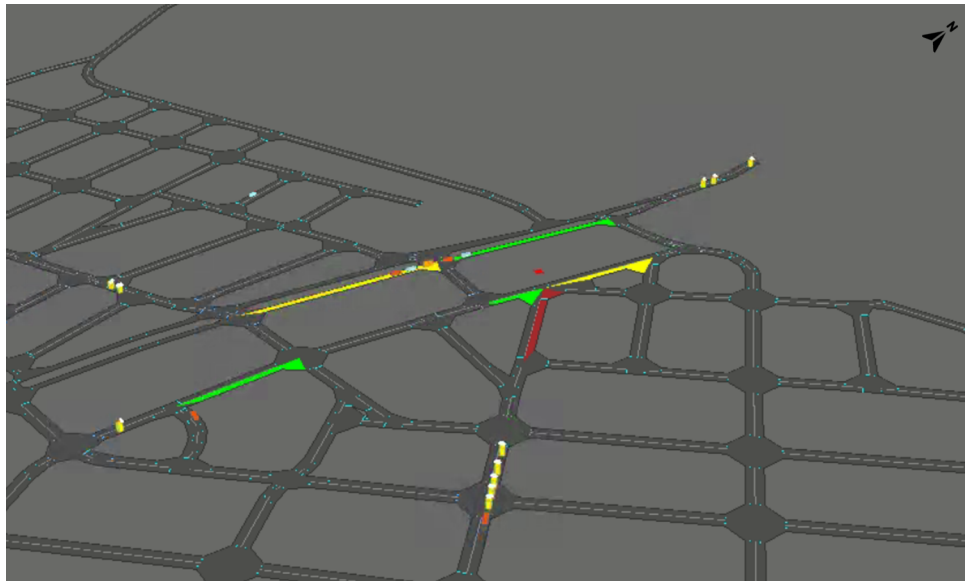


Figura 3.18: Representación densidad en los arcos mixtos respecto a peatones.

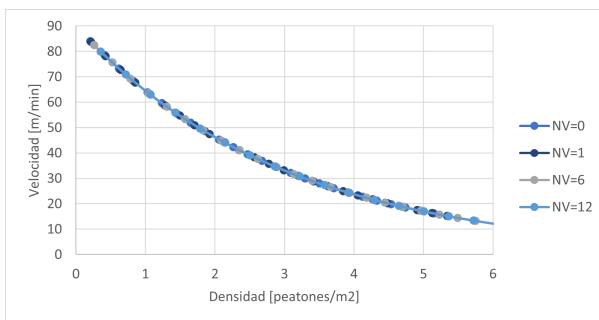


Figura 3.19: Velocidad con respecto a la densidad de los peatones según número de vehículos.

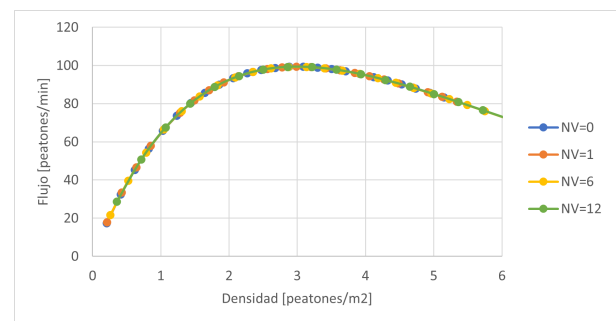


Figura 3.20: Flujo con respecto a la densidad de los peatones según número de vehículos.

Capítulo 4

Aplicación de la metodología

El presente capítulo sintetiza los escenarios modelados, y se presenta las estrategias de evacuación utilizadas, los resultados numéricos de escenarios y estrategias, así como el impacto a nivel de indicadores basados en tiempos de evacuación del sistema.

4.1. Escenarios y Estrategias

4.1.1. Escenarios

En esta sección se sintetiza los detalles de modelamiento y codificación utilizados para representar los comportamientos de la red, la cual debe ser capaz de soportar cambios en los parámetros y estructura del caso de estudio. Para efectos de esta tesis, se analiza como primer escenario el Caso Base, el cual cuenta con una población de 13.300 aproximadamente, donde el 75 % se moviliza en vehículo y el 25 % a pie. Con el objeto de realizar análisis a casos más extremos, se proponen los siguientes escenarios:

1. Realizar un análisis del Caso Base para distintas ventanas de tiempo destinadas al inicio de evacuación de los individuos, es decir, permitir que la generación de viajes se efectúe solo en cierto intervalo de tiempo. Las ventanas de tiempo se abren al comienzo de la simulación ($t_o = 0$ hrs.) hasta la 6 horas, 5 horas, 4 horas y el caso más delicado, 3 horas. La razón por la cual se proponen estos intervalos es para analizar la posibilidad de entregar un intervalo de tiempo donde no existan mayores problemas en la evacuación (6 horas) y reducirlo paulatinamente hasta llegar a presenciar conflictos complejos, difíciles de simular con la herramienta desarrollada.
2. Para modelar potenciales aumentos de la demanda, se pondera la población total por un 1.25, 1.50 y 1.75. Si bien, algunos de estos casos podrían carecer de realismo, el objeto de estos análisis es evaluar la capacidad del simulador y mostrar el comportamiento de este tipo de escenario para que sea llevado a cabo en casos de estudios semejantes.
3. Cambios en la distribución de modos de transporte, manteniendo la población total; se indaga en las diferencias entre una evacuación donde prácticamente toda la población realiza su viaje en vehículo, hasta el caso contrario, donde toda la población evacua a pie. Se proponen los siguientes escenarios: 10 %, 25 %, 40 %, 60 %, 85 % y 95 % de

vehículos.

Los escenarios descritos previamente dan como resultado un total de 40 escenarios, los cuales serán simulados para 30 semillas distintas con el fin de obtener resultados estadísticamente confiables. En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de los escenarios descritos

Tabla 4.1: Escenarios considerados en los experimentos computacionales.

Escenario	Población	Proporción vehículos
CB	13.300	75 %V - 25 %P
X1.25	16.625	75 %V - 25 %P
X1.50	19.950	75 %V - 25 %P
X1.75	23.275	75 %V - 25 %P
10 %V	13.300	10 %V - 90 %P
25 %V	13.300	25 %V - 75 %P
40 %V	13.300	40 %V - 60 %P
60 %V	13.300	60 %V - 40 %P
85 %V	13.300	85 %V - 15 %P
95 %V	13.300	95 %V - 5 %P

4.1.2. Estrategias

Si bien, el foco de la tesis se centra en la codificación y representación del comportamiento de los vehículos y peatones a través de PARAMICS y su API, este trabajo también pretende entregar lineamientos para la investigación en curso, con el foco en mejorar los tiempos de evacuación y mejorar los protocolos de evacuación en general. Por esta razón, se proponen las siguientes dos estrategias:

1. Como se observa en la Fig. 3.6, Alves et al. (2019) no sólo propone como zona segura la considerada en el caso base, sino también el Estadio de la ciudad y una pequeña área poblada al costado oriente de la ciudad. A pesar de que estas zonas podrían no ser suficientes en capacidad, si pueden funcionar como destinos temporales. Por lo tanto, la primera estrategia consiste en aumentar de uno a tres refugios, es decir, aumentar a tres los destinos para los evacuados.

Para llevar a cabo este procedimiento, se reconstruye la matriz de origen y destino de vehículos, destinando el 50 % hacia el refugio 1 (aeropuerto), 25 % hacia el refugio 2 (estadio) y 25 % hacia el refugio 3 (zona poblada); no obstante, para aquellas zonas que tengan conexión directa con el aeropuerto, se mantendrá el 100 % de evacuados a dicho destino. Con el fin de esquematizar la demanda por refugios, se realiza una zonificación a través de Qgis (Fig. 4.1), donde aquellas zonas demarcadas por amarillo son aquellas que reparten sus viajes a distintos destinos, mientras que las de color verde son aquellas que envían todos sus evacuados al aeropuerto y por último, las de color azul son los refugios designados.

Con respecto a la codificación de la red, es necesario definir 29 rutas fijas adicionales hacia los nuevos destinos para los peatones. Además, con respecto a la evacuación mixta es necesario definir nuevas zonas de aglomeración entorno a los refugios 2 y 3, con el fin de definir vectores mixtos adicionales al sistema (Fig. 4.2).

2. De extremo a extremo, Chañaral puede presentar recorridos directos de hasta 3.5 kilómetros, se espera que tanto vehículos como peatones sean capaces de recorrer esta distancia. No obstante, la existencia de individuos con movilidad reducida, condiciones climáticas y desorden en la generación de viajes pueden requerir tácticas para facilitar la evacuación, es por esto que la segunda estrategia sugiere disponer de Vehículos Exclusivos para la evacuación. Se proponen 4 nuevos paraderos que funcionan como puntos de recogida para personas; por lo tanto, se crean 4 nuevas rutas fijas, que serán empleadas por un nuevo bus de capacidad de 40 personas. Paralelo a ello, se crean 27 rutas fijas que permitirán a las personas llegar desde sus respectivas zonas a los puntos de partida de los buses de evacuación (Fig. 4.3). Notar que sólo se destinará el 50 % de los peatones hacia los buses de evacuación, no obstante, el objetivo de esta estrategia es exclusivamente para auxiliar a aquellos que vivan en la zona más alejada del refugio 1, es decir, aquellos que podrían presentar mayores problemas en el transcurso de su evacuación.

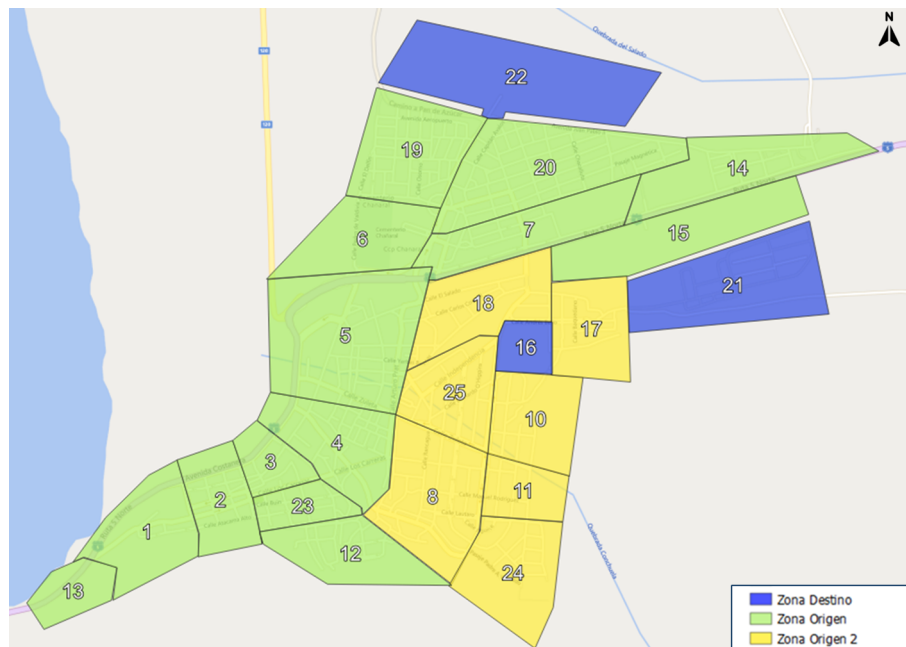


Figura 4.1: Zonificación Caso de Estudio Chañaral

4.2. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al Caso de Estudio, donde el foco es analizar el comportamiento de la evacuación y los tiempos de viaje obtenidos tanto para peatones como para vehículos. Se desarrollan los escenarios propuestos así como el impacto de las estrategias propuestas en tales escenarios. Además, sólo para el “Caso Base” se realiza el análisis para todas las ventanas de tiempo (6, 5, 4, 3 horas), ya que los comportamientos apreciados en cada una de ellas no varía al cambiar los escenarios e implementar estrategias. Por lo tanto, para el resto de instancias se examina sólo el caso 4 horas.

Debido a que se reportan ciertas diferencias entre el número de vehículos total que inician y

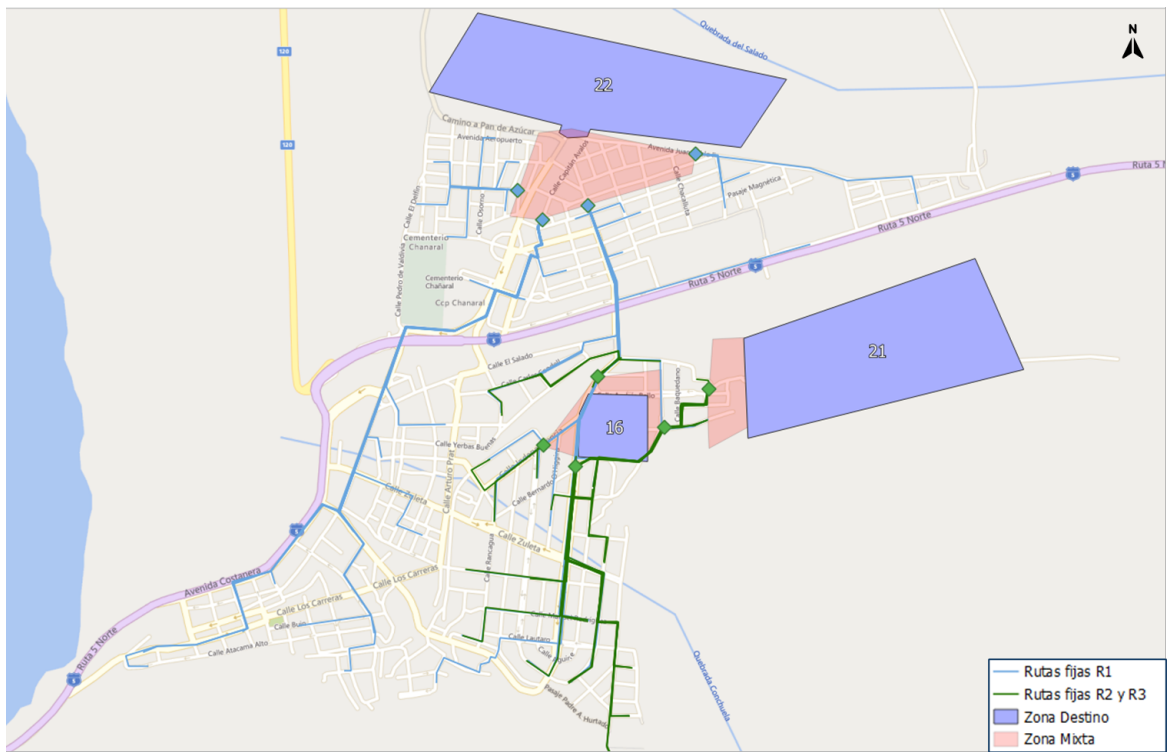


Figura 4.2: Zonas mixtas entorno a cada refugio y nuevas rutas fijas evacuar peatones

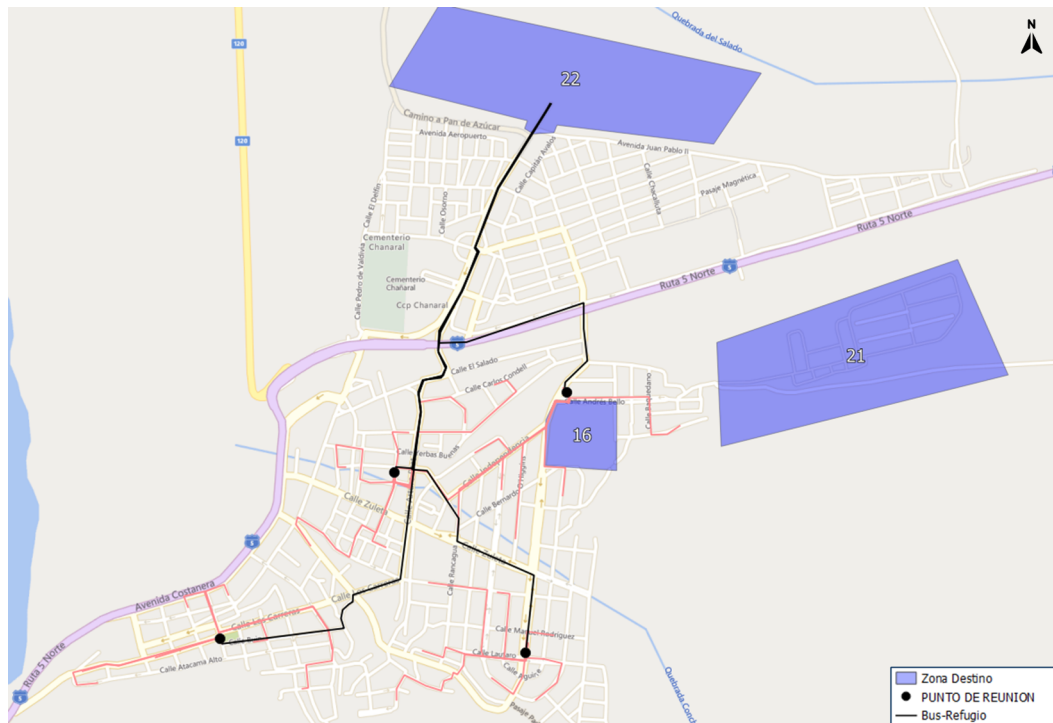


Figura 4.3: Puntos de encuentro y rutas para buses de evacuación

terminan su viaje en las simulaciones, se implementa un breve algoritmo que elimina vehículos que se encuentren detenidos por más de la mitad del tiempo de la ventana de generación de viaje, es decir, para el caso de análisis (4 horas), los vehículos que se encuentren detenidos

por 2 horas serán eliminados. Esta estrategia correctiva se implementa para mitigar, junto a los bloqueos de algunos virajes, aglomeraciones que no tienen desenlace. De forma paralela, la diferencia de número total de peatones entre escenarios se explica por la imposibilidad de generación de buses (representando personas) cuando los arcos se encuentran colapsados.

A modo de aclaración, la generación de viajes en Paramics para los vehículos y los peatones es levemente distinto, donde para los peatones es posible entregar un número exacto de evacuados para un determinado intervalo de tiempo, sin embargo, la generación para los vehículos se hace en relación a la ventana total de simulación, por lo tanto, se entiende que para las últimas horas de simulación el porcentaje de peatones evacuados ya sea el 100% mientras que para los vehículos aún no.

4.2.1. Escenario: Caso Base

El Caso Base consta de aproximadamente 13.300 personas, donde el 75% evacua en vehículo (en promedio 3 personas por vehículo) y 25% evacua en pelotones a pie (10 personas por pelotón). El análisis se centra en el comportamiento de la evacuación y los tiempos de viajes promedio tanto para el caso en que no hay estrategias como para la implementación de más refugios y buses para la evacuación.

4.2.1.1. Comportamiento de la evacuación

Debido a que la elección de 6 horas se debió a contar con un caso en que la simulación se llevara a cabo sin mayor problema, no existe gran diferencia entre las llegadas para cada una de las estrategias aplicadas, tal como se aprecia en las Figuras 4.4 y 4.5. También, en términos de porcentaje, la Figura 4.6 muestra las llegadas a los destinos cada media hora. Si bien, los vehículos muestran una tendencia de llegada más rápida, esto se puede relacionar con la velocidad de los vehículos, la cual es mayor que la de los peatones.

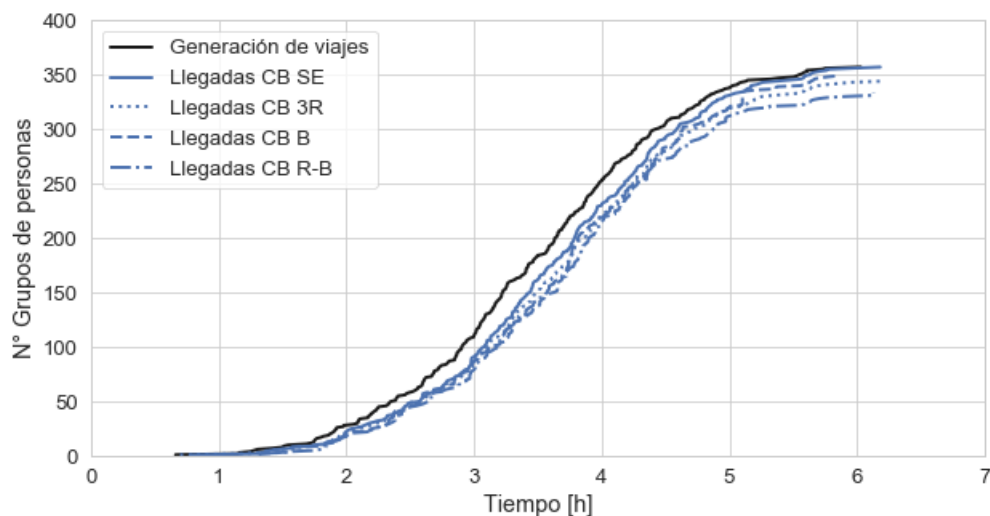


Figura 4.4: Generación de viajes Grupos de personas durante 6 horas Caso Base.

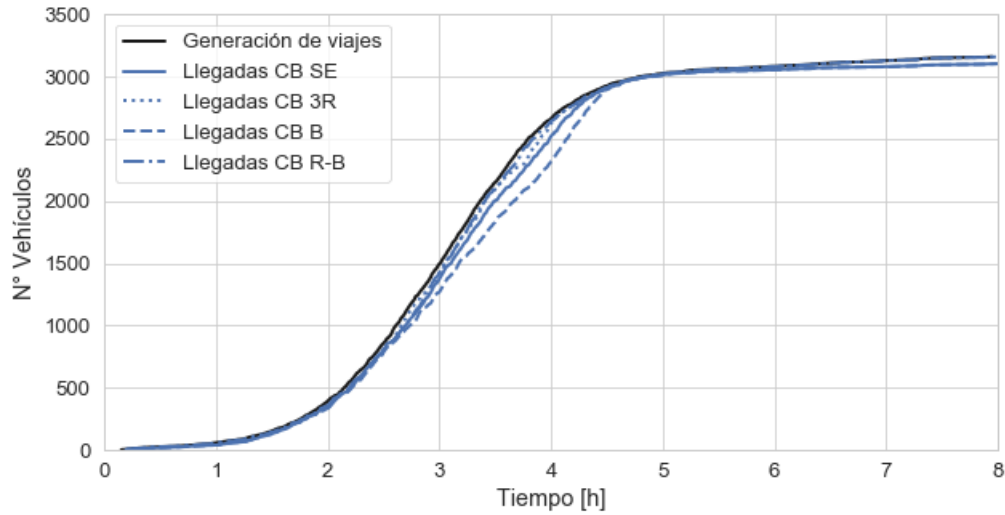


Figura 4.5: Generación de viajes Vehículos durante 6 horas Caso Base.

Figura 4.6: Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 6 horas).

Modo Tpte.	Estrategia	0.5H	1H	1.5H	2H	2.5H	3H	3.5H	4H	4.5H	5H	5.5H	6H	6.5H	7H
Peatones	Sin estrategia	0%	0%	2%	6%	14%	27%	44%	61%	81%	93%	98%	100%	100%	100%
	3 Refugios	0%	0%	2%	6%	14%	28%	45%	66%	82%	93%	98%	100%	100%	100%
	Buses	0%	0%	1%	5%	13%	26%	41%	61%	81%	93%	98%	100%	100%	100%
	3 Refugios-Buses	0%	0%	1%	5%	13%	27%	44%	65%	83%	93%	98%	100%	100%	100%
Vehículos	Sin estrategia	0%	1%	4%	11%	25%	42%	60%	77%	93%	97%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios	0%	1%	4%	12%	25%	44%	65%	82%	93%	96%	97%	98%	98%	99%
	Buses	0%	1%	4%	11%	25%	42%	61%	79%	93%	97%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios-Buses	0%	1%	4%	12%	26%	44%	65%	83%	93%	96%	97%	98%	98%	99%

A medida que disminuye el intervalo para la generación de viajes es posible apreciar impactos claros de las estrategias durante la evacuación. A partir de las 5 horas, para el caso de los peatones la estrategia que mejor aplica es la aumento de número de refugios (Fig. 4.7) y en el caso de los vehículos corresponde a la estrategia de buses y la combinada de refugios y buses (Fig. 4.8). Respecto de los porcentajes de evacuados, se aprecia que los peatones tienen una tendencia de evacuación más lenta cuando se integra la estrategia de buses. Por el contrario, para los vehículos esta estrategia es la que permite una evacuación más rápida (Fig. 4.9).

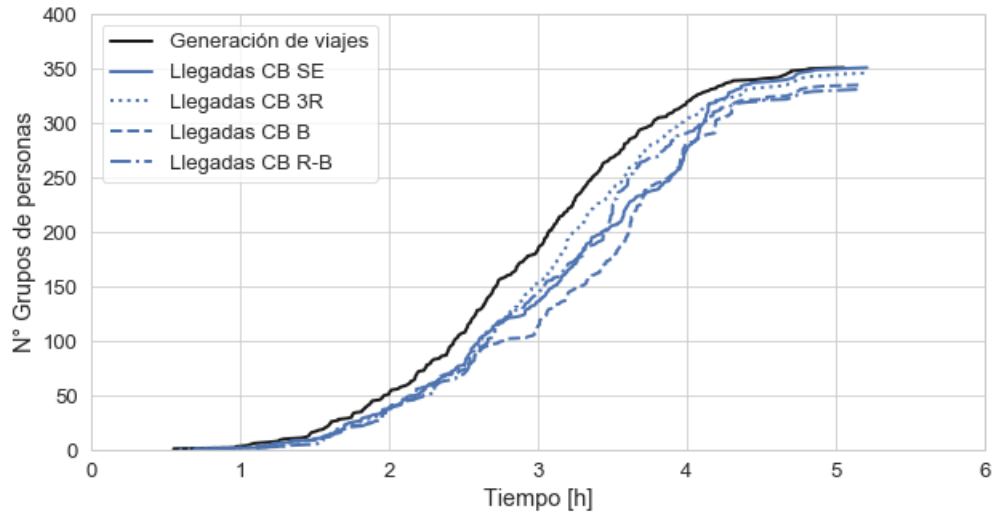


Figura 4.7: Generación de viajes Grupos de personas durante 5 horas Caso Base.

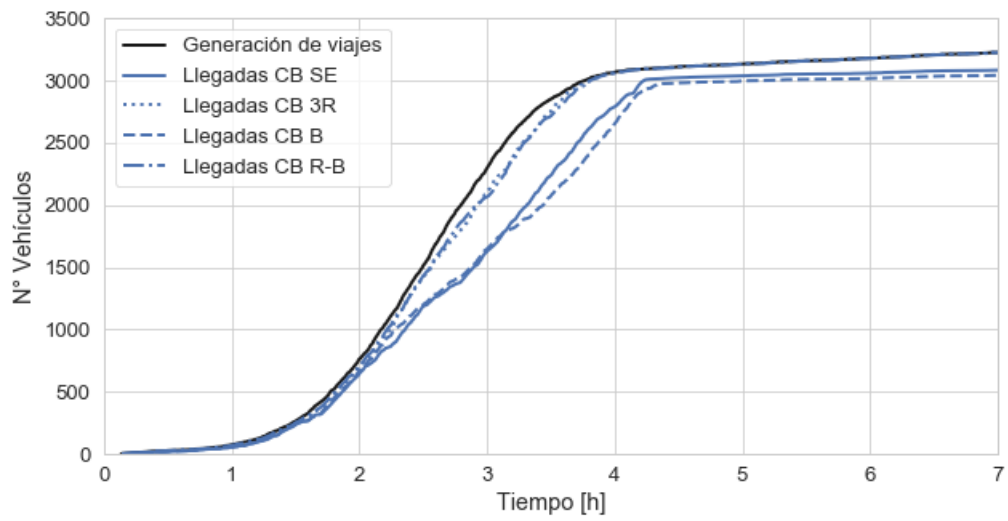


Figura 4.8: Generación de viajes Vehículos durante 5 horas Caso Base.

Figura 4.9: Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 5 horas).

Modo Tpte.	Estrategia	0.5H	1H	1.5H	2H	2.5H	3H	3.5H	4H	4.5H	5H	5.5H	6H	6.5H	7H
Peatones	Sin estrategia	0%	1%	3%	11%	26%	43%	60%	82%	96%	99%	100%	100%	100%	100%
	3 Refugios	0%	1%	3%	11%	26%	46%	69%	88%	97%	100%	100%	100%	100%	100%
	Buses	0%	1%	3%	10%	24%	40%	61%	85%	97%	100%	100%	100%	100%	100%
	3 Refugios-Buses	0%	1%	3%	10%	25%	43%	67%	89%	97%	100%	100%	100%	100%	100%
Vehículos	Sin estrategia	0%	2%	8%	21%	38%	56%	73%	88%	97%	98%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios	0%	2%	8%	21%	41%	63%	83%	94%	96%	96%	97%	98%	98%	99%
	Buses	0%	2%	8%	21%	39%	58%	76%	93%	97%	98%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios-Buses	0%	2%	8%	21%	42%	64%	84%	94%	96%	96%	97%	98%	98%	99%

Con respecto al intervalo de 4 horas, el comportamiento para los peatones es muy similar a los casos previos (Fig. 4.10), en cambio, el comportamiento para vehículos acentúa más las diferencias para cada estrategia (Fig. 4.11). Además, en casos anteriores se observaba que 1 hora antes de alcanzar el tiempo final de la generación de viajes ya se había logrado completar la evacuación para aproximadamente un 90 % del total de viajes; no obstante, para este caso particular, este 90 % se estaría logrando en la hora que dejan de generarse viajes (Fig. 4.12).

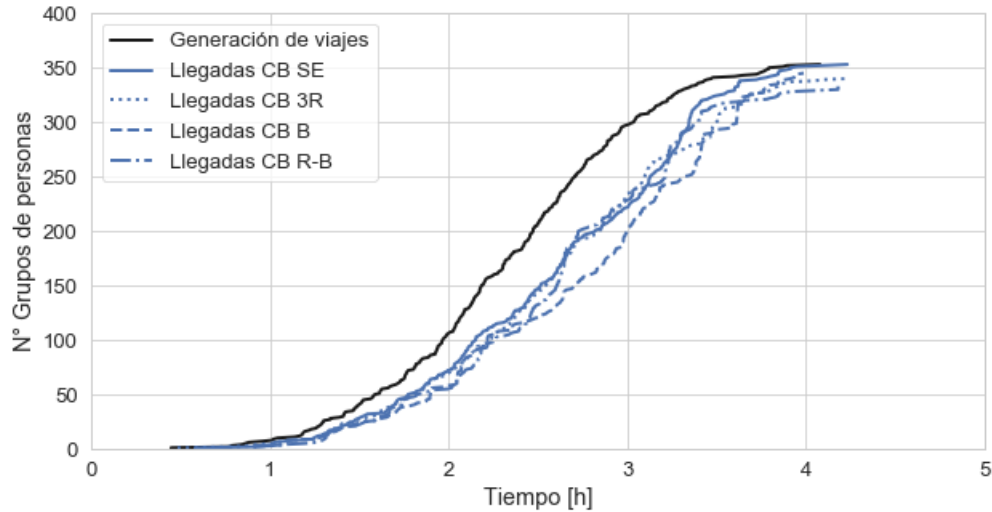


Figura 4.10: Generación de viajes Grupos de personas durante 4 horas Caso Base.

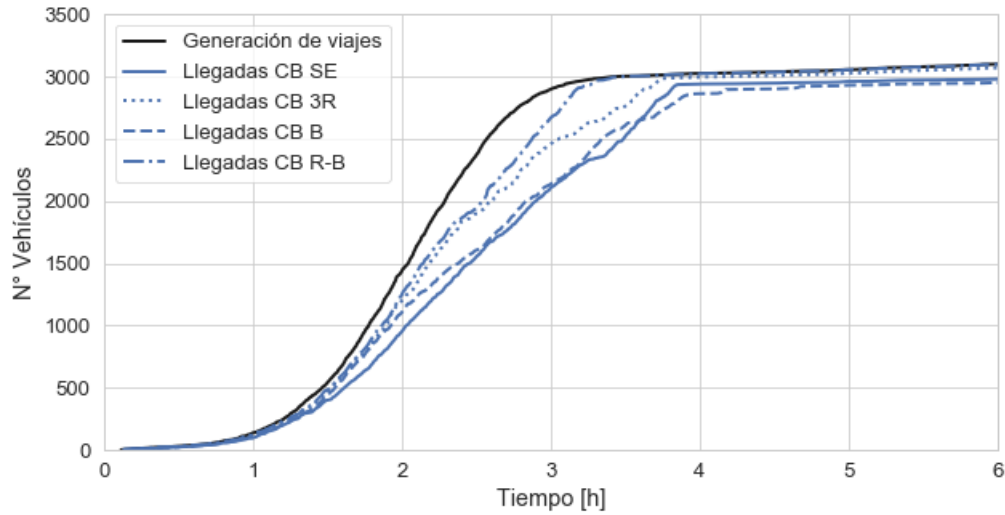


Figura 4.11: Generación de viajes Vehículos durante 4 horas Caso Base.

Figura 4.12: Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 4 horas).

Modo Tpte.	Estrategia	0.5H	1H	1.5H	2H	2.5H	3H	3.5H	4H	4.5H	5H	5.5H	6H	6.5H	7H
Peatones	Sin estrategia	0%	1%	8%	23%	42%	64%	88%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	3 Refugios	0%	1%	8%	24%	47%	71%	93%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Buses	0%	1%	7%	21%	38%	59%	87%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	3 Refugios-Buses	0%	1%	7%	22%	43%	68%	94%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Vehículos	Sin estrategia	0%	4%	15%	33%	51%	69%	83%	96%	97%	98%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios	1%	4%	16%	37%	60%	79%	93%	95%	96%	96%	97%	98%	98%	99%
	Buses	0%	4%	15%	35%	53%	71%	87%	97%	97%	98%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios-Buses	1%	4%	16%	38%	61%	82%	94%	95%	96%	96%	97%	98%	98%	99%

Para ciertos escenarios el simulador podría no funcionar. Por lo tanto, con el fin de definir una cota inferior que sea referente para entender cuando el simulador está llegando a su límite se define 3 horas como el último intervalo de tiempo para la generación de viajes. Se percibe mayor notoriedad en la eficiencia para la estrategia de los 3 refugios para el caso de los peatones (Fig. 4.15); además, las estrategias que incluyen los buses nuevamente son las más competentes para el caso de los vehículos (Fig. 4.15). Analizando detenidamente los porcentajes de evacuados, se observa que los peatones llegan antes que los vehículos a sus destinos asignados (pasado el 50%). Esto se puede justificar dada la prioridad de las intersecciones más relevantes, las cuales benefician a los peatones. También, se observa en este y algunos casos previos que en la primera etapa de evacuación (primeras horas) a medida que hay menos congestión los vehículos se ven mayormente influenciados en la eficiencia temprana de evacuación, asimismo, los peatones también se ven influenciados, pero en menor grado (Fig. 4.16). Lo anterior puede relacionar la congestión con una menor eficacia para la evacuación dinámica de los vehículos, donde las decisiones están asociadas al propio individuo y no sigue reglas o planes de evacuación como lo es para los peatones.

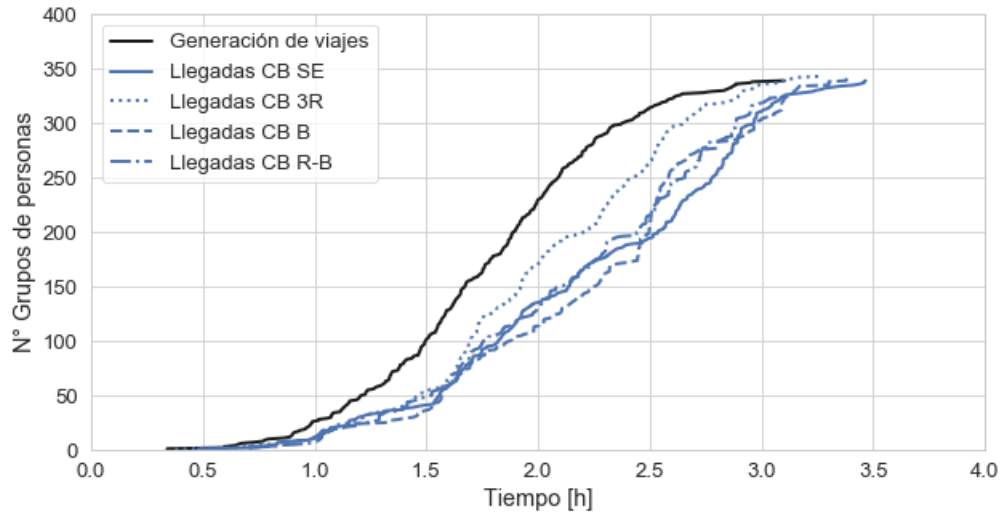


Figura 4.13: Generación de viajes Grupos de personas durante 3 horas Caso Base.

Figura 4.14: Llegadas de los evacuados a los refugios Caso Base.

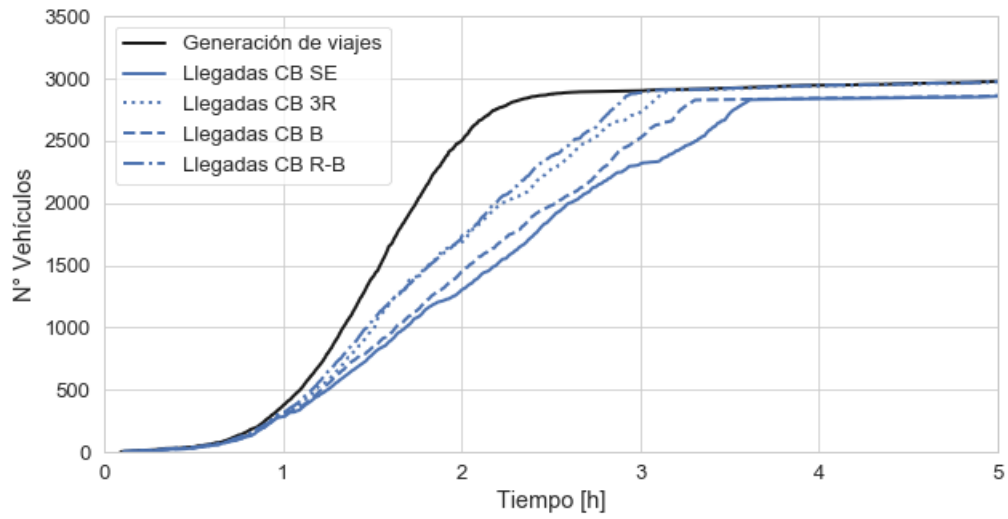


Figura 4.15: Generación de viajes Vehículos durante 3 horas Caso Base.

Figura 4.16: Porcentaje de evacuados cada media hora (Caso Base, 3 horas).

Modo Tpte.	Estrategia	0.5H	1H	1.5H	2H	2.5H	3H	3.5H	4H	4.5H	5H	5.5H	6H	6.5H	7H
Peatones	Sin estrategia	0%	4%	17%	39%	63%	88%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	3 Refugios	0%	4%	19%	47%	75%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Buses	0%	3%	16%	37%	60%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	3 Refugios-Buses	0%	4%	17%	42%	66%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Vehículos	Sin estrategia	1%	10%	28%	47%	64%	78%	91%	97%	97%	98%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios	1%	10%	32%	55%	74%	90%	95%	95%	96%	96%	97%	98%	98%	99%
	Buses	1%	10%	29%	48%	66%	82%	94%	97%	97%	98%	98%	99%	99%	99%
	3 Refugios-Buses	1%	10%	33%	56%	76%	91%	94%	95%	96%	96%	97%	98%	98%	99%

4.2.1.2. Tiempos de viaje promedio

Comparativamente el intervalo de 6 horas corresponde al de menores tiempos de viajes promedio para todos los modos de transporte, donde para el caso sin estrategia los peatones están por debajo de los 12 minutos y los vehículos por debajo de los 10 minutos. Gracias a la implementación de la estrategia de aumento de refugios los tiempos de viaje disminuyen aún más, con tiempos de viaje de los vehículos disminuyendo a casi a la mitad de su valor. No obstante, la implementación de la estrategia de buses para la evacuación eleva el tiempo de viaje promedio total. Específicamente, este valor se ve fuertemente influenciado por los tiempos de espera en los buses de evacuación (para alcanzar la capacidad). Incluso, los valores para aquellos que se trasladan en vehículos o solo a pie disminuyen con respecto al caso sin estrategia (Fig. 4.2). Además, se entregan los intervalos de confianza (95 % de confiabilidad) asociados a los tiempos de viaje mencionados con respecto a las 30 semillas utilizadas para las simulaciones. Los valores obtenidos muestran intervalos de confianza reducidos con respecto a la magnitud de los tiempos de viaje, entregando confiabilidad estadística respecto de los resultados y conclusiones que se obtengan a partir de ellos (Fig. 4.3).

Tabla 4.2: Tiempo de viaje (Caso Base, 6 horas).

Estrategia	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Sin estrategia	569	522	694	-
3 Refugios	317	234	546	-
Buses	945	455	560	1.678
3 Ref. - Buses	684	219	461	1.339

Tabla 4.3: Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 6 horas).

Estrategia	IC TV_{total} [s]	IC $TV_{Veh.}$ [s]	IC $TV_{Peat.}$ [s]	IC $TV_{Peat-Buses}$ [s]
Sin estrategia	10,3	12,1	7,3	-
3 Refugios	6,2	7,8	2,3	-
Buses	14,3	13,2	5,7	23,4
3 Ref. - Buses	10,3	8,2	4,0	18,4

Para el caso de 5 horas los tiempos de viaje promedio aumentan considerablemente con respecto al caso anterior, sin embargo, con este umbral de ventanas de evacuación se aprecia una disminución del más del 50 % del tiempo de viaje promedio total para la estrategia de aumento de refugios. Con respecto a las estrategias que incluyen buses, se presenta la misma tendencia de cifras que en el caso anterior, específicamente con tiempos en vehículos disminuyendo a casi un 70 % y el de peatones a casi el 50 % con respecto al caso sin estrategia (Fig. 4.4). Los intervalos de confianza aumentan levemente su valor, aunque se relaciona con el aumento de la magnitud de los tiempos de viaje promedio (Fig. 4.5).

Tabla 4.4: Tiempo de viaje (Caso Base, 5 horas).

Estrategia	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Sin estrategia	1.009	1.014	996	-
3 Refugios	457	405	602	-
Buses	1.288	805	679	2.097
3 Ref. - Buses	814	349	495	1.505

Tabla 4.5: Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 5 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
Sin estrategia	17,3	19,5	24,8	-
3 Refugios	11,0	12,7	7,7	-
Buses	21,9	19,4	10,1	39,3
3 Ref. - Buses	21,9	18,4	7,1	33,4

Con respecto al intervalo de 4 horas, nuevamente se presenta aumento del valor de los tiempos de viaje promedio, donde las cifras mantienen un comportamiento similar a los casos previos (Fig. 4.6). El tiempo total promedio para todos los casos aumenta en un 40 % con excepción del aumento de refugios el cual aumenta casi en un 70 %. Los valores de los intervalos de confianza también cambian de forma esperada (Fig. 4.7).

Tabla 4.6: Tiempo de viaje (Caso Base, 4 horas).

Estrategia	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Sin estrategia	1.406	1.512	1.128	-
3 Refugios	771	754	816	-
Buses	1.816	1.307	923	2.783
3 Ref. - Buses	1.132	632	634	1.932

Tabla 4.7: Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 4 horas).

Estrategia	<i>IC TV_{total}</i> [s]	<i>IC TV_{Veh.}</i> [s]	<i>IC TV_{Peat.}</i> [s]	<i>IC TV_{Peat-Buses}</i> [s]
Sin estrategia	15,7	21,9	17,1	-
3 Refugios	15,5	17,1	13,4	-
Buses	27,5	17,0	20,7	62,4
3 Ref. - Buses	21,8	18,3	12,0	42,0

Finalmente, para el intervalo de 3 horas se aprecian los tiempos de viaje promedio más altos, con un total que sobrepasa la media hora de viaje, siendo los vehículos los más afectados (Fig. 4.8). La estrategia de aumento de refugio permite disminuir y equiparar los tiempos de viajes para vehículos y peatones. Esta vez la estrategia de buses no favorece en gran medida a los vehículos como si lo hace en los casos con intervalos más prolongados. Respecto a los peatones que utilizan los buses de emergencia, su tiempo de viaje promedio bordea la hora completa. Adicionalmente, los intervalos de confianza entregan cifras con tendencias similares a los casos anteriores (Fig. 4.9).

Tabla 4.8: Tiempo de viaje (Caso Base, 3 horas).

Estrategia	<i>TV_{total}</i> [s]	<i>TV_{Veh.}</i> [s]	<i>TV_{Peat.}</i> [s]	<i>TV_{Peat-Buses}</i> [s]
Sin estrategia	1.964	2.088	1.646	-
3 Refugios	1.139	1.178	1.032	-
Buses	2.321	1.854	1.160	3.361
3 Ref. - Buses	1.727	1.097	845	2.858

Tabla 4.9: Intervalos de confianza para Tiempos de viaje [s] (Caso Base, 3 horas).

Estrategia	<i>IC TV_{total}</i> [s]	<i>IC TV_{Veh.}</i> [s]	<i>IC TV_{Peat.}</i> [s]	<i>IC TV_{Peat-Buses}</i> [s]
Sin estrategia	26,1	26,2	36,1	-
3 Refugios	14,0	15,6	20,2	-
Buses	28,5	22,1	24,2	59,3
3 Ref. - Buses	23,2	17,7	14,5	45,9

4.2.2. Escenarios: Aumento de población

Como se menciona en el capítulo anterior, uno de los enfoques para evaluar el alcance de la evacuación y sus comportamientos es el aumento de la población. En estos experimentos, se usaron incrementos de 25 %, 50 % y 75 % por sobre la población inicial para cálculo de indicadores y para el análisis del comportamiento de la población a lo largo de la evacuación para cada estrategia propuesta.

Inicialmente, se considera el caso en que no se implementa estrategia, es decir, un único destino y sin buses exclusivos para la evacuación. En el caso de los peatones (Fig. 4.17) se

aprecia que para el caso base la población no tiene mayor problema en llegar al destino durante el tiempo en que se efectúa la generación de viajes, sin embargo, aumentar la población comienza a mostrar grandes diferencias entre la generación y las llegadas, donde incluso, para el caso más crítico los últimos peatones llegarían una hora después del último peatón que salió de su origen. Para el caso de los vehículos (Fig. 4.18), las llegadas al refugio tienden a ser constantes. Esto en parte debido a que existe una única entrada, con lo cual la congestión persistente obliga a mantener un flujo controlado. En relación a los tiempos de viaje, se observa que para todos los modos de transporte, aumentar en un 25 %, 50 %, 75 % la población, no implica aumentar en la misma proporción los tiempos de viaje promedio. De hecho, estos se ven afectados considerablemente, donde incluso para un incremento del 75 %, los tiempos de viaje promedio aumentan a más del doble de su valor (Tabla 4.10). Los intervalos de confianza asociados tienen valores significativamente pequeños, lo cual permite confiar en los valores para los tiempos obtenidos (Tabla 4.11).

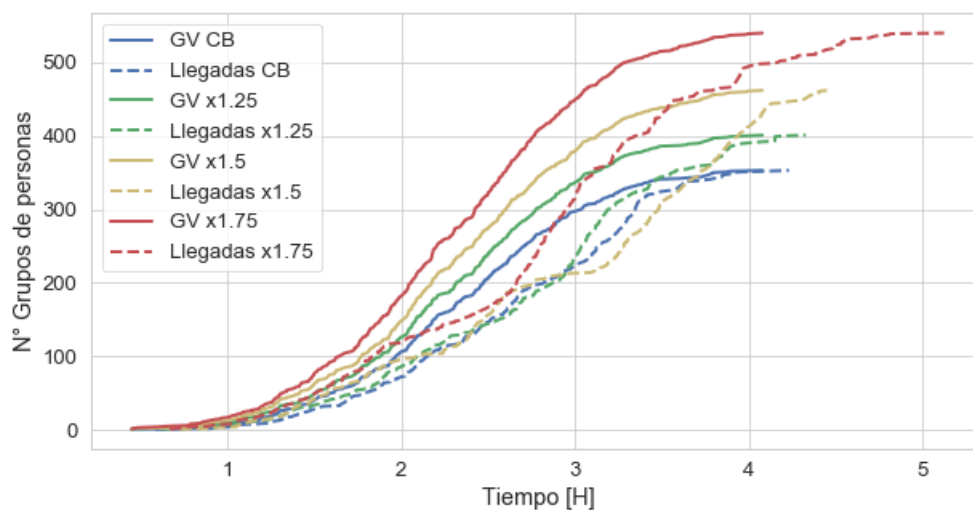


Figura 4.17: Generación de viajes de peatones sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas).

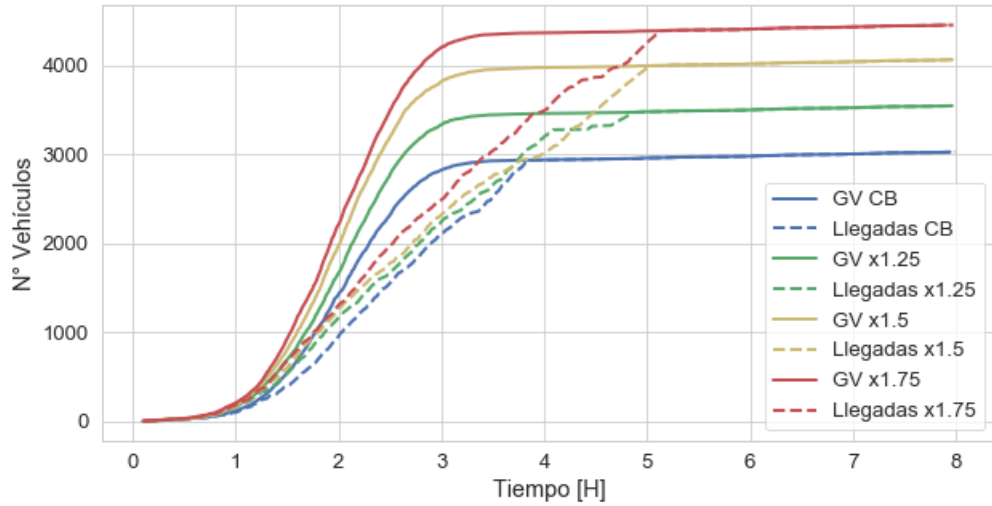


Figura 4.18: Generación de viajes de vehículos sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas)

Tabla 4.10: Tiempo de viaje sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	1.406	1.512	1.128	-
x1.25	2.074	2.202	1.732	-
x1.50	2.705	2.878	2.267	-
x1.75	3.219	3.403	2.760	-

Tabla 4.11: Intervalos de confianza sin estrategia implementada (Aumento de población, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	15,7	22,0	17,1	-
x1.25	27,2	27,2	47,7	-
x1.50	29,2	29,0	46,1	-
x1.75	36,2	34,0	60,1	-

La estrategia de aumento de refugios en conjunto con el incremento límite de la población (en el caso 75 %) no permitieron una configuración adecuada para realizar una correcta simulación. Lo que ocurrió fue un colapso de la red en ciertas zonas que no permitió la generación de personas desde sus puntos de partida y provocó la eliminación de una gran cantidad de vehículos. En consecuencia, los resultados para este caso no son del todo confiables; esta situación es clara de observar en la Fig. 4.19 y 4.20. Aún así, para el caso base se presenta una disminución de aproximadamente el 50 % en los tiempos de viaje promedio en ambos

modos de transporte, donde el beneficio mayor lo obtienen los vehículos motorizados. Para el caso del aumento del 25% y 50% de la población, también se presenta una disminución, aunque en menor proporción que la observada para el caso base (Tabla 4.12). Asimismo, se confirma la baja confiabilidad del escenario “75%” por tener un tiempo de viaje promedio menor al de los otros escenarios y tener un intervalo de confianza elevado (Tabla 4.13).

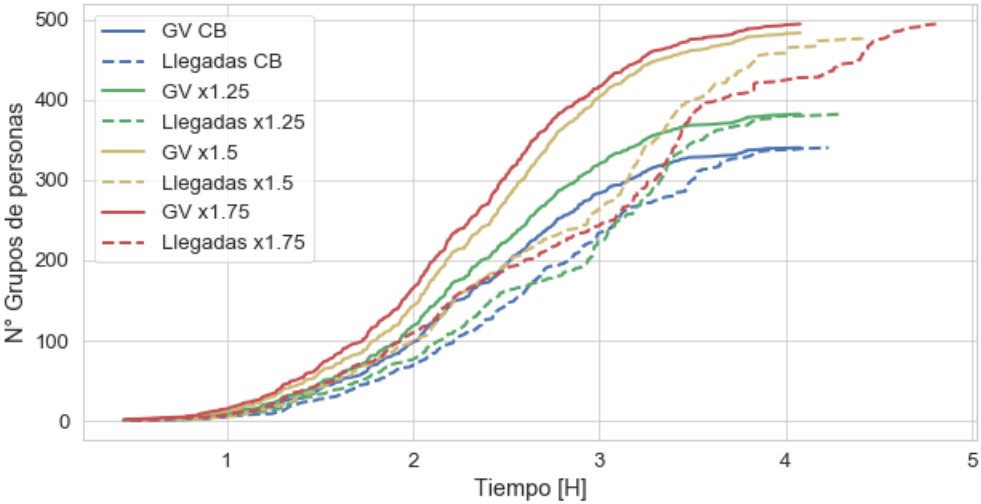


Figura 4.19: Generación de viajes de peatones 3 refugios (Aumento de población, 4 horas).

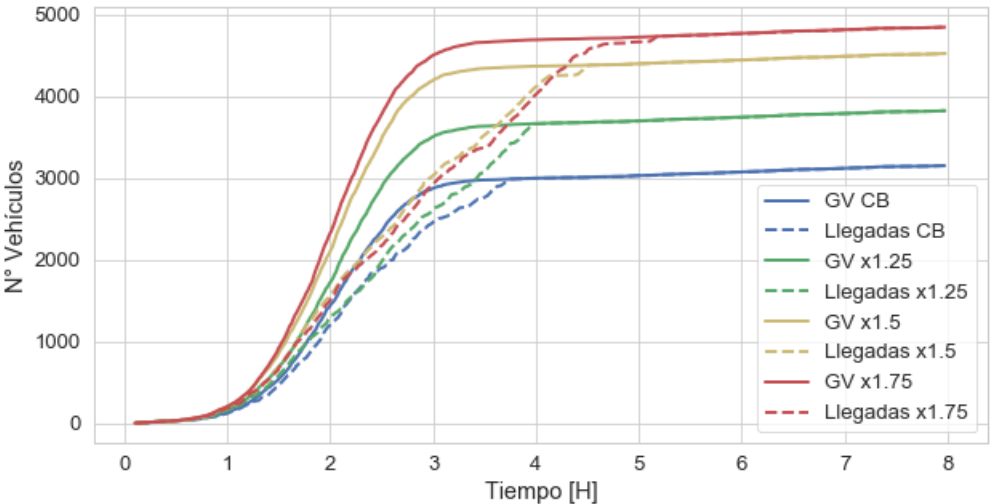


Figura 4.20: Generación de viajes de vehículos 3 refugios (Aumento de población, 4 horas)

Tabla 4.12: Tiempo de viaje 3 refugios (Aumento de población, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	771	754	816	-
x1.25	1.256	1.287	1.163	-
x1.50	1.758	1.834	1.542	-
x1.75	1.504	1.406	1.440	-

Tabla 4.13: Intervalos de confianza 3 refugios (Aumento de población, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	15,5	17,1	13,4	-
x1.25	12,0	12,6	21,4	-
x1.50	16,1	18,5	22,1	-
x1.75	105,2	115,5	93,7	-

Con respecto al comportamiento de la demanda para el caso de los buses de emergencia, los peatones muestran una mayor diferencia entre la generación de viajes y las llegadas a los refugios. Además, las llegadas de los peatones (en especial para el caso de 75 %) se prolongan hasta casi el final de la simulación, y los buses finales deben esperar hasta completar su capacidad total, pero no reciben muchos peatones dada la tendencia Weibull (Fig. 4.23). Por otra parte, los vehículos muestran armonía en su evacuación, donde durante casi toda la simulación, llegan a su destino de manera constante (Fig. 4.24). Los efectos de implementar esta estrategia no escapan de lo comentado en la sección anterior. De hecho, se genera una disminución de los tiempos de viaje promedio para las personas que se movilizan en vehículo y solo a pie, pero no para aquellos que se mueven a pie y bus. En el caso de pie y bus, dado que el aumento de tiempo es mayor que en los otros modos, el tiempo total observado de las simulaciones es mayor que aquel obtenido para el caso sin estrategia (Tabla 4.14). Los valores para los intervalos de confianza son suficientes para la confiabilidad de los resultados (Tabla 4.15).

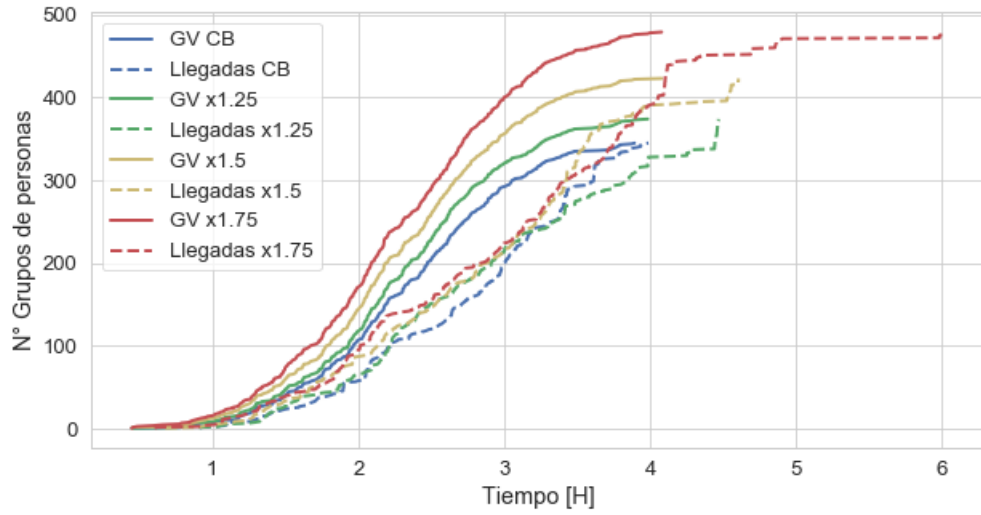


Figura 4.21: Generación de viajes de peatones buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas).

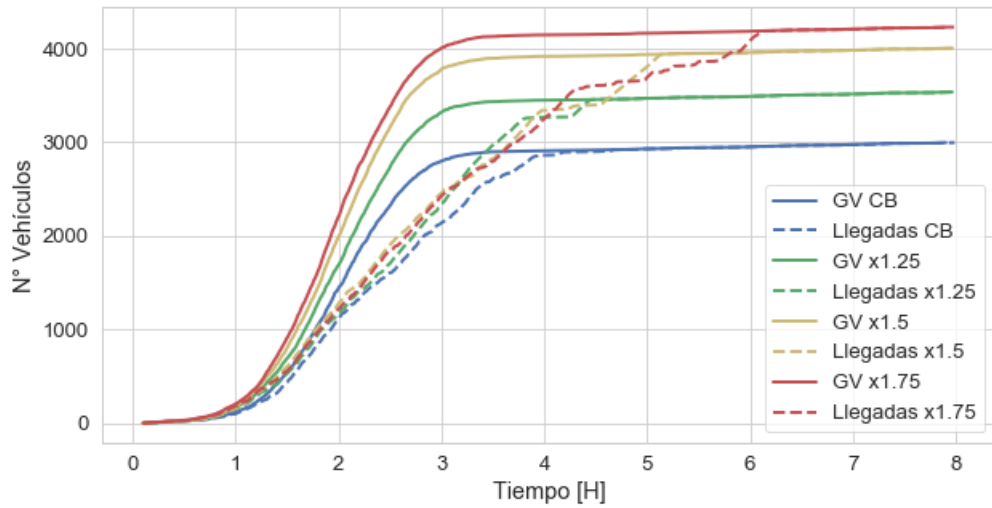


Figura 4.22: Generación de viajes de vehículos buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas)

Tabla 4.14: Tiempo de viaje buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	1.816	1.307	923	2.783
x1.25	2.537	1.995	1.226	3.774
x1.50	3.347	2.714	1.764	4.863
x1.75	3.834	3.190	2.044	5.511

Tabla 4.15: Intervalos de confianza buses de emergencia (Aumento de población, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	27,5	17,0	20,6	62,4
x1.25	31,9	25,9	31,3	77,3
x1.50	40,4	23,9	43,6	98,9
x1.75	46,6	27,9	35,4	96,1

Nuevamente se presentan complicaciones en la integración de la estrategia de 3 refugios en los casos de aumento de población. Es difícil identificar cuales casos generan los resultados más cercanos a la realidad. En el caso de los peatones (Fig. 4.23), es posible que no solo la configuración de la red y el colapso de la simulación sea el problema, sino también la ponderación que se realiza en la demanda de peatones dentro del API, la que al redondear algunos valores puede generar diferencias importantes, lo cual no ocurre para el caso de los vehículos dada la magnitud de estos niveles de demanda (Fig. 4.24). De todas maneras, los tiempos de viaje tienen un comportamiento similar al mencionado previamente, donde el tiempo de los peatones-bus influencia en el aumento del tiempo de viaje promedio total. Aún así, los tiempos de viaje para vehículos y peatones son incluso menores que los obtenidos del resto de las estrategias (Tabla 4.16). En relación a los intervalos de confianza, no presentan valores que escapen de los casos en que no se presentaron problemas. Sin embargo, para el modo peatón-bus en los casos de 50 % y 75 %, si se observa un aumento considerable 4.17).

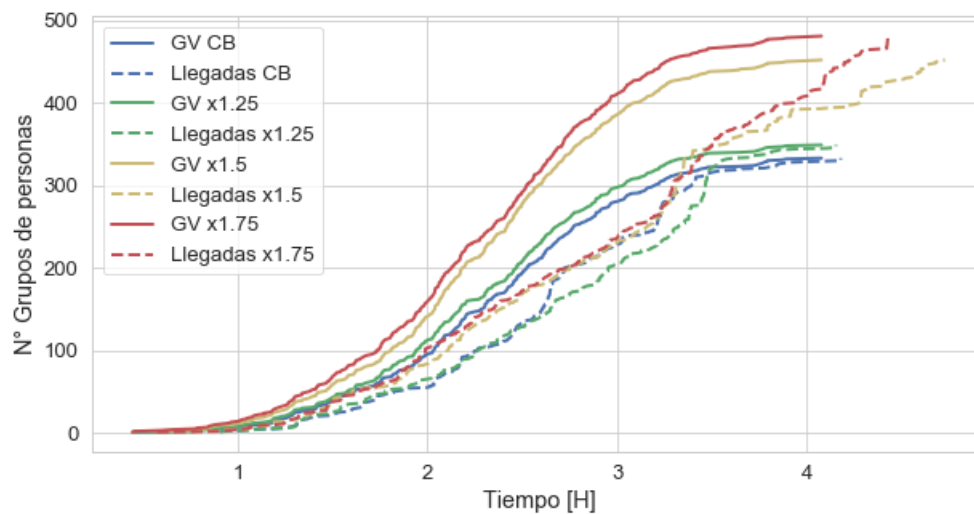


Figura 4.23: Generación de viajes de peatones 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas).

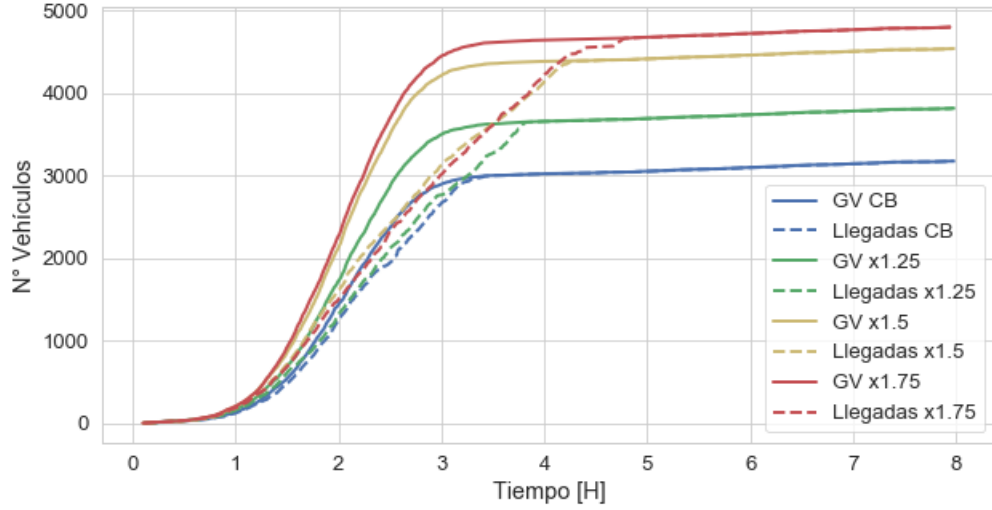


Figura 4.24: Generación de viajes de vehículos 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas)

Tabla 4.16: Tiempo de viaje 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	1.132	632	634	1.932
x1.25	1.734	1.121	845	2.925
x1.50	2.402	1.666	1.241	3.801
x1.75	2.893	2.133	1.536	4.418

Tabla 4.17: Intervalos de confianza 3 Refs. y Buses de emerg. (Aumento de población, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
Caso Base	21,8	18,3	12,0	41,9
x1.25	28,4	18,9	13,5	56,5
x1.50	44,8	19,3	30,8	106,8
x1.75	41,6	22,2	26,5	95,5

4.2.3. Escenarios: Cambios proporción modos de transporte

El análisis para el cambio de proporción de vehículos y peatones (manteniendo el total de la población) permite analizar los casos extremos en una evacuación donde todos lleven a cabo su evacuación en vehículo o a pie.

En el caso sin estrategia, los peatones aumentan su distanciamiento en tiempo entre generación y término de viaje a medida que aumenta su proporción. Además, se muestra una

tendencia uniforme en las llegadas a medida que el sistema pierde dependencia de vehículos (Fig. 4.25). Por otra parte, los vehículos tienen un comportamiento similar a los peatones con respecto a las proporciones; los casos 10 %V y 25 %V se observa que evacuan con mayor facilidad (Fig. 4.26). En relación a los tiempos de viaje promedio, para los peatones se observa cierta hegemonía en relación con los distintos casos. El mejor de ellos corresponde al 40 %V con un tiempo de 16,5 minutos en promedio, seguido del 25 %V con 17,3 minutos en promedio. Bajo la mirada de los vehículos, el mejor escenario corresponde al 10 %V con un tiempo de 6,9 minutos en promedio, seguido del 25 %V con 11,2 minutos en promedio. No obstante, las proporciones mayores son un tanto distintas, diferenciándose a lo menos en 5 minutos. Considerando ambos casos, el escenario de mayor conveniencia corresponde al 25 %V donde se alcanza 15,85 minutos en promedio (Tabla 4.18). Con respecto a los intervalos de confianza, el caso en que el porcentaje de peatones es mayor presenta un intervalo considerablemente menor al resto de los escenarios. Esto se atribuye a las rutas fijas asociadas a los peatones que no permiten tomar decisiones durante la evacuación. Por lo demás, se presentan intervalos aceptables para la confiabilidad de los resultados (Tabla 4.19).

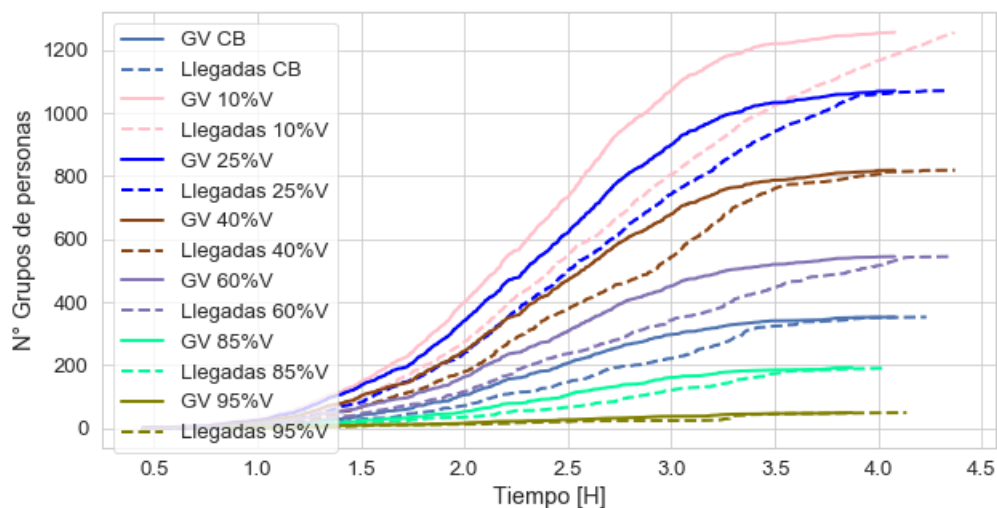


Figura 4.25: Generación de viajes de peatones sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas).

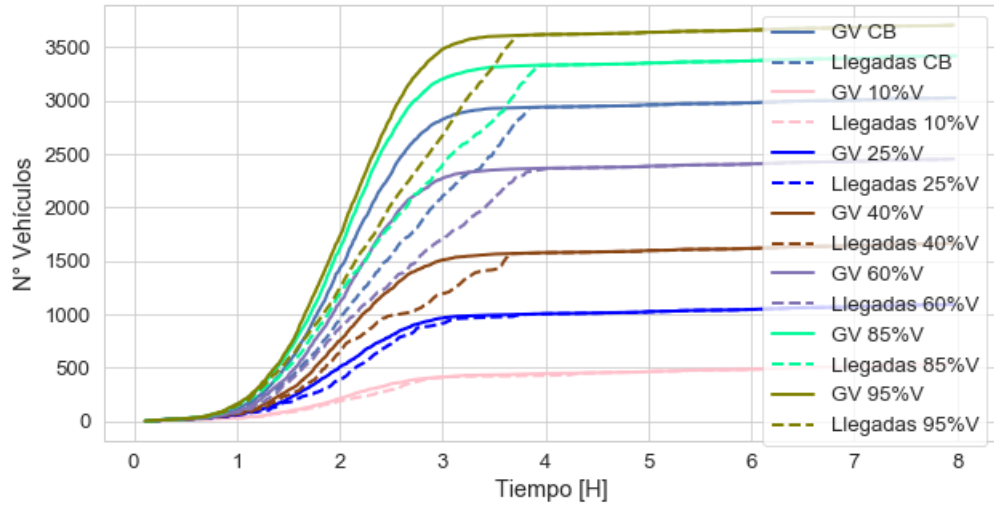


Figura 4.26: Generación de viajes de vehículos sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas)

Tabla 4.18: Tiempo de viaje sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	1.135	417	1.224	-
25V	951	670	1.039	-
40V	1.002	1.020	992	-
60V	1.273	1.307	1.226	-
75V	1.406	1.512	1.128	-
85V	1.445	1.491	1.201	-
95V	1.308	1.318	1.081	-

Tabla 4.19: Intervalos de confianza sin estrategia implementada (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Estrategia	IC TV_{total} [s]	IC $TV_{Veh.}$ [s]	IC $TV_{Peat.}$ [s]	IC $TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	6,0	16,8	5,9	-
25V	22,9	34,3	21,0	-
40V	26,0	28,0	26,8	-
60V	23,6	26,5	27,3	-
75V	15,7	22,0	17,1	-
85V	21,5	24,1	33,6	-
95V	13,7	14,0	21,1	-

La implementación del aumento de refugios no genera los problemas observados en los

casos de aumento de población. Además, las llegadas de los evacuados no se escapan de su respectiva generación (Fig. 4.27 y 4.28). Los tiempos de viaje promedio disminuyen en todos los nuevos escenarios tanto para peatones como vehículos, respecto del caso base (75 %V). A pesar de que la diferencia entre los valores para cada caso no son de gran magnitud, aquel que presenta un tiempo total menor es el 25 %V con 8,5 minutos en promedio, poco más del 50 % que el caso sin estrategia (Tabla 4.20). En relación a los intervalos de confianza, nuevamente en los casos de mayor proporción de peatones se presenta un intervalo considerablemente menor al resto de los escenarios. Adicionalmente, se presentan intervalos aceptables para la confiabilidad de los resultados (Tabla 4.21).

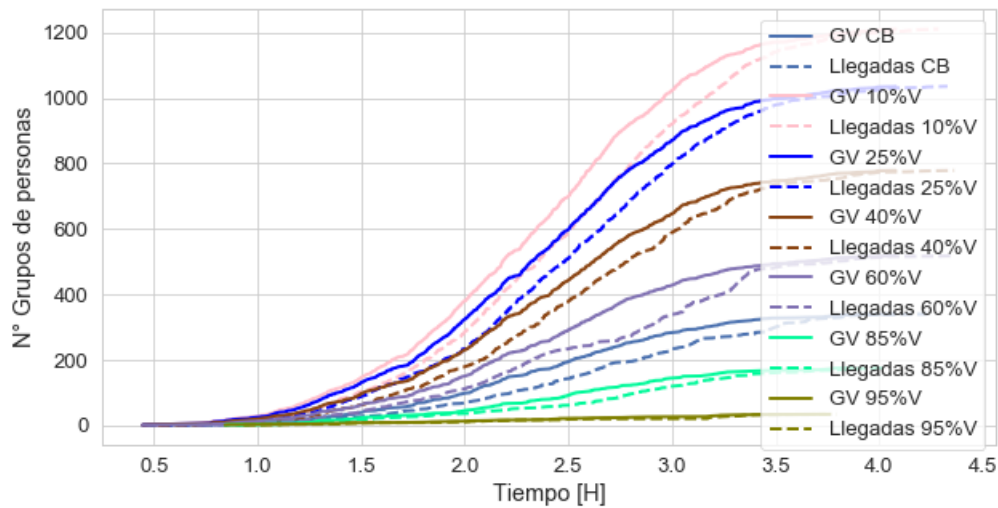


Figura 4.27: Generación de viajes de peatones 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas).

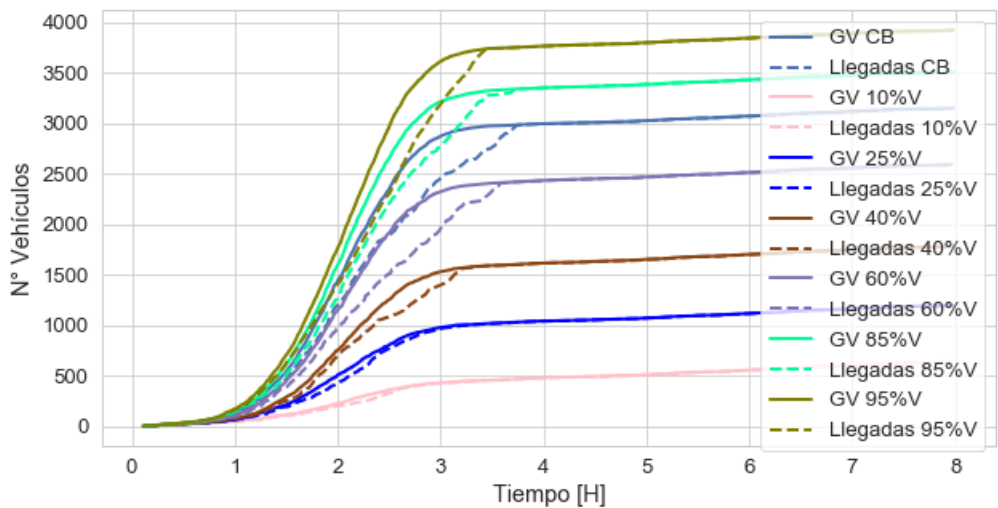


Figura 4.28: Generación de viajes de vehículos 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas)

Tabla 4.20: Tiempo de viaje 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	561	256	608	-
25V	511	332	573	-
40V	557	456	628	-
60V	657	616	720	-
75V	771	754	816	-
85V	688	680	738	-
95V	611	608	710	-

Tabla 4.21: Intervalos de confianza 3 refugios (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	2,9	2,8	3,3	-
25V	3,0	8,9	1,6	-
40V	9,1	13,3	8,4	-
60V	12,8	14,3	11,9	-
75V	15,5	17,1	13,4	-
85V	8,5	9,6	9,6	-
95V	10,7	10,8	13,4	-

Para el caso de implementación de los buses de emergencia, se observa un comportamiento durante la evacuación similar a los casos previos (Fig. 4.29 y 4.30). En relación a los tiempos de viaje promedio, el caso que mejor tiempo entrega es el 10%V; no obstante, las otras proporciones alcanzan tiempos mucho mayores que aquellos observados en el caso sin estrategia, lo que se debe a los tiempos de viaje promedio peatón-bus que se elevan debido a los tiempos de espera para cumplir capacidad. Aún así, los vehículos presentan tiempos de viaje promedio menores a medida que disminuye su proporción de uso. Para el caso de los peatones ocurre lo mismo respecto de la disminución de la proporción de vehículos motorizados (Tabla 4.22). Cabe recalcar que para el caso 95%V no existe un tiempo de viaje promedio para peatón-bus debido a los ponderadores asociados. Los intervalos de confianza mantienen valores reducidos entregando seguridad en los resultados (Tabla 4.23).

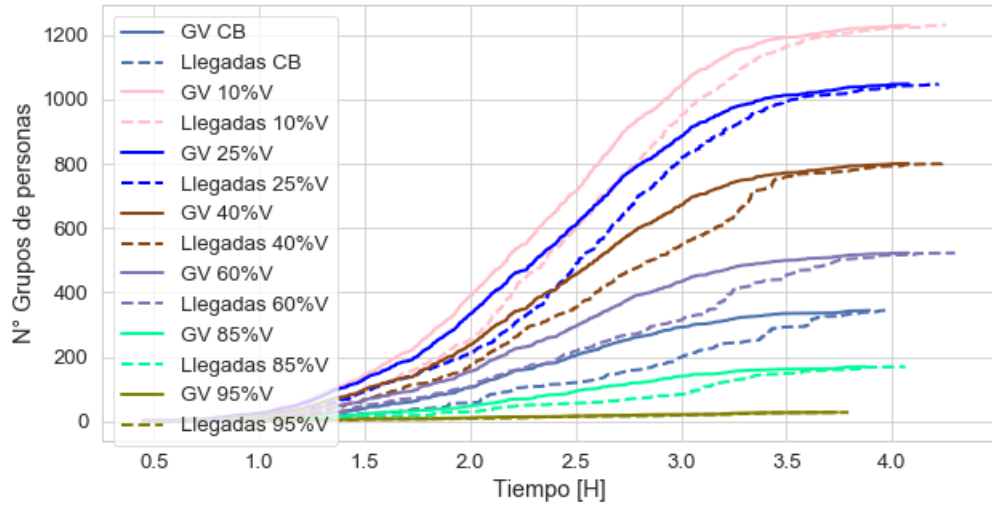


Figura 4.29: Generación de viajes de peatones buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas).

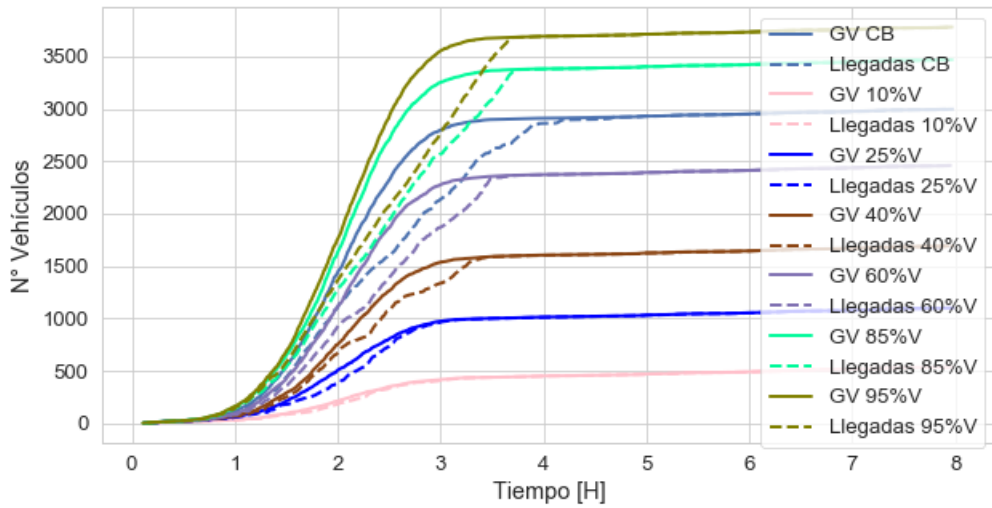


Figura 4.30: Generación de viajes de vehículos buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas)

Tabla 4.22: Tiempo de viaje buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	914	313	530	1.076
25V	1.130	527	552	1.408
40V	1.450	817	644	1.902
60V	1.712	1.108	794	2.444
75V	1.816	1.307	923	2.783
85V	1.665	1.278	843	3.277
95V	1.227	1.240	747	-

Tabla 4.23: Intervalos de confianza buses de emergencia (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	17,7	9,3	3,2	23,7
25V	27,4	24,6	10,8	36,8
40V	46,2	29,9	14,5	64,8
60V	34,1	22,1	16,3	63,0
75V	27,5	17,0	20,6	62,4
85V	22,2	16,2	25,2	72,2
95V	12,3	12,4	28,2	-

Finalmente, la implementación de ambas estrategias muestran llegadas a los destinos de forma constante y muy cercana a la propia generación de viajes. En todos los casos, la mayoría de los evacuados llegan dentro del mismo intervalo de tiempo, desenlace que no ocurría en los casos previos (Fig. 4.31 y 4.32). Los tiempos de viaje promedio más bajos son los siguientes 3 casos: 95 %V, 10 %V y 25 %V respectivamente, representando los escenarios más extremos en términos de modos de evacuación (Tabla 4.24). Los intervalos de confianza presentan valores acordes, con excepción del caso 95 %V, el cual es alto ya que se relaciona al tiempo de viaje total y al reducido número de casos que realizan el viaje en buses de emergencia (Tabla 4.25).

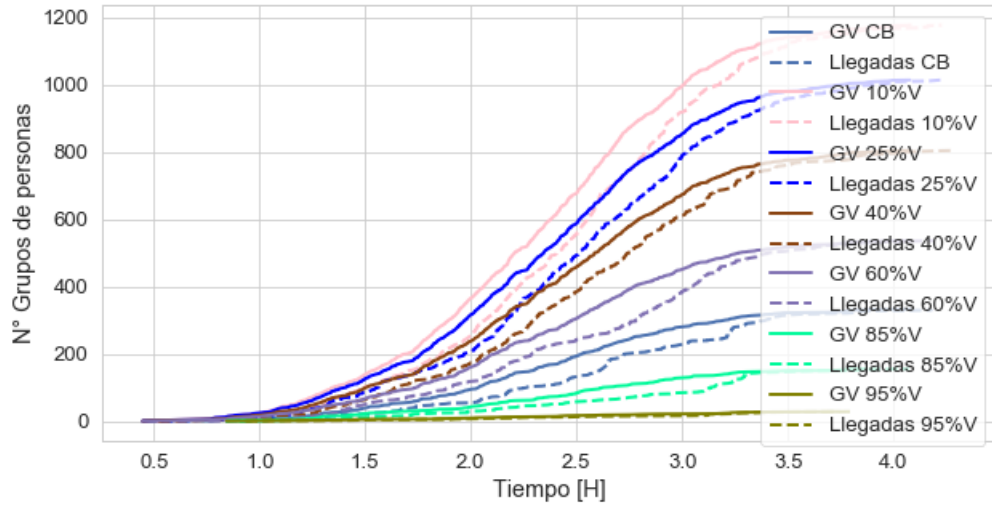


Figura 4.31: Generación de viajes de peatones 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas).

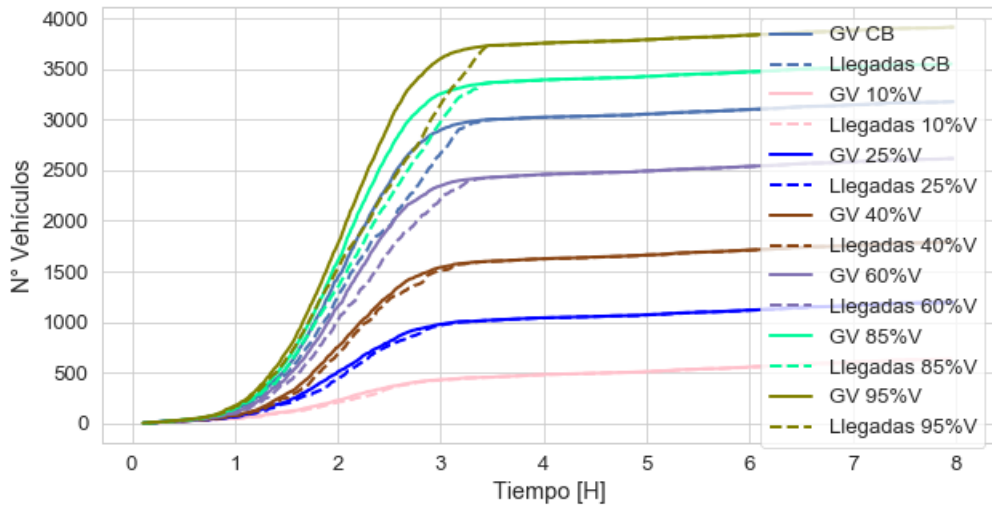


Figura 4.32: Generación de viajes de vehículos 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas)

Tabla 4.24: Tiempo de viaje 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Escenario	TV_{total} [s]	$TV_{Veh.}$ [s]	$TV_{Peat.}$ [s]	$TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	845	232	447	1.012
25V	931	287	454	1.175
40V	1.005	421	506	1.326
60V	1.187	582	574	1.779
75V	1.132	632	634	1.932
85V	1.001	631	610	2.560
95V	654	581	546	3.454

Tabla 4.25: Intervalos de confianza 3 Refs. y Buses de emerg. (Cambios proporción demanda, 4 horas).

Estrategia	$IC TV_{total}$ [s]	$IC TV_{Veh.}$ [s]	$IC TV_{Peat.}$ [s]	$IC TV_{Peat-Buses}$ [s]
10V	13,8	4,5	0,6	19,1
25V	20,9	7,6	1,5	29,6
40V	25,1	19,4	13,4	33,6
60V	27,0	19,3	11,8	43,5
75V	21,8	18,3	12,0	41,9
85V	20,4	16,2	11,4	59,6
95V	11,5	11,5	21,5	112,9

4.2.4. Síntesis de resultados

A modo de síntesis de los resultados, esta sección se ordena de la siguiente manera. Primero se realiza un análisis para las estrategias aplicadas en la situación base del caso de estudio; se analizan la cuatro ventanas de tiempo propuestas, observando en términos genéricos un impacto importante en el comportamiento durante la generación de viajes a medida que disminuyen los anchos de los intervalos. Con respecto a los tiempos de viaje promedio, es notorio como el aumento de número de refugios beneficia a cada modo de transporte y si bien, los buses no entregan un tiempo total considerablemente menor, la causa se explica por los tiempos de espera dentro de los buses de emergencia para completar sus capacidades, lo cual impacta directamente a los pasajeros, especialmente a aquellos que se acomodan primero en los buses. Cabe recalcar que debido a la eliminación de vehículos existen pequeñas diferencias en el número de vehículos total que llega a los destinos. Los análisis siguientes se refieren a los escenarios propuestos, y dada la similitud en comportamiento entre las ventanas de tiempo, se decide realizar análisis solo para el intervalo de 4 horas de generación de viajes. En relación a los escenarios de aumento de población, se observan demoras constantes asociadas al único acceso del refugio, observándose una tendencia creciente en los tiempos de viaje promedio producto del incremento en población, aunque no de forma proporcional a tal aumento. Debido a la realización de solo tres escenarios adicionales, no es posible asociar los tiempos de viajes a una tendencia clara. Por último, con el aumento del 75 % comienzan a aparecer

luces de colapsos durante la simulación. Los escenarios relacionados a los cambios en las proporciones de modos de transporte muestra que en términos de tiempos de viaje para vehículos y peatones, las distribuciones más favorable corresponden a “10 % de vehículos-90 % de peatones” y “40 % de vehículos-60 % de peatones” respectivamente y considerando ambos modos, el escenario más beneficioso es “25 % de vehículos-75 % de peatones”. Los escenarios analizados presentan comportamientos esperados tanto en el funcionamiento del simulador como en los resultados finales, donde fue posible identificar condiciones críticas de funcionamiento, además de reconocer aquellos escenarios que presentan mayor afinidad con el aumento de refugios y otros con la integridad de los buses de emergencia.

Capítulo 5

Conclusión

5.1. Síntesis del estudio

En este trabajo de tesis se presenta un enfoque de microsimulación de tráfico que permite modelar de forma realista el movimiento de vehículos y peatones siguiendo una estrategia de evacuación ante el evento de una emergencia (desastre). Se construye una herramienta *ad-hoc* que sirve de apoyo al análisis de la efectividad de planes de evacuación en el caso de aluviones en la zona de la cuenca del río Salado, en particular en la ciudad de Chañaral. Para apoyar el análisis y la toma de decisiones en esta situación excepcional, los modelos usuales de equilibrio no entregan con suficiente detalle la información necesaria respecto de la repartición de los flujos ante estas condiciones anómalas, para tomar decisiones apropiadas y eficientes respecto de los procesos de evacuación. El modelo propuesto incorpora las características multimodales de los flujos y el comportamiento de los habitantes. En particular, se modelan flujos mixtos de vehículos y peatones compartiendo la calzada de algunas vías. Este modelo se implementó utilizando la API de la plataforma Quadstone Paramics, lo cual permite la integración de distintos escenarios y estrategias de evacuación.

5.2. Resultados y contribuciones

Como resultado del presente estudio, se realiza la codificación completa de la red asociada a Chañaral, donde se cuenta con 882 nodos, 2.054 arcos y 22 zonas. Este procedimiento depende directamente del caso particular a estudiar. Sin embargo, la implementación de metodologías para representar comportamientos de la evacuación son llevadas a cabo a través de la Interfaz de Programación de PARAMICS, resultando algoritmos independientes del caso de estudio y aplicables a distintos escenarios. Sin duda, la comunicación con el simulador y la implementación de comportamientos a través del API ha sido el proceso más desafiante de esta tesis, permitiendo modelar de manera muy consistente las condiciones de evacuación a nivel de detalle vehículos-persona, especialmente en arcos compartidos de flujo mixto, aumentando los propios alcances de la tesis planteados originalmente. Plantear soluciones, lograr implementar conductas y calibrarlas ha requerido de tiempo y trabajo constante.

Específicamente, se construyen algoritmos para la generación de viajes tanto de vehícu-

los como de peatones siendo posible cambios oportunos en la distribución probabilística. Adicionalmente, se elaboran algoritmos para la evacuación mixta, incorporando la ecuación fundamental del tráfico asociadas a los modelos de Greenshield y Underwood dependiendo del caso específico. Notar que si bien esta implementación requiere definir sectores de aglomeración exactas y modificar las rutas fijas de los peatones para la evacuación según el caso de estudio, la base y esencia del algoritmo permite abordar distintos escenarios siempre y cuando se defina la estructura necesaria en la red. Por último, en términos del API se implementa un breve código para guardar los datos relevantes para el análisis posterior de resultados, considerando tipo de vehículo, ID, tiempo de inicio y fin de viaje.

Se desarrollan simulaciones para la situación base del caso de estudio, esto permitió observar los límites de la red y los alcances del simulador con respecto al tamaño y distribución de la población, así se definieron escenarios y estrategias con el objeto de evaluar resultados en mayor profundidad. En términos generales, los resultados relacionados a los escenarios de aumento de población muestran demoras constantes asociadas al único acceso del refugio. Los incrementos de población generan aumentos en los tiempos de viaje promedio pero en menor proporción que dichos aumentos. Debido a la realización de solo tres escenarios adicionales, no es posible asociar los tiempos de viajes con una tendencia clara. Por último, con el aumento del 75 % comienzan a aparecer problemas de congestión críticos durante la simulación. Los escenarios relacionados a los cambios en las proporciones de modos de transporte muestran que en términos de tiempos de viaje para vehículos y peatones, las distribuciones más favorables corresponden a “10 % de vehículos-90 % de peatones” y “40 % de vehículo-60 % de peatones” respectivamente; considerando ambos modos, el escenario más beneficioso es “25 % de vehículos-75 % de peatones”.

El impacto de las estrategias desarrolladas es positivo, ya que no solo se busca mejoras en los tiempos de viajes y orden en la evacuación, sino también se entregan posibilidades a los ciudadanos para poder evacuar, las que podrían convertirse en variables de elección en el modelo como parte de investigación futura. Aumentar el número de destinos genera importantes mejoras en los tiempos de ambos modos de evacuación, sin embargo, en el caso de los buses de emergencia, si bien disminuyen los tiempos de los vehículos y peatones, aquellos que se trasladan en estos buses tienen tiempos de viaje elevados dada la espera para completar la capacidad del transporte.

En síntesis, los escenarios y las estrategias implementadas muestran un funcionamiento positivo de la herramienta diseñada. Los escenarios críticos mostraron resultados esperados y lo estrecho de los intervalos de confianza le dan más confiabilidad a los resultados, considerando distintas realizaciones del mismo escenario.

5.3. Limitaciones e investigaciones futuras

Una de las dificultades más grandes del presente estudio es la escasa información que se posee con respecto a las emergencias ocurridas en Chañaral, complicando la calibración del caso de estudio. Sin embargo, la posibilidad de reajustar parámetros para representar distintos escenarios, permite adecuarse a las situaciones más críticas de la evacuación y los alcances que conlleva.

El modelamiento del caso de estudio contempla propiedades importantes tales como la generación de viajes, la consideración de refugios, distintos modos de transporte, entre otras. No obstante, durante la evacuación del presente estudio se establece la cantidad de evacuados exacta para cada modo de transporte, además, todos los peatones siguen las rutas de evacuación sin falta. Para efectos de realismo y alcances del estudio, es ideal que para futuras implementaciones se incorpore nuevos modos de transporte como ciclos y distintos tipos de peatones asociados a la actividad socio-económica y demográfica, considerar variables de decisión asociadas a elección de modos de transporte y destinos, asimismo, la posibilidad de decidir si seguir las rutas establecidas para la evacuación o evacuar por sus propios medios, parámetros inciertos que representen obstáculos manifestados durante la evacuación y otros aspectos abordados en la Revisión de Literatura. Debido a las limitaciones computacionales y temporales, la consideración de estas características para el modelo quedarán propuestas para la continuidad del estudio y futuros trabajos de tesis.

Bibliografía

- D. Alvear, O. Abreu, A. Cuesta y V. Alonso. A new method for assessing the application of deterministic or stochastic modelling approach in evacuation scenarios. *Fire safety journal*, 65:11–18, 2014.
- K. M. Alves, M. C. Parodi y P. A. Rey. Identificación de zonas seguras y diseño de un plan de evacuación en caso de aluviones en la cuenca del río salado. In *I Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO 2019)-JAIIO 48 (Salta)*, 2019.
- J. Barceló. Models, traffic models, simulation, and traffic simulation. In *Fundamentals of traffic simulation*, pages 1–62. Springer, 2010.
- V. Bayram. Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 21(2):63–84, 2016.
- S. Bretschneider y A. Kimms. Pattern-based evacuation planning for urban areas. *European Journal of Operational Research*, 216(1):57–69, 2012.
- V. Campos, R. Bandeira y A. Bandeira. A method for evacuation route planning in disaster situations. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54:503–512, 2012.
- X. Chen y F. B. Zhan. Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. In *Agent-Based Modeling and Simulation*, pages 78–96. Springer, 2014.
- J. V. Cornejo. *Re-Construyendo La Huella De Desastre: Los Aluviones Del Río Salado En Su Paso Por Chañaral. 1848-2015*. PhD thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile), 2017.
- J. Desrosiers, Y. Dumas, M. M. Solomon y F. Soumis. Time constrained routing and scheduling. *Handbooks in operations research and management science*, 8:35–139, 1995.
- T. N. Dhamala, U. Pyakurel y S. Dempe. *A critical survey on the network optimization algorithms for evacuation planning problems*. TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Mathematik und Informatik, 2018.
- DLR Institute of Transportation Systems. Sumo webpage, 2020. URL http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/. [Online; accessed 10-

April-2020].

- M. M. Farahani, S. K. Chaharsooghi, T. Van Woensel y L. P. Veelenturf. Capacitated network-flow approach to the evacuation-location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 115:407–426, 2018.
- H. K. Gaddam y K. R. Rao. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation. *Journal of modern transportation*, 27(1): 61–74, 2019.
- H. W. Hamacher, S. Heller y B. Rupp. Flow location (flowloc) problems: dynamic network flows and location models for evacuation planning. *Annals of Operations Research*, 207(1): 161–180, 2013.
- L. D. Han, F. Yuan, S.-M. Chin y H. Hwang. Global optimization of emergency evacuation assignments. *Interfaces*, 36(6):502–513, 2006.
- A. Hashimoto y H. Tamiya. Static routing system, Oct. 21 1997. US Patent 5,680,116.
- X. HOU, J. XIONG, G. JIANG, S. CHEN, X. YANG y X. ZHAO. Calculation method of emergency evacuation time based on paramics. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, page S1, 2009.
- S. L. Jones, A. J. Sullivan, N. Cheekoti, M. D. Anderson y D. Malave. Traffic simulation software comparison study. *UTCA report*, 2217, 2004.
- G. Kotusevski y K. Hawick. A review of traffic simulation software. 2009.
- J. Li y K. Ozbay. Evacuation planning with endogenous transportation network degradations: a stochastic cell-based model and solution procedure. *Networks and spatial economics*, 15 (3):677–696, 2015.
- J. Li, K. Ozbay, B. Bartin, S. Iyer y J. A. Carnegie. Empirical evacuation response curve during hurricane irene in cape may county, new jersey. *Transportation research record*, 2376(1):1–10, 2013.
- Y. Liu, N. Okada y Y. Takeuchi. Dynamic route decision model-based multi-agent evacuation simulation-case study of nagata ward, kobe. *Journal of natural disaster science*, 28(2):91–98, 2008.
- F. Makinoshima, F. Imamura y Y. Abe. Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 83:36–50, 2018.
- McTrans Center. Corsim webpage, 2020. URL <http://mctrans.ce.ufl.edu/mct/index.php/tsis-corsim/>. [Online; accessed 10-April-2020].
- M. M. Mubasher y J. S. W. ul Qounain. Systematic literature review of vehicular traffic flow simulators. In *2015 International Conference on Open Source Software Computing*

- (*OSSCOM*), pages 1–6. IEEE, 2015.
- P. Murray-Tuite y B. Wolshon. Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27: 25–45, 2013.
- M. Ng y D.-Y. Lin. Sharp probability inequalities for reliable evacuation planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60:161–168, 2015.
- A. J. Pel, M. C. Bliemer y S. P. Hoogendoorn. A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations. *Transportation*, 39(1):97–123, 2012.
- PTV Group. Vissim webpage, 2020. URL <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/>. [Online; accessed 10-April-2020].
- Quadstone Paramics. Paramics version history, 2020. URL <http://www.paramics-online.com/>. [Online; accessed 10-April-2020].
- R. Rastogi, S. Chandra et al. Pedestrian flow characteristics for different pedestrian facilities and situations. 2013.
- N. T. Ratrouf y S. M. Rahman. A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(1B):121–133, 2009.
- S. K. So y C. F. Daganzo. Managing evacuation routes. *Transportation research part B: methodological*, 44(4):514–520, 2010.
- F. Song, X.-k. Yang y L. Du. The development of paramics based metropolitan emergency evacuation transportation simulation system—meetsim. In *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, pages 388–400. 2010.
- J. H. Sorensen. Hazard warning systems: Review of 20 years of progress. *Natural hazards review*, 1(2):119–125, 2000.
- F. Southworth. Regional evacuation modeling: A state of the art reviewing. Technical report, ORNL Oak Ridge National Laboratory (US), 1991.
- A. Stepanov y J. M. Smith. Multi-objective evacuation routing in transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 198(2):435–446, 2009.
- P. Sykes. Traffic simulation with paramics. In *Fundamentals of traffic simulation*, pages 131–171. Springer, 2010.
- Trafficware. Simtraffic webpage, 2020. URL <https://www.trafficware.com/blog/synchro-vs-simtraffic>. [Online; accessed 10-April-2020].
- TSS-Transport Simulation Systems. Aimsun webpage, 2020. URL <https://www.aimsun.com/>. [Online; accessed 10-April-2020].

- H. Tu, G. Tamminga, H. Drolenga, J. de Wit y W. van der Berg. Evacuation plan of the city of almere: simulating the impact of driving behavior on evacuation clearance time. *Procedia Engineering*, 3:67–75, 2010.
- S. Tufekci y T. M. Kisko. Regional evacuation modeling system (rems): a decision support system for emergency area evacuations. *Computers & industrial engineering*, 21(1-4):89–93, 1991.
- H. Tuydes. Network traffic management under disaster conditions. 2005.
- H. Üster, X. Wang y J. T. Yates. Strategic evacuation network design (send) under cost and time considerations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107:124–145, 2018.
- X. Yang, X. J. Ban y J. Mitchell. Modeling multimodal transportation network emergency evacuation considering evacuees’ cooperative behavior. *Transportation research part A: policy and practice*, 114:380–397, 2018.
- X. Zhang y G.-l. Chang. A dynamic evacuation model for pedestrian–vehicle mixed-flow networks. *Transportation research part C: emerging technologies*, 40:75–92, 2014.
- A. K. Ziliaskopoulos. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem. *Transportation science*, 34(1):37–49, 2000.