



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**EVACUACIÓN BIMODAL DE LA
CIUDAD DE IQUIQUE ANTE TSUNAMI,
CON ENFOQUE EN POBLACIÓN
VULNERABLE, UTILIZANDO
SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES**

MATÍAS ANDRÉS VARGAS PALOMINOS

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

Profesor Supervisor:
PEDRO GAZMURI SCHLEYER

Santiago de Chile, Agosto, 2020

© MMXX, Matías Andrés Vargas Palominos



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVACUACIÓN BIMODAL DE LA CIUDAD DE IQUIQUE ANTE TSUNAMI, CON ENFOQUE EN POBLACIÓN VULNERABLE, UTILIZANDO SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

MATÍAS ANDRÉS VARGAS PALOMINOS

Tesis de Magíster presentada a la Comisión integrada por los profesores:

PEDRO GAZMURI SCHLEYER

JUAN CARLOS FERRER ORTIZ

IGNACIO SOLÍS MEZA

CHRISTIAN LEDEZMA ARAYA

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

Santiago de Chile, Agosto, 2020

Gracias a mi querida familia,
por todo su cariño y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre y padre por haberme acompañado y apoyado durante este proceso. Agradezco su incondicional cariño que en todos los años de universidad me han permitido desarrollarme y atreverme a tomar riesgos.

Así mismo quiero agradecer tres personas más. A mi prima Claudia por haberme acogido en su hogar durante el periodo de recolección de datos en Iquique. La compañía de ella, Pedrito y Bernardo hizo ameno los largos días de caminatas y conteos. Las otras dos personas son mis amigos Karla y Gonzalo. Gracias Karla por digitalizar el conteo de vehículos y Gonzalo por revisar este documento.

Finalmente, agradezco a mi profesor Pedro Gazmuri por haber guiado el trabajo del magíster y haberme encaminado cuando me alejaba del foco principal. Además, quiero agradecer a Ignacio Solís por haber facilitado el traspaso de todo el trabajo que él ya había realizado además de los innumerables comentarios y consejos a mi trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	iix
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Motivación, Objetivos e Hipótesis	3
1.2. Límites del Modelo.....	5
1.3. Estructura del Documento	6
2. IQUIQUE	7
2.1. Caracterización de la ciudad.....	7
2.2. Plan de evacuación	10
2.3. Visita a terreno.....	17
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. Modelación Basada en Agentes y Evacuación	19
3.2. Modelación de población vulnerable.....	23
3.2.1. Modelación grupos etarios	25
3.2.2. Modelación población con condición permanente.....	27
4. DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN	30
4.1. Envejecimiento de la población.....	30
4.2. Distribución de la población.....	37
4.2.1. Encuesta Origen Destino Iquique.....	37
4.2.2. II Estudio Nacional de la Discapacidad	43
4.2.3. Cruce de encuestas	52
4.3. Distribución de los vehículos	57

4.3.1.	Encuesta Origen Destino	58
4.4.	Actualización a corte temporal 2019	61
4.4.1.	Actualización población	61
4.4.2.	Actualización vehículos	63
5.	MODELO DE SIMULACIÓN	63
5.1.	Componentes	64
5.1.1.	Entidades	64
5.1.2.	Recursos	65
5.1.3.	Medidas de desempeño	65
5.2.	Proceso de evacuación de las personas.....	66
5.2.1.	Decisión de evacuar en grupo	66
5.2.2.	Elección de vehículo	67
5.2.3.	Decisión de Evacuar.....	68
5.2.4.	Elección de punto de encuentro	69
5.2.5.	Elección de ruta.....	70
5.2.6.	Cálculo de Velocidad	71
5.3.	Etapas escape de vehículos.....	79
5.3.1.	Asignación.....	80
5.3.2.	Elección de Ruta.....	80
5.3.3.	Cálculo Velocidad Vehículos.....	81
5.3.4.	Desplazamiento por intervalo de tiempo.....	82
5.3.5.	Lógica de desplazamiento	85
5.4.	Modelación Iquique	86
5.4.1.	Calles.....	86
5.4.2.	Puntos de Encuentro y Vías de Escape	91
5.5.	Aspectos de Modelación en Netlogo	92
5.5.1.	Input del modelo.....	92
5.5.2.	Output del modelo.....	93
5.5.3.	Interfaz de Netlogo.....	94
5.6.	Supuestos	96

6.	VALIDACIÓN.....	98
6.1.	Comparación Modelo Tesis Ignacio Solís.....	99
6.2.	Casos base	101
6.3.	Análisis de sensibilidad	104
6.3.1.	Vehículos.....	104
6.3.2.	Población vulnerable.....	116
7.	RESULTADOS.....	125
7.1.	Resultados Macrozona 1.....	129
7.1.1.	Macrozona 1, diurno	129
7.2.	Resultados Macrozona 2.....	133
7.2.1.	Macrozona 2, Diurno.....	133
7.2.2.	Macrozona 2, Nocturno.....	138
7.3.	Resultados Macrozona 3.....	141
7.3.1.	Macrozona 3, Diurno.....	141
7.3.2.	Macrozona 3, Nocturno.....	146
7.4.	Resumen Resultados.....	149
8.	CONCLUSIONES	154
	BIBLIOGRAFÍA	161
	A N E X O S.....	170
Anexo A.	Zonas de Evacuación, Red Vial.....	171
Anexo B.	Conteo Vehículos.....	176
Anexo C.	Distribución de población con dificultades, 2002 y 2012	172
Anexo D.	Encuestados II ENDisc	174
Anexo E.	Encuesta Origen Destino, Vehículos	179
Anexo F.	Inputs Modelo Netlogo	181
Anexo G.	Análisis y comparación Álvarez (2017)	190
Anexo H.	Mapas de calor, Macrozona 1, escenario diurno.....	193

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribución de la Población al año 2019	9
Figura 2.2. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 1	12
Figura 2.3. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 2	13
Figura 2.4. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 3	15
Figura 2.5. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 4	16
Figura 3.1. Velocidad como Función de la Edad	26
Figura 4.1. Distribución de la población según grandes grupos de edad, porcentajes 1992-2050	31
Figura 4.2. Índice de Envejecimiento Estimado y Proyectado, 1992-1950	32
Figura 4.3. Tasa de Dependencia Estimada y Proyectada, 1992 - 2050.....	36
Figura 4.4. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 2	39
Figura 4.5. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 3	40
Figura 4.6. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 1	42
Figura 4.7. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 4	42
Figura 4.8. Proporción de Deficiencias en la Población por Grupo Etario, Chile 2002	44
Figura 4.9. Proporción de la Población con Condiciones Permanentes por Grupo Etario, Chile 2012	45
Figura 4.10. Proporción de la Población con Condiciones Permanente por Grupo Etario, Iquique 2012.....	50
Figura 5.1. Relación Velocidad-Densidad en Frente para los agentes.	73

Figura 5.2. Velocidad de Evacuación y Densidad al frente del Agente.	77
Figura 5.3. Caso con múltiples líneas.....	85
Figura 5.4. Esquema Ejemplo Corte de Vía Local.....	89
Figura 5.5. Ejemplo Interfaz Netlogo.....	96
Figura 6.1. Comparación Solís (2016)	100
Figura 6.2. Porcentaje de Población Evacuada: Casos Bases, MacroZona 2, Corte 2010	102
Figura 6.3. Diferencia Caso FFA: MacroZona 2, Corte 2010.....	103
Figura 6.4. Porcentaje de Población Evacuada: 4,830 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	106
Figura 6.5. Porcentaje de Población Evacuada: 9,660 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	108
Figura 6.6. Porcentaje de Población Evacuada: 24,150 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	109
Figura 6.7. Diferencia Caso FFA: 4,830 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010.....	111
Figura 6.8. Diferencia Caso FFA: 9,660 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010.....	112
Figura 6.9. Diferencia Caso FFA: 24,150 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	113
Figura 6.10 Porcentaje de Población Evacuada: <i>Delay time</i> 0s, MacroZona 2, Corte 2010	114
Figura 6.11 Diferencia “V9.0.1 In Need of Help, No cars”: comparación 1,000 vehículos.....	118
Figura 6.12 Diferencia “V9.0.1 In Need of Help, No cars”: comparación 3,943 vehículos.....	119

Figura 6.13. Diferencia “V9.0.1 All Disc, No cars”: comparación 1,000 vehículos....	123
Figura 6.14. Diferencia “V9.0.1 All Disc, No cars”: comparación 3,943 vehículos....	124
Figura 6.15. Diferencia “V9.0.1 All Disc, No cars”: comparación 7,500 vehículos....	125
Figura 7.1. Momento Llegada Tsunami Producido por Megaterremoto de 9.0 M_w	126
Figura 7.2. Resultados Macrozona 1, Escenario Diurno	130
Figura 7.3. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 1 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno	132
Figura 7.4. Resultados Macrozona 2, Escenario Diurno	135
Figura 7.5. Zona Origen Vehículos utilizados para Escapar. A la izquierda escenario en donde todos pueden usar el auto, a la derecha, caso en donde solo el grupo vulnerable y su acompañante lo puede hacer.	136
Figura 7.6. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 2 Diurno	137
Figura 7.7. Resultados Macrozona 2, Escenario Nocturno	139
Figura 7.8. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 2 Nocturno	140
Figura 7.9. Resultados Macrozona 3, Escenario Diurno	143
Figura 7.10. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 3 Diurno	145
Figura 7.11. Resultados Macrozona 3, Escenario Nocturno	146
Figura 7.12. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 3 Nocturno	148

Figura 7.13. Número de personas alcanzadas por el Tsunami, Modelo Ignacio Solís.	153
Figura A.1. Red Vial Macrozona 1.....	171
Figura A.2. Red Vial Macrozona 2.....	172
Figura A.3. Red Vial Macrozona 3.....	173
Figura A.4. Red Vial Macrozona 4.....	174
Figura A.5. Red Vial Macrozona 5.....	175
Figura B.1. Numeración Zonas EOD	176
Figura G.1. Curva de Evacuación Considerando Presencia (Con obs.) y Ausencia (Sin obs.) de obstaculos con inicio de evacuación dada por distribución Rayleigh con media t	191
Figura H.1. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra con uso de 2,611 Vehículos por Cualquier Persona Luego de 10 Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno	194
Figura H.2. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra con uso de 2,611 Vehículos por Cualquier Persona Luego de 20 Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno	195
Figura H.3. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra con uso de 2,611 Vehículos por Cualquier Persona Luego de 30 Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Velocidad por Grupo Etario	27
Tabla 3.2. Velocidades Según Condición.....	29
Tabla 4.1. Correlación Entre Edad y Deficiencias en la Población, 2002.....	33
Tabla 4.2. Correlación Entre Edad y Condiciones Permanentes en la Población	33
Tabla 4.3. Variación de personas entre escenario nocturno y diurno por macrozonas ..	41
Tabla 4.4. Grupos Etarios II ENDisc.....	49
Tabla 4.5. Proporción de Personas con Determinada Dificultad Sobre el Total de Ciudadanos con al Menos una Condición Permanente, Chile e Iquique.....	51
Tabla 4.6. Cantidad de Viajes por Propósito entre las 6 am y las 10 am en las comunas de Iquique y Alto Hospicio.....	53
Tabla 4.7. Comparación del Parque Vehicular al año 2010	59
Tabla 4.8. Población comunas Iquique y Alto Hospicio.	62
Tabla 4.9. Factores de expansión poblacionales 2010 - 2019	62
Tabla 4.10. Estimación Parque Vehicular en Base al PIB.....	63
Tabla 6.1. Momento Máximo Retraso.....	110
Tabla 6.2. Porcentaje de Población Evacuada: 4,830 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	115
Tabla 6.3. Porcentaje de Población Evacuada: 9,660 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	115
Tabla 6.4. Porcentaje de Población Evacuada: 24,150 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010	116
Tabla 6.5. Comparación Escenarios INoH: Porcentaje del Total de Evacuados.....	121

Tabla 6.6. Comparación Escenarios INoH: Porcentaje del Grupo Vulnerable	121
Tabla 7.1. Promedio de Personas en Zona Segura al Minuto 20 desde que Inicio la Evacuación, Casos Diurnos	150
Tabla 7.2. Promedio de Personas en Zona Segura al Minuto 20 Desde que Inicio la Evacuación, Escenarios Nocturnos.....	151
Tabla 7.3. Promedio de Personas Alcanzadas por el Tsunami, Casos Diurnos	152
Tabla 7.4. Promedio de Personas Alcanzadas por el Tsunami, Casos Nocturnos.....	152
Tabla B.1. Conteo Autos Estacionados	177
Tabla C.1. Distribución Etaria de la Población con Condición Permanente, 2002, Censo 2002	172
Tabla C.2. Distribución Etaria de la Población con Deficiencias, Chile 2012, Censo 2012	173
Tabla D.1. Distribución Etaria del Muestreo, Chile 2015, II ENDisc.....	174
Tabla D.2. Distribución Etaria del Muestreo, Región de Tarapaca 2015, II ENDisc ..	175
Tabla D.3. Distribución Etaria Del Muestreo, Chile 2015, II ENDisc.....	176
Tabla D.4. Distribución Etaria Del Muestreo, Región de Tarapacá 2015, II ENDisc .	177
Tabla D.5. Distribución Etaria Del Muestreo, Región de Tarapacá Urbano 2015, II ENDisc.....	178
Tabla E.1. Opciones Vehículos Transporte EOD.....	179
Tabla E.2. Opciones Tipo Estacionamiento EOD	180

RESUMEN

El envejecimiento demográfico es una situación que los países del mundo enfrentan en la actualidad y que se manifestará de manera más fuerte con los años y décadas que vienen. A su vez, esta evolución de la población conlleva un aumento en la proporción de personas con diferentes tipos de discapacidades. En este contexto, se analiza el efecto que tiene en la evacuación de la ciudad de Iquique ante un tsunami la inclusión de estos segmentos además de medidas que puedan ser beneficiosas para ellos.

Para lograr esto se realiza un Modelo Basado en Agentes (MBA) debido a que permite recrear las decisiones y características de cada segmento de la población. El primer grupo es el de personas que evacuan, los cuales son definidos por su edad, la presencia de alguna discapacidad y su grado de dependencia. En tanto, el segundo son los vehículos que puede usar la población para evacuar.

Con estos componentes se crean escenarios centrados en las personas con alguna dificultad. Por ejemplo, se puede encontrar un caso en que solo las personas de estos grupos pueden usar un automóvil.

Las conclusiones alcanzadas indican que, desde la perspectiva de disminuir la mortalidad de la catástrofe, el enfoque de las medidas se debe centrar en la parte de la población que es vulnerable geográficamente, o sea, aquellos que pueden ser alcanzados por el tsunami en el menor tiempo. Además, se patente la necesidad de incluir vehículos, no porque disminuyan los tiempos de evacuación, sino por el profundo impacto que tienen sobre el escape de la ciudad.

Palabras Claves: simulación, tsunami, modelación basada en agentes, MBA, población vulnerable, vehículos

ABSTRACT

Demographic aging is an evolving process of the worldwide population, and will manifest itself with even more strength in the coming years. This evolution in the population carries with it a rise in the proportion of people with different disabilities. It is in this context that we analyze the effect of the inclusion of this segment of the population in the setting of an evacuation of the city of Iquique during a tsunami, including in our model actions that could be beneficial for them.

To this end we carry out an Agent-Based Model (ABM), due to it allowing recreation of the characteristics and decision making of the two big groups of agents in the model. The first group is formed by segments of the population according to their age and presence of disability. The second group are vehicles the population can use to evacuate.

With these components, scenarios are created with a focus on people with disabilities. For example, we proposed a setting in which only people corresponding to this group could use vehicles.

Our analysis suggests that, from a point of view where mortality due to catastrophe should be minimized, focus of policies should be centered on the population that is geographically vulnerable, meaning the ones that can be reached by the tsunami in the least amount of time. Inclusion of use of vehicles in these policies is of utmost importance, not because they diminish evacuation times, but rather because of the deep impact they create in the city's evacuation.

Key Words: simulation, tsunami, agent-based model, ABM, vulnerable population, disability, vehicles.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo simula la evacuación de la ciudad de Iquique en caso de tsunami considerando la evacuación de personas con algún tipo discapacidad y el uso de vehículos con el fin de estimar el peligro y las desventajas del segmento de la población recién mencionado, además de poder plantear políticas que puedan mejorar la situación actual. Es importante mencionar que, desde aquí en adelante, las discapacidades serán referidas como “condiciones permanentes” debido a que este es el término específico que utilizan todas las fuentes de información.

Este estudio se enmarca como una continuación de la modelación que realizó Ignacio Solís en su tesis de magíster en la cual recreó la evacuación de esta misma ciudad con el fin de evaluar el riesgo que enfrenta la ciudad ante un tsunami motivado por la vulnerabilidad de la ciudad debido a su densidad poblacional y su geografía.

La principal diferencia entre ambos trabajos radica en que el modelo de Solís no incluye la población con dificultades permanentes de una manera detallada y los vehículos no se modelan. De esta forma, el presente trabajo se plantea como una mejora o incremento de su antecesor.

1.1. Motivación, Objetivos e Hipótesis

La motivación de este trabajo es mostrar el olvido en que se encuentran segmentos vulnerables de la población – tales como ancianos, infantes, personas con condiciones permanentes o embarazadas – en la literatura de simulación de eventos catastróficos y su posterior evacuación. Como se mostrará en secciones posteriores, las diferencias de la

población en general son modeladas con distribuciones aleatorias o se agrupa población con características dispares en grandes grupos homogéneos.

Por lo anterior, este trabajo se plantea los siguientes objetivos:

- Modelar la población vulnerable con la mayor fidelidad posible para considerar y traer al frente las diferentes implicancias que trae su inclusión en el modelo.
- Diseñar políticas en busca de ayudar a este segmento de la población y determinar si estas son de utilidad para este grupo y el resto de la ciudad.

Estas directrices son aún más relevantes al considerar que cada persona con dificultades, embarazadas, infantes u ancianos tienen una familia o cercanos que los intentará ayudar al momento de evacuar. De esta forma, para responder a los objetivos recién planteado, el modelo incluirá lo siguiente:

- En primer lugar, se planteará un método para calcular la población vulnerable y su distribución dentro de la ciudad en vez de simplemente asumir una distribución aleatoria.
- Segmentación de los grupos vulnerables. Esto incluye las personas con condiciones permanentes y el grado de dependencia que éstas tengan.
- Simulación de esta segmentación en un modelo basado en agentes.
- Modelación de búsqueda de otras personas y evacuación en grupo para incorporar el efecto que tienen personas más lentas sobre las más rápidas que las acompañan.
- Complementar la modelación de la población vulnerable con vehículos. A pesar de que su uso no es recomendado, existen autores que indican que en ciertas proporciones son beneficiosos (Goto, et al., 2012). Además, naturalmente en una

ciudad hay automóviles circulando lo que implica hacer un supuesto importante si no se consideran.

- Para poder plantear políticas que puedan ayudar a los grupos vulnerables, se modelará el efecto de uso de vehículos por parte de este segmento de la población.

Considerando todo lo anterior y en busca de plantear una política aplicable por la autoridad considerando los atributos del modelo, se plantea la siguiente hipótesis: “el uso estratégico de vehículos – i.e. el uso exclusivo de automóviles por segmentos vulnerables de la población y sus acompañantes – provocará una evacuación más expedita en un nivel completo de la ciudad” en base a la idea de que las personas que se mueven más lento podrán viajar más rápido en automóvil.

1.2. Límites del Modelo

En primer lugar, este modelo simula la evacuación de peatones, la posibilidad de que estos se agrupen y que utilicen vehículos para evacuar. Este no incluye la simulación del tsunami, sino que toma los resultados de otro trabajo y los incorpora a la simulación. El detalle de cómo se realizó esto aparece en la Sección 7.

De la mano con lo anterior, no se modelará ningún tipo de accidente. Esto considera desde colisiones de vehículos hasta derrumbes o incendios que se podrían producir después de un terremoto en la ciudad.

Con respecto a la interacción de la población con su medio, no se simularán obstrucciones que dificulten el movimiento de las personas tales como postes, soleras, hoyos o puestos de vendedores en las calles, u otros similares. Esta decisión es motivada

porque esto es un nivel de detalle mucho mayor al que el modelo aspira a tener y será explicado con detalle en la Sección 3.

En tanto, con respecto a la relación de población con los vehículos, una vez que las personas “decidan” utilizar un automóvil, no podrán cambiar de decisión ni podrán bajarse de este. Esto es uno de los supuestos realizados, el cual se puede encontrar con el resto en la Sección 5.6.

Finalmente, aunque el modelo ubica las personas y vehículos lo más apegado a la realidad según el método de la Sección 4, la simulación no las recrea en el estado previo al inicio de la evacuación. Esto significa que no hay un tiempo de simulación antes del comienzo del escape lo que le puede quitar cierta dinámica orgánica a la ciudad. Por ejemplo, no hay autos circulando por la calle o peatones caminando por la vereda como se podría ver en la realidad. Los autos parten estacionados en calles o edificios y los peatones inician estáticos, también en calle o edificios, pero no arriba de autos.

1.3. Estructura del Documento

Este documento comienza con una breve introducción para luego, en el Capítulo 2 caracterizar la ciudad de Iquique y mostrar información que se considera relevante para un mejor entendimiento de los resultados.

A continuación, en el Capítulo 3, se realiza la revisión bibliográfica. Esta se divide en dos partes: la primera analiza otros trabajos en los cuales se evacuen personas con modelos basados en agentes. En tanto, la segunda explora cómo se ha modelado la población vulnerable en la bibliografía internacional.

En el Capítulo 4 se explica el proceso, instrumentos y fuentes que se utilizaron para modelar la población de Iquique. Mientras que en el Capítulo 5 se explica el funcionamiento del modelo de simulación.

Finalmente, en el Capítulo 6 se realiza la validación del modelo para luego obtener los resultados de las zonas modeladas en el Capítulo 7. El trabajo cierra con las conclusiones en el Capítulo 8.

2. IQUIQUE

2.1. Caracterización de la ciudad

La ciudad de Iquique (coordenadas -20.21, -70.12) es la capital de la región de Tarapacá. Al oeste de ella se encuentra el Océano pacífico y al este la Cordillera de la Costa que, desde la urbe, se observa como un gran morro debido a la gran pendiente de esta. Mientras el centro de la ciudad se encuentra debajo de los 30 m.s.n.m. y el resto de Iquique no pasa de los 70 [m] de altura, la cordillera se alza por sobre los 700 metros sobre el nivel del mar. La ciudad de extremo a extremo tiene un largo de más de 11.5 [km] mientras que, en su parte más ancha, casi alcanza los 3 [km]. En la medida que la ciudad se acerca a su fin, tanto por el norte como por el sur, la distancia entre mar y cordillera va disminuyendo. Por el lado norte este fenómeno es más visible ya que el paso es prácticamente un desfiladero.

Con respecto a su población, en la comuna de Iquique habitan 191.468 habitantes, mientras que en la Alto Hospicio viven 131.512 personas al año 2017 (Instituto Nacional

de Estadísticas Chile, 2018a). Es relevante considerar ambas localidades al analizar la ciudad de Iquique debido a que atrae viajes de ambas comunas durante el día, creando así la conurbación Iquique-Alto Hospicio.

En tanto, la distribución de la población en un escenario diurno y en uno nocturno con la población proyectada al 2019 se muestra en las figuras Figura 2.1. En ella además se puede ver la división de macrozonas realizadas por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI de aquí en adelante) y la subdivisión de éstas realizada por la Encuesta Origen Destino 2010 de la ciudad (EOD de aquí en adelante). Estos últimos dos elementos serán profundizados en secciones posteriores.

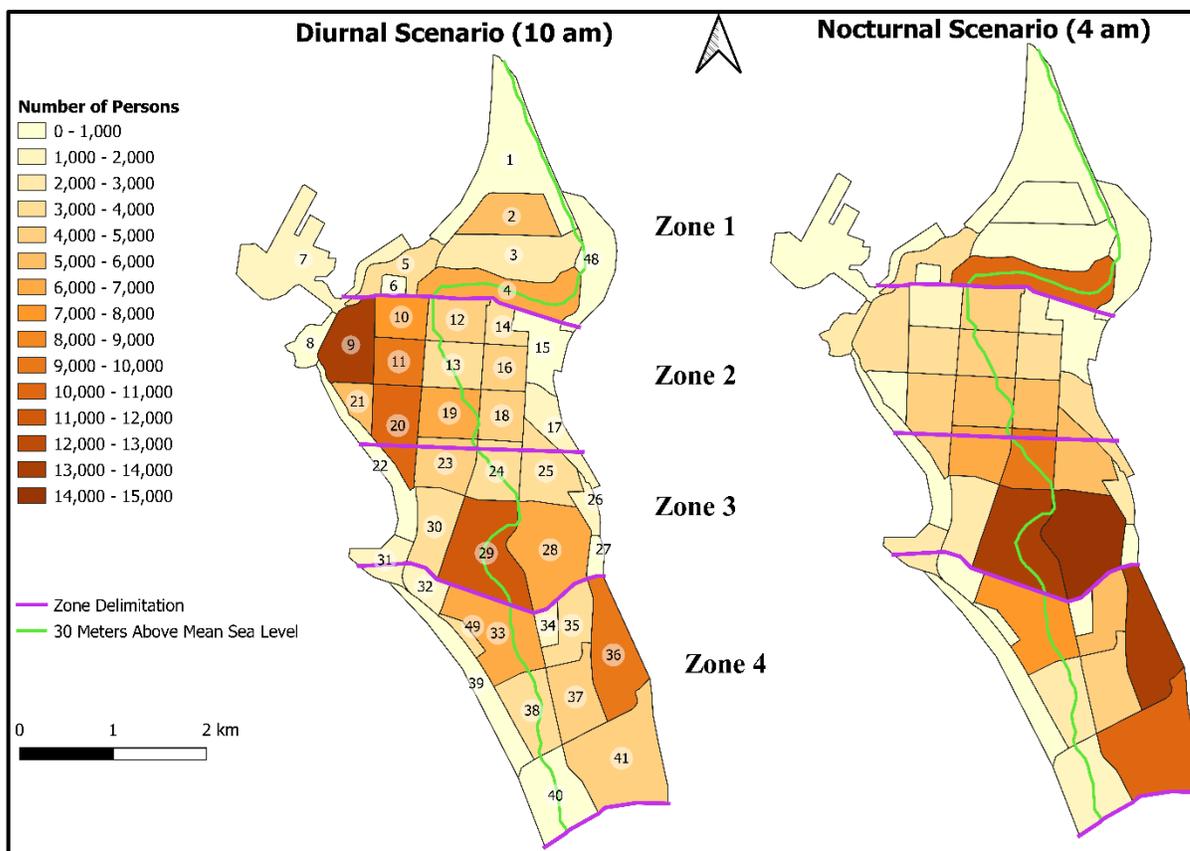


Figura 2.1. Distribución de la Población al año 2019

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c) y (Web Gis)

Además, de la figura es importante mencionar que la línea verde es la cota de nivel de 30 m.s.n.m. y esta es especial debido a que la ONEMI la define como el comienzo de la zona segura en caso de tsunami. Así, se observa en el escenario diurno grandes concentraciones en el centro de la ciudad (zonas 9, 10, 11, 20 y 21) lo que dificultará la evacuación debido a la eventual congestión que se producirá al evacuar como la distancia que deben recorrer.

Similar es el caso de la Zona Franca de Iquique (ZOFRI) (zona 2) al igual que las que la rodean (zonas 1, 3 y 5) debido a que el sector comercial y laboral atrae población durante el día que se encuentra lejana de la zona segura.

Por el otro lado, en la noche, la población se encuentra más segura debido a que la mayoría de las zonas habitacionales están a mayor altura. De hecho, dado que en la ZOFRI no hay hogares, sumado a que las encuestas que se utilizarán se realizan en base a las viviendas, en términos de lo que se puede observar en los datos, esta se encuentra vacía. Por lo tanto, se supondrá con lo que respecta al sector comercial de la ZOFRI, no hay nadie a quien evacuar durante la noche.

Con respecto al centro de la ciudad, dado que es un importante foco de puestos laborales, en la noche se encuentran menos personas que durante las horas del día. Esto facilita la evacuación en caso de emergencia debido a una menor congestión.

Finalmente, se puede observar que la mayor concentración de la población se encuentra sobre el nivel de seguridad o muy cerca de este en las zonas 4, 28, 29, 33 y 36. De esta forma, la población de la ciudad está más segura durante la noche. Además, hay que considerar que la gente que viaja desde Alto Hospicio en el día, en los horarios no laborales, se encontrará a resguardo en su hogar.

Como último comentario, esta información es para un día laboral del periodo no estival. Debido a esto, no se considera la gente que puede vacacionar en Iquique durante ciertos meses del año.

2.2. Plan de evacuación

El plan de evacuación de la ciudad está descrito en el “Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Sismo/Tsunami y Remoción en Masa” (Dirección de Protección Civil y Emergencia, Dirección Regional de ONEMI Tarapacá, 2017) desarrollado por la

Dirección de Protección Civil y Emergencia, la cual está bajo el mandato de la Dirección Regional de la ONEMI.

En este documento se detallan las vías de evacuación, posibles riesgos que surgirían ante una catástrofe y cómo deben actuar la ciudadanía y las instituciones. De este se desprende que, para la población, el objetivo será utilizar las vías de evacuación, que se disponen verticalmente con respecto a la línea de la costa con el fin de agilizar la llegada de la población hasta la cota de los 30 m.s.n.m.

Además, para organizar la evacuación, como ya se mencionó la ONEMI divide a la ciudad en zonas. Estas son un total de cinco, pero el estudio se enfocará en las cuatro primeras debido a que la quinta se encuentra por sobre los 30 m.s.n.m. Estas zonas ya fueron mostradas en la Figura 2.1.

La primera Macrozona va desde el norte de la ciudad hasta la avenida Sotomayor. En esta se observa principalmente un plano que en su mayoría oscila entre los 5 y 15 m.s.n.m. En ese espacio de baja altura, se encuentra principalmente el Centro Comercial ZOFRI, gran cantidad de bodegas, acopio de vehículos y otros comercios. Esto provoca que esta Macrozona sea sumamente peligrosa durante el día ya que allí se concentran trabajos alejados de la línea de seguridad. De esta manera, como se observa en la Figura 2.2, las personas deben recorrer grandes distancias para llegar hasta las vías de evacuación propuestas por la ONEMI y desde allí, todavía requieren caminar más para superar la cota 30.

Dentro de la Macrozona ZOFRI, la zona 4 que se distingue del resto debido a que es mayoritariamente habitacional y se encuentra cerca de la zona segura debido a que está

instalada en una parte de alto gradiente cerca de la vía de evacuación Sotomayor. Esta zona se encuentra entre los 15 y 40 m.s.n.m. y en ella vive una cantidad considerable de personas.

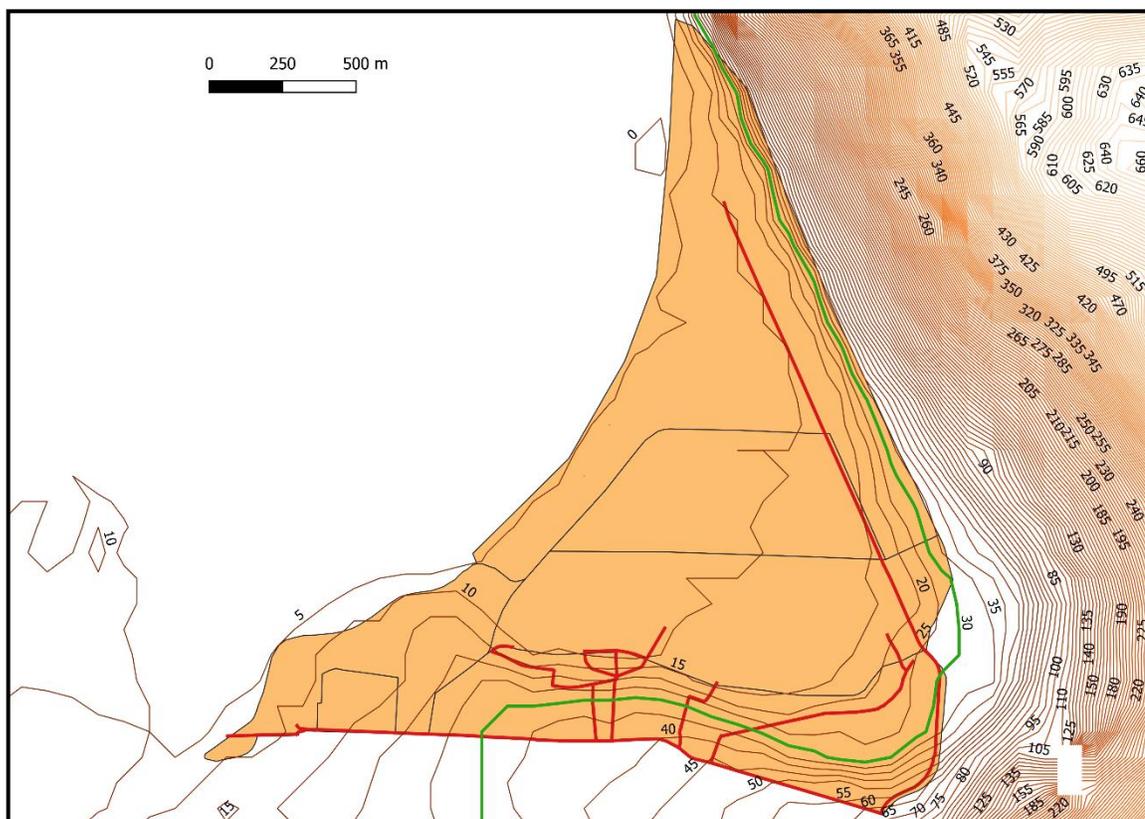


Figura 2.2. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 1

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c) y (Web Gis)

La situación cambia en la Macrozona 2. Esta va desde la Avenida Sotomayor hasta la calle Libertad incluyendo el Centro Oriente, Centro Histórico, el Puerto y el Borde turístico (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c). Como se aprecia en la Figura 2.3, hay 15 vías de evacuación, todas perpendiculares a la playa. Así mismo, si se imagina un vector con sentido igual al gradiente positivo de la pendiente, este y la calle son prácticamente

paralelos lo que implica que en la medida que la gente se desplaza por la calle, también asciende.

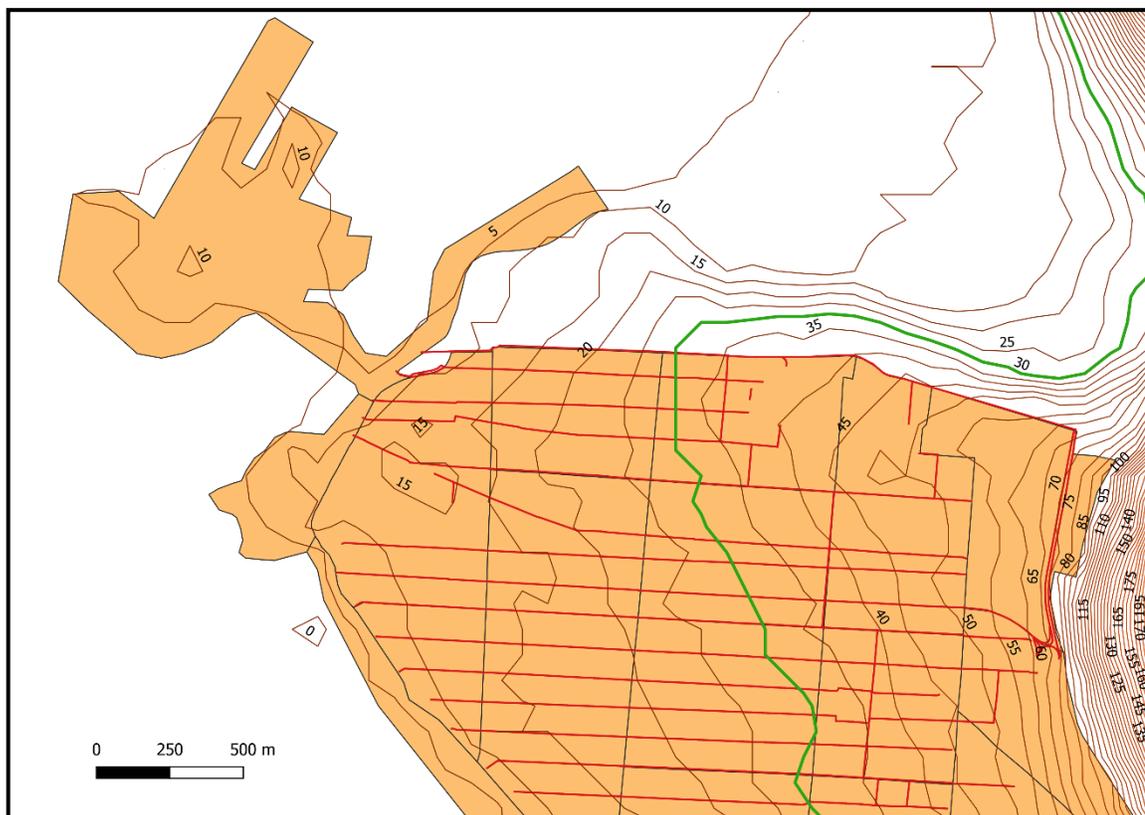


Figura 2.3. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 2

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c) y (Web Gis)

Diferente es el caso cuando se compara con la Macrozona 1 en donde una de las principales vías de evacuación es paralela a la playa y básicamente es plana hasta los últimos 500 metros en donde abruptamente debe ascender entre 15 a 20 metros. El impacto que tiene esto es que la gente estará expuesta más tiempo al peligro y habrá un tramo particularmente cansador de recorrer.

Para finalizar con la Macrozona 2, la zona del puerto queda particularmente desprotegida debido a la larga distancia que deben recorrer para llegar hasta una zona

segura. Tanto así, que, más adelante en este trabajo, se observa que ellos se rezagan con respecto al resto y tienen una curva de evacuación distinta al resto de la Macrozona.

En la medida que se avanza hacia el sur, la distancia desde la playa hasta la zona de seguridad va disminuyendo debido a que la pendiente se va haciendo más pronunciada. Esto se puede observar en la Figura 2.4 que corresponde a la Macrozona 3. Esta va desde la calle Libertad hasta Tadeo Haenke, aproximadamente, las vías de evacuación son de un kilómetro de largo, a excepción de la zona de la península. En ella se recomienda a la población evacuar verticalmente.

En la visita a terreno se hizo evidente un problema en esta Macrozona. El diseño de damero de la ciudad, característica de los centros históricos de las ciudades más antiguas, se abandona y las calles dejan de ser rectas. Cuando se realizaron los conteos, a pesar de tener un mapa de las vías de evacuación, era difícil seguirlas porque la señalización era pobre fuera de las calles más grandes. En el Anexo A se puede observar la red vial de esta Macrozona y la del resto de la ciudad.

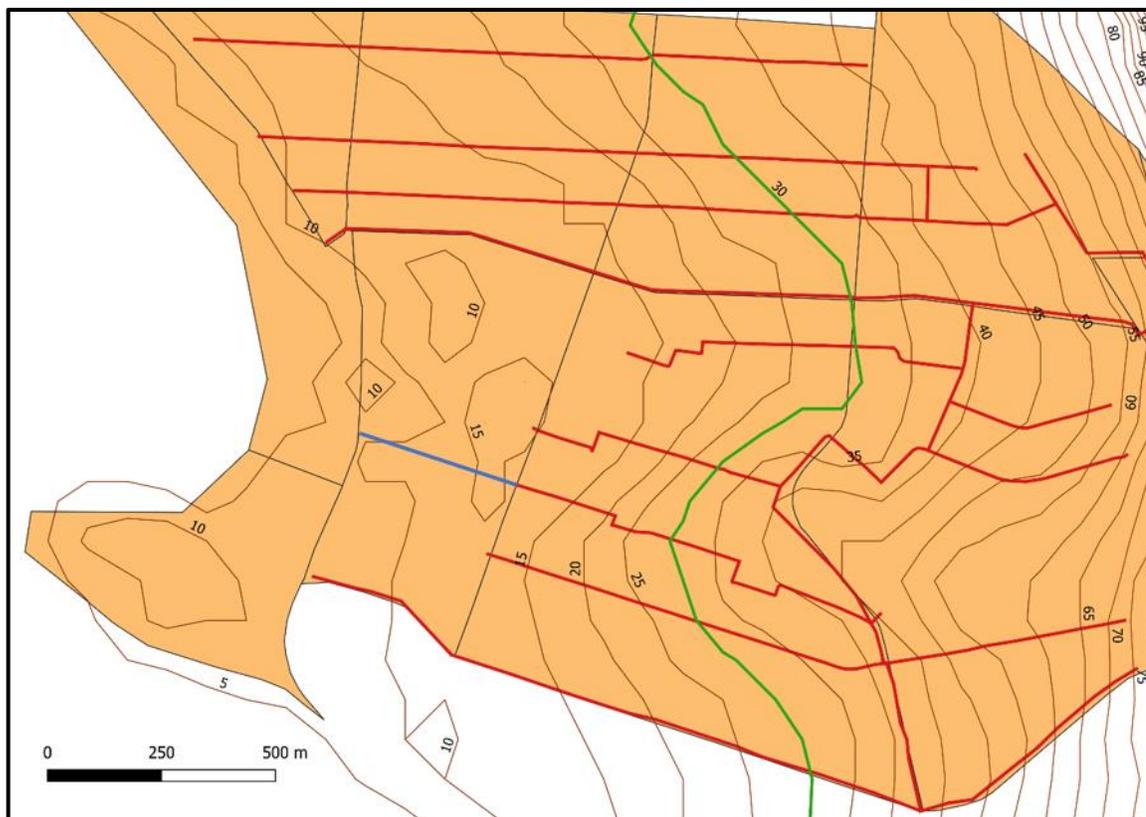


Figura 2.4. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 3

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c) y (Web Gis)

Además, las vías de evacuación están más alejadas unas de otras, sobre todo alrededor de la vía que está en azul en la Figura 2.4. La razón de que esta está coloreada diferente se debe a que esta pasa por un recinto de la fuerza aérea y es esta organización quienes deben subir una barrera para que la gente pueda pasar en caso de tsunami.

Finalmente, respecto a la Macrozona 4 que va desde Tadeo Haenke hasta Padre Hurtado, como se aprecia en la Figura 2.5, la distancia máxima a recorrer es aproximadamente un kilómetro y desciende hasta menos de 250 metros en el sector sur. Debido a su geografía, esta zona resulta más segura que las anteriores.

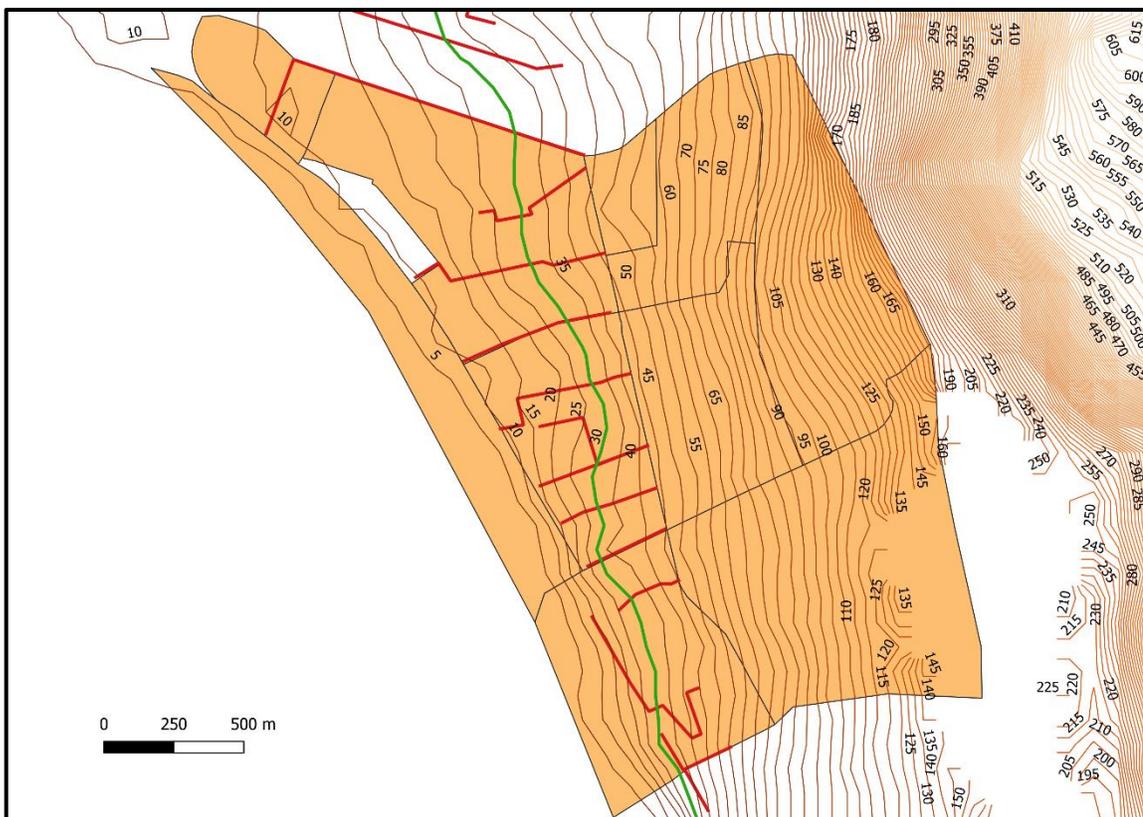


Figura 2.5. Curvas de altura y Vías de Evacuación, MacroZona 4

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c) y (Web Gis)

Con respecto a la evacuación vertical que se mencionó para la Macrozona 3, el protocolo no entra en detalle. Aunque lo plantea como posibilidad para los edificios que tienen ocho o más pisos, al mismo tiempo menciona que es posible que los edificios no soporten estructuralmente el impacto de un tsunami. Resulta poco claro si las personas deben utilizar este tipo de evacuación o no.

Un último punto que destacar son las “Recomendaciones y Acciones Generales de Preparación inclusiva”. Como su nombre lo dice, son lineamientos generales acerca de cómo establecer un plan, tener un kit de emergencia con insumos y medicamentos, coordinarse con algún centro médico u hospital, entre otras. El largo de este punto no

supera una página, mientras que, por ejemplo, las consideraciones para el proceso de evacuación con animales tienen nueve páginas. Lo que indica cierto olvido para la población vulnerable (niños, personas en situación de discapacidad, embarazadas y personas mayores).

Más evidencia con respecto a esta situación es proporcionada en la Evaluación de Megasimulacro, Terremoto y Tsunami con respecto a la ayuda a personas vulnerables. Del simulacro de evacuación de Iquique (Walker Rousseau, 2012) se reporta que “en el 42% de los Puntos Estratégicos y en el 45% de las Vías de Evacuación no se observó ayuda” a personas vulnerables. Además, “en relación con las condiciones de seguridad para la evacuación de personas con capacidades diferentes, se obtuvo un 46% de aprobación en Puntos Estratégicos y un 26% en Vías de Evacuación Externas”, el resto no pasó un mínimo aceptable.

De esta manera, se revela la necesidad de una mayor atención a la población vulnerable, porque además de las dificultades que tienen *per se*, se deben enfrentar a las complicaciones que surgen en una evacuación.

2.3. Visita a terreno

A finales de agosto del 2019 se realizó una visita a terreno a Iquique con el fin de realizar observaciones *in situ*, realizar conteos y tener una reunión con la encargada de la Oficina de Protección Civil y Emergencias. Originalmente el plan para la visita era contabilizar los autos estacionados en las vías de evacuación entre las 9:30 y las 13:00 dado que en este horario se observa una estabilidad en la cantidad de personas por zona.

El beneficio de contabilizar los vehículos estacionados es que permite mapear grandes áreas de la ciudad en poco tiempo. Además, se contaba con el supuesto de que, las zonas que más viajes atrajeran, más autos tendrían estacionados por lo que se podría realizar una estimación actualizada de los autos por zonas usando este valor como *proxy*. Sin embargo, los vehículos estacionados eran ubicuos. En algunos puntos se llegaba a observar autos estacionados en primera, segunda y tercera fila.

Aunque se mapearon no solo las vías de evacuación, sino que la mayoría de las calles que están bajo la zona de seguridad, se descartó la idea de utilizar este valor como un estimador. Sin embargo, los datos sí resultaron útiles para incluir autos estacionados en las calles. Es importante mencionar que el mapeo de la ZOFRI fue el peor de todos debido a que no se accedió al sector amurallado y, por temas de percepción de seguridad, no se entró en los callejones del sector habitacional en la parte sur de la Macrozona 1.

Con respecto a la entrevista con Vanesa Bravo, Encargada de la Oficina de Protección Civil y Emergencia, se rescatan dos puntos relevantes para este trabajo. El primero es el uso de vehículos en la evacuación de la ciudad. Ella ponía como ejemplo el terremoto del 2014 en el cual, la gente, principalmente en la zona de la ZOFRI, escapaba usando el vehículo, muchas veces con un solo pasajero. La situación escaló tanto esa vez que un camión se cruzó en la calle para impedir que los autos pasaran y así la gente no los pudiera usar. Esto es consistente con lo mencionado por Castro *et al* (2019) en donde hablan de que las grabaciones del terremoto del 2014 en Pisagua se ven autos evacuando.

El segundo punto es que la gente, sobre todo algunos grupos vulnerables, esperan que la municipalidad los ayude a evacuar a pesar de que no exista una coordinación. Ella

ejemplificaba que uno de los hogares de ancianos no evacuó para uno de los últimos sismos debido a que esperaban que este proceso lo llevara la municipalidad.

De esta manera, por los comentarios realizados por Vanesa y por el hecho de que Iquique es la onceava comuna con más vehículos de Chile según el INE, se deben considerar los automóviles en la evacuación. Es posible que en otras ciudades exista la cultura de no utilizarlo para escapar, pero no en esta. Además, es relevante profundizar en la evacuación de personas vulnerables ya que normalmente son olvidadas a pesar de que las tasas de sobre peso y las dinámicas demográficas solo van a provocar que este grupo aumente en número.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Modelación Basada en Agentes y Evacuación

La Modelación Basada en Agentes (MBA) está basada en la idea de agentes autónomos. Este tipo de modelación es denominado *bottom-up* debido a que las características surgen a partir del comportamiento de las entidades que está determinado por un *set* de reglas y objetivos. En base a estos, los agentes tomarán decisiones en cada unidad discretizada de tiempo con respecto a las percepciones que tengan de su ambiente

Debido a este enfoque, es de importancia la correcta caracterización de las interacciones entre agentes y con su ambiente ya que son la suma de estas las que determinan los resultados del modelo. Lo que lleva a que la fortaleza de este tipo de modelación es la capacidad de “representar sistemas descentralizados, altamente

heterogéneos y con entidades activas. Los MBA suelen considerar agentes que no solo difieren en sus características, sino también en sus objetivos y en sus reglas de toma de decisiones” (Solís, 2016).

Este enfoque ha sido utilizado para modelar la evacuación de ciudades ante diferentes catástrofes, tales como incendios y su mitigación (Hirokawa & Osaragi, 2016; Oki & Osaragi, 2018; Osaragi & Hirokawa, 2017), inundaciones (Dawson, Peppe, & Wang, 2011) y tsunamis. Dado que el tercer tipo es el de interés para este estudio, a continuación, se analizará en mayor detalle.

Al revisar la bibliografía disponible, aparece una macro división en los trabajos que se pueden realizar en base al nivel de detalle que consideran las entidades al momento de calcular su velocidad. En un extremo se encuentran aquellos trabajos en que los agentes ajustan su rapidez en base a la densidad de otros agentes que los rodea. En el otro extremo, se encuentra el caso en que los agentes observan a cada entidad a su alrededor y recalculan su dirección y velocidad en base a evadir colisiones. En el presente trabajo, los peatones son modelados siguiendo el principio de densidad y los vehículos con el principio de evasión de colisiones. De esto se observó que el primer extremo se adecua mejor para la macro modelación (nivel ciudad) y el segundo para espacios más reducidos. Las razones vienen dadas por los tiempos de ejecución y por el nivel de detalle que se busca en cada tipo de modelación.

De esta manera, en el extremo de las densidades, el primer trabajo que se encuentra es el de Ignacio Solís (2016; Solís & Gazmuri, 2017). La razón de partir con este se debe que el presente estudio está basado en su tesis de magíster. Él la facilitó, tanto el código de su

modelo como los datos que utilizó para este, con el fin de continuar su trabajo. En la sección “MODELO DE SIMULACIÓN” se revisa en detalle el trabajo de Solís por lo que no se detallará ahora. A grandes rasgos, de este modelo se debe mencionar que simula la evacuación de Iquique en caso de tsunamis. En esta, solo escapan entidades que representan personas utilizando las calles de la ciudad para llegar a edificios de evacuación o a puntos de encuentro que se encuentra sobre una línea establecida como segura.

Los evacuados escapan por sus propios medios y modificarán su velocidad en base a la densidad de personas en frente a ellos y de la pendiente de las calles. En tanto, hay dos tipos principales de evacuados: los lentos y los normales. Los primeros son aquellos que tienen menos de 10 años o más de 65, y los segundos son el resto. Sin embargo, no hay distinción para la población con dificultades permanentes o ayuda para esta.

Similar al trabajo de Solís, es el de Goto *et al* (2012). En este, la población también calcula la velocidad en base a la densidad en frente y se consideran dos grupos de población, los mismos que utiliza Solís (2016). Sin embargo, en este caso, la población se agrupa para ayudar a la parte vulnerable, lo que forma unidades de varias personas que se mueven a la velocidad de la entidad más lenta. Además, incluyen autos y motocicletas a la modelación los cuales calculan su velocidad de manera más detallada ya que se rigen con respecto a otros autos o peatones frente a ellos. Dado a las similitudes de este modelo con el de Ignacio Solís, el trabajo de Goto *et al* será ampliamente utilizado y explicado en la Sección 5.3.

Entre las conclusiones a las que llega es que el uso de vehículos sin restricción provoca peores tiempo de evacuación. Sin embargo, en proporciones controladas encuentran que se agiliza la evacuación.

Mas, Adriano y Koshimura (2013) realizan una modelación de La Punta, Perú en donde integran vehículos y peatones en la evacuación. Ambas entidades calculan sus velocidades con respecto a la densidad que encuentran en frente de ellas, sin embargo, no especifican cuáles son las curvas de densidad/velocidad que utilizan exactamente. En este estudio también existe la posibilidad de evacuar horizontal o verticalmente y hay segmentación etaria en niños, jóvenes, adultos y ancianos.

En tanto, en la modelación de agentes en base a la evasión de colisiones se puede encontrar el trabajo de Yoshida *et al* (2014) en donde los agentes tienen una velocidad de flujo libre y en cada intervalo de tiempo, intentarán desplazar la máxima distancia posible a menos que su trayectoria impacte con la de otro, en ese caso, la entidad realiza una rotación hasta encontrar un vector de desplazamiento posible o concluir que no se puede mover.

Esta modelación luego la verifican con un experimento realizado en pasillos y habitaciones para obtener que los agentes de su modelo tienen un comportamiento similar al de la realidad y que se ajusta a las curvas de densidad/flujo esperadas.

Así mismo, Castro *et al* (2019) crean un modelo de la ciudad de Iquique en donde los agentes se rigen por el principio de *Optimal Reciprocal Collision Avoidance* (ORCA) propuesto por van den Berg *et al.* (2011). En este, tanto autos como evacuados calculan el desplazamiento óptimo que les permite evadir una colisión y al mismo tiempo avanzar

en dirección a un punto de encuentro. Ambos tipos de entidades están caracterizadas por una velocidad de flujo libre que viene dada por una distribución Weibull para cada tipo. En este trabajo, además consideran la posibilidad del bloqueo de calles por la caída de escombros desde los edificios.

De la mano del trabajo anterior, Álvarez (2017) también utilizando ORCA, modela las vías de evacuación, pero en su caso incluye micro vulnerabilidades del espacio urbano como autos estacionados, cambios abruptos en el terreno, puestos comerciales en la calle, postes eléctricos, entre otros. A una de las conclusiones a las que llega es que los vehículos estacionados en las calles contribuyen con el 74% del factor de fricción de las calles. Este factor representa la reducción de velocidades en los peatones generadas por las micro vulnerabilidades.

En conclusión, una de las características en común que tienen todos estos modelos es que no detallan la población vulnerable. Algunos utilizan distribuciones o la edad para modelar población más lenta o rápida, sin embargo, no hay un desglose por distintos tipos de afección y las interacciones que esto puede provocar. Es esta la razón de por qué en el presente trabajo se decidió ubicar y distribuir la población vulnerable (niños, ancianos, personas con alguna condición permanente) lo más fiel a la realidad posible, observar el efecto que tiene sobre el resto de los evacuados y comprobar, si solo este segmento de la ciudadanía utilizara autos, el tiempo total de evacuación mejoraría.

3.2. Modelación de población vulnerable

Para reafirmar el enfoque de esta tesis, se buscó bibliografía sobre supervivencia ante tsunamis. Lo que se encontró fue que después del terremoto del 2011 en Japón se realizó

una gran cantidad de investigaciones y entre ella se encuentran los trabajos de Mahdavian *et al.* (2015), y el de Goto, Mikami y Nakabayashi (2012). El primero, llamado “Factors affecting survival in tsunami evacuation”, en el cual, a partir de encuestas destacan varios factores que influenciaron las tasas de fatalidad, entre ellas están: Ayudar a personas y buscar a miembros de la familia; y el tiempo perdido convenciendo a personas mayores que deben evacuar y ayudándolos a moverse.

En el segundo trabajo, llamado “Fact.finding about the evacuation from the unexpectedly large tsunami of March 11, 2011 in East Japan”, también en base a encuestas, sus principales hallazgos fueron que:

- La distribución de muertos se concentró en el rango de los 60s y 80s años.
- Las familias jóvenes de personas mayores se devolvieron para rescatar a su familiar, y algunos de ellos fueron alcanzados por el tsunami
- La evacuación en auto no puede ser inhibida totalmente.

Con respecto al último punto dicen que, “sin embargo, durante nuestras entrevistas y cuestionarios, recibimos muchas opiniones que enfatizaban la necesidad de evacuar en auto para los adultos mayores y/o discapacitados” (Goto, Mikami, & Nakabayashi, 2012).

De esta forma, se hace patente la necesidad de modelar a la población vulnerable y acompañarla de vehículos porque, a pesar de que la ONEMI recomienda no evacuar en auto y la literatura lo respalda, este tipo de escape no solo se realiza por una pobre educación ante emergencias, sino que por necesidad. Por lo tanto, en las siguientes subsecciones se profundizará en la modelación de la población vulnerable, esto significa

dos grupos principales: el grupo etario de mayor edad de la población y el grupo que tengan alguna dificultad permanente.

3.2.1. Modelación grupos etarios

Para el grupo de adultos mayores, Laxman, Rastogi y Chandra (2010), y Ren *et al* (2019) estudian empíricamente el ajuste al diagrama fundamental del tráfico de este segmento de la población en condiciones de flujo mixto. A la conclusión que ambos llegan es que los adultos y adultos mayores se ajustan a este, pero circulan a menores velocidades.

En particular, el segundo estudio concluye:

“Compared with the Young adults, the elderly show small steps low pace and passive wait. Based on the pedestrian trajectories, the fundamental diagram of the elderly was studied. ...The basic shape of the fundamental diagram for the unidirectional flow of the elderly is consistent with that in the previous researches. However, the speed and flow for the elderly are always smaller than the young adults under the same density situation are. This proves that older people in the same access facilities have lower capacity than the young” (Ren, Zhang, Song, & Cao, 2019).

Con lo anterior como fundamento, cada grupo etario se modeló utilizando una velocidad promedio. A pesar de que no se encontró respaldo empírico de que la población menor de edad sigue el gráfico fundamental del tráfico, se supondrá que lo hacen para que puedan ser incluidos en la simulación. De todos modos, los autores mencionados que modelan el movimiento de la población según densidades siguen este supuesto.

En Galiza, Ferreira y Charles (2011), y Spearpoint y MacLennan (2012) muestran la velocidad de los peatones en función de su edad. En el primero utilizan esta función para simular la disminución de la velocidad en grupo de personas cuando estas circulan por un pasillo y la proporción de la población de adultos mayores aumenta. En tanto, el segundo

estudia condiciones que afectan a la velocidad de evacuación de un edificio. Las que menciona son la edad y la obesidad.

En ambos casos, las curvas de edad/velocidad que utilizan son similares. Sin embargo, Spearpoint y MacLennan (2012) tiene una función para mujeres y otra para hombres. Dado que en la modelación del presente trabajo no se hace tal distinción, se utiliza la del primero. Esta se puede ver en la Figura 3.1.

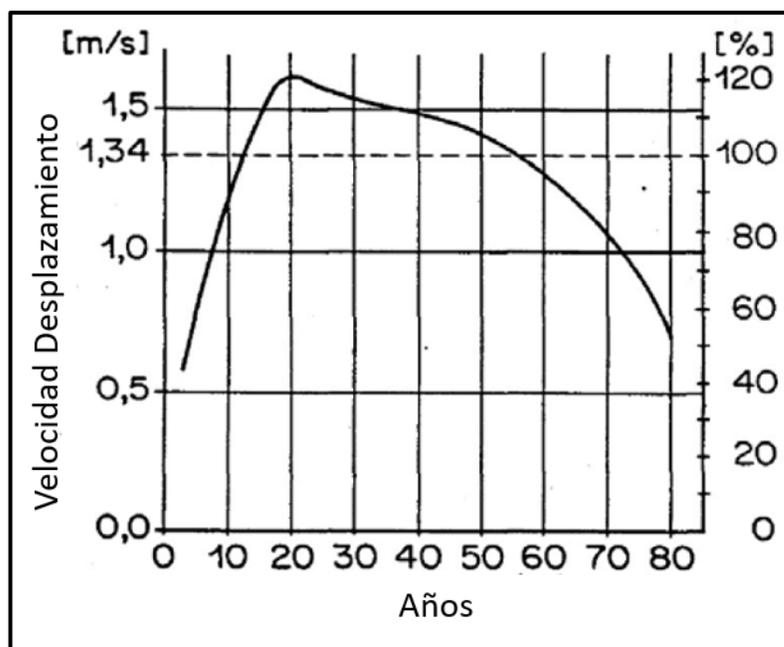


Figura 3.1. Velocidad como Función de la Edad

Fuente: Weidmann (1993), como se muestra en Spearpoint y MacLennan (2012)

Con esta, se utilizan los valores promedios de los rangos etarios que se utilizarán en la modelación, estos aparecen en Tabla 3.1. Los grupos etarios son explicados en la Sección 4.2.2.

Tabla 3.1. Velocidad por Grupo Etario

Grupo Etario	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$
0 a 17 años	1.01
18 a 29 años	1.60
30 a 44 años	1.50
45 a 59 años	1.38
60 y más años	1.05

Fuente: Elaboración Propia en Base a Spearpoint y MacLennan (2012)

La elección de estos grupos se sustenta en imitar lo hecho en el Segundo Estudio de la Discapacidad (Servicio Nacional de la Discapacidad, 2016d). Los detalles se pueden encontrar en la sección 4.2.2.

3.2.2. Modelación población con condición permanente

Con respecto a este grupo, se encontró investigación empírica reciente pero mayoritariamente enfocada en la recolección de datos y búsqueda de recurrencias. Por ejemplo, desde el 2016 existe el proyecto “SiME - Safety for people with physical, mental or age-related disabilities”. Entre sus trabajos se encuentra (Geoerg, Hofmann, & Pulm, 2016; Geoerg, Polzin, Schumann, Holl, & Hofmann, 2018; Geoerg, Schumann, Boltes, Holl, & Hofmann, 2018). En todos ellos se analiza la manera en que distintos grupos vulnerables como personas en sillas de ruedas, con problemas mentales o de edad, evacuan, pero nunca llega a una fórmula o algoritmo que replique las características del movimiento de este grupo.

Por ejemplo, en (Geoerg, Schumann, Boltes, Holl, & Hofmann, 2018), observan como los evacuados en sillas de ruedas en un pasillo generan una disminución de la densidad de personas por metro cuadrado a su alrededor, pero no obtienen una descripción que se pueda utilizar para modelar el problema.

Aunque no se hallaron algoritmos refinados para modelar el comportamiento y los efectos sobre el flujo alrededor en condiciones de congestión, sí existen varios trabajos experimentales que estudian el movimiento de grupos vulnerables en condiciones de flujo libre y el tiempo que les tarda franquear diferentes obstáculos como ascenso y descenso de rampas, giros en 90°, y subir y bajar escaleras (Boyce, Shields, & Silcock, 1999). Así mismo, dada la cantidad de estudios que se han realizado, existen trabajos de revisión tales como (Fahy & Proulx, 2001; Hashemi, 2018) que buscan crear bases de datos para la modelación de la evacuación de población vulnerable, principalmente de edificios.

En esta línea, Christensen y Sasaki (2008) modelan la evacuación de un edificio incluyendo población vulnerable. Para modelar los diferentes grupos, les asignan una velocidad en plano, otra bajando escaleras y otra franqueando obstáculos. Luego, utilizando MBA, cada agente intenta minimizar el largo de su ruta de escape considerando el espacio físico y de otras entidades u obstáculos.

Dadas las similitudes con el presente trabajo, se utilizarán los datos de trabajo de Christensen y Sasaki. Es importante considerar que el nivel de detalle que se alcanzan en las dos simulaciones es radicalmente diferente. En el primero, se modela toda la ciudad, por lo que no es factible modelar cada obstáculo que se encuentra en las calles de Iquique. Mientras que la cantidad de espacio a mapear es mucho menor en un edificio por lo que,

en ese caso, sí se puede. De esta manera, la información de bajar escaleras y franquear obstáculos, no es utilizada.

El segundo punto por considerar es que, mientras que en la investigación de Christensen y Sasaki los agentes se desplazan en base al movimiento que más los acerca a la salida optimizando la distancia recorrida restringida a no chocar; en el presente trabajo las entidades se rigen por una relación entre densidad y velocidad. Esta diferencia se explica principalmente en el mayor tiempo de computación por agente que requiere el primer tipo de modelación por sobre el segundo.

De esta manera, en la Tabla 3.2 se muestran las condiciones y velocidades que se modelarán. Los datos que aparecen en (Christensen & Sasaki, 2008) fueron complementados con un estudio empírico realizado por Jiang *et al* (2012).

Tabla 3.2. Velocidades Según Condición

Condición	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Fuente	ID Código
Sin Condición	1.50	(Goto, et al., 2012)	0
Alguna Condición Física	1.27	(Jiang, et al., 2012)	11
Una Muleta	0.87	(Jiang, et al., 2012)	12
Dos Muletas	0.78	(Jiang, et al., 2012)	13
Silla de Ruedas	0.89	(Christensen & Sasaki, 2008)	14
Silla de Ruedas Eléctrica	0.69	(Christensen & Sasaki, 2008)	15
Invalidez Mental	1.25	(Christensen & Sasaki, 2008)	20
Impedimento Auditivo	1.25	(Christensen & Sasaki, 2008)	30
Impedimento Visual	0.86	(Christensen & Sasaki, 2008)	40

Fuente: En la Misma Tabla

4. DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN

Esta sección se divide en tres partes. La primera indaga en la situación de la población a nivel de Chile y el porqué de la preocupación de modelar el segmento de mayor edad y la parte vulnerable. En la segunda se muestran las encuestas que se utilizaron para estimar la distribución de la población dentro de la ciudad y en la tercera se explica cómo se realizó el cruce de ambas para obtener la estimación final.

4.1. Envejecimiento de la población

El envejecimiento de la población a nivel mundial es un hecho conocido. Para ser más específicos, Agar (2001) menciona que la población mundial en 1999 tenía una media de 26,4 años y el 9,9% eran mayores de 60 años. Estos valores proyectados al 2050 indican que la media se va a haber movido 37,8 años y 22,1% tendrán más de 60 años. En este mismo trabajo, el autor sitúa a Chile entre los países de Latino América y el Caribe con la menor tasa de crecimiento poblacional, siendo esta menor a 1,6%.

Esta tendencia la podemos ver respaldada en las estimaciones y proyecciones que realiza el Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (2018e) posterior a los resultados del Censo 2017.

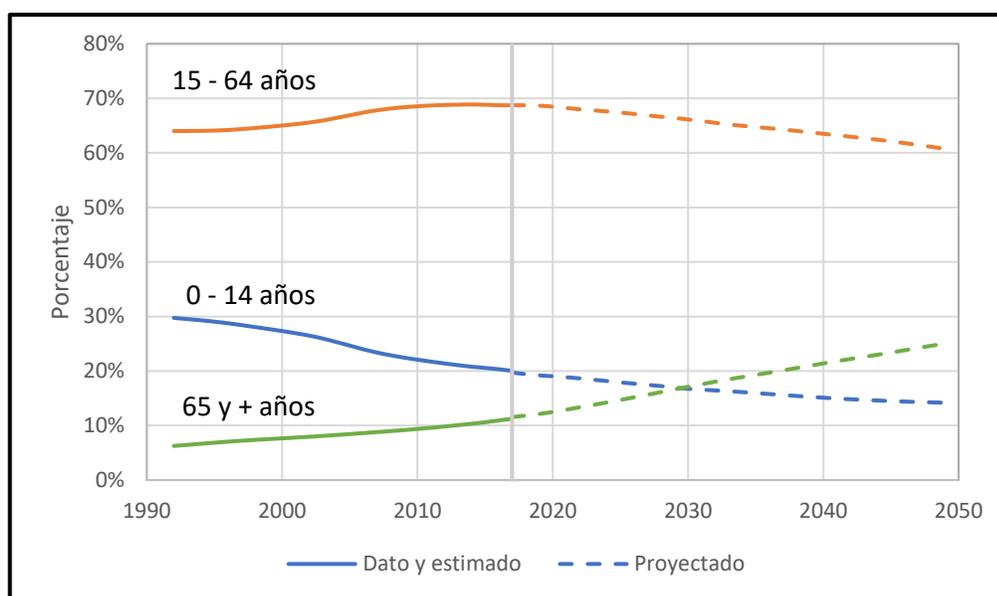


Figura 4.1. Distribución de la población según grandes grupos de edad, porcentajes 1992-2050

Fuente: INE (2018e)

Como se puede ver en la Figura 4.1, la población menor a 15 años ha disminuido constantemente a lo menos desde 1992 y la proyección indica que la tendencia seguirá siendo esta. Por el contrario, la población mayor a 65 años ha aumentado en el mismo periodo de tiempo y lo seguirá haciendo según lo proyectado. Esta relación se mide utilizando el Índice de Envejecimiento que representa la relación entre el segundo grupo recién mencionado dividido por el primero.

En concreto, la relación está graficada en la Figura 4.2 que claramente acusa un rápido aumento de la población de mayor edad por sobre la tasa de natalidad del país.

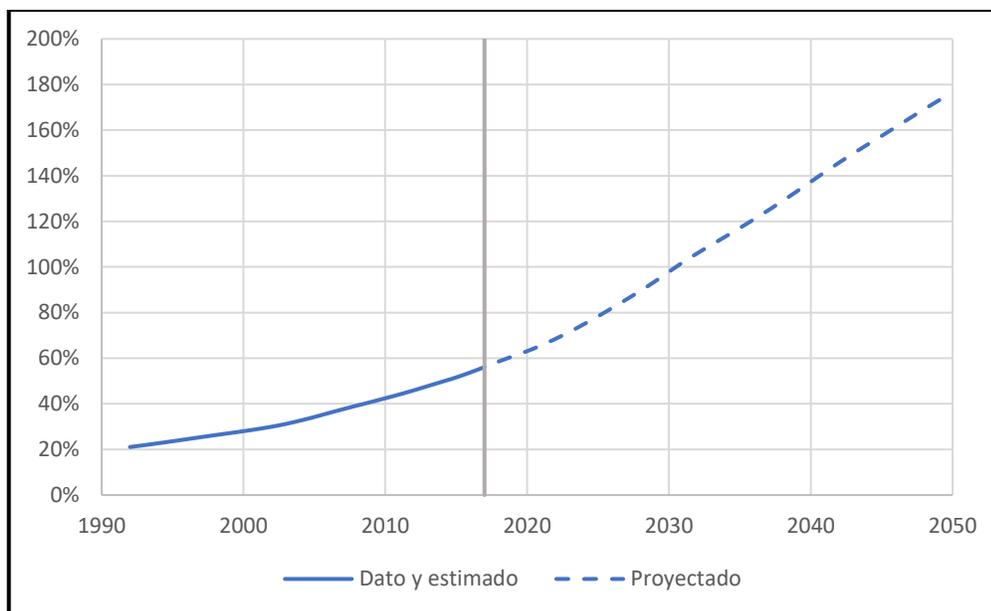


Figura 4.2. Índice de Envejecimiento Estimado y Proyectado, 1992-2050

Fuente: INE (2018e)

No es un problema *per se* el envejecimiento de la población al momento de evacuar sino las dificultades que empiezan a surgir con el aumento de la edad. A partir de los Censos del 2002 y del 2012, se puede observar este fenómeno. En el Censo 2002 se realiza la pregunta “¿Presenta alguna de las siguientes deficiencias?” y las opciones son Ceguera total, Sordera total, Mudez, Lisiado/Parálisis, y Deficiencia mental.

Al segmentar la población en grupos etarios de cinco años, se obtiene una alta correlación entre la edad y la deficiencia “Lisiado”. A nivel nacional es cercana a 1 y en Iquique es algo más baja. Similar es el caso de Sordera, Ceguera y si la persona posee alguna deficiencia. La Mudez no puede ser explicada a partir de la edad y la Demencia Mental disminuye con la edad. Los valores numéricos se pueden ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Correlación Entre Edad y Deficiencias en la Población, 2002

	Chile	Iquique
Lisiado	0.94	0.84
Mudez	0.01	-0.01
Demencia Mental	-0.47	-0.69
Sordera	0.78	0.86
Ceguera	0.87	0.89
Alguna Deficiencia	0.83	0.82

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2003a)

Al segmentar la población observada en el Censo 2012 de igual manera, se obtienen resultados similares. Es importante destacar que la pregunta de este Censo incluye más personas debido a que la pregunta es más amplia en el sentido de que la pregunta del Censo 2002 es un subconjunto de la pregunta del 2012. En el cuestionario aparece “¿Tiene Ud. alguna de las siguientes condiciones permanentes?” y las posibles respuestas, al igual que las correlaciones, aparecen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Correlación Entre Edad y Condiciones Permanentes en la Población

	Chile	Iquique
Dificultad Física y/o de Movilidad	0.92	0.89
Mudez o Dificultad en el Habla	-0.14	-0.41
Dificultad Psiquiátrica o Mental	0.25	0.24
Sordera o Dificultad para Oír aun Usando Audífonos	0.85	0.84
Ceguera o Dificultad para Ver aun Usando Lentes	0.85	0.85
Alguna Condición Permanente	0.88	0.85

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2013)

Siguiendo la misma tendencia que el Censo anterior, se obtienen altas correlaciones al comparar la edad con dificultades físicas, sordera y ceguera. Las dificultades psiquiátricas no están particularmente correlacionadas y las del habla están relacionadas negativamente.

Es relevante hacer un comentario en este punto. En las partes en que se utilice el Censo 2012, solo será como referencia o para observar el comportamiento a grandes rasgos de la población debido a los problemas que tuvo la realización de este. Esta decisión se tomó en base a la omisión de hogares declarada por una comisión de expertos (Ciper, 2013) sumado a que el INE no recomienda su uso, no se puede acceder a la cartografía asociada, no hay compendios de información en su página web como si sucede con los otros Censos y la base de datos solo la facilitan si es que se pide por ley de transparencia del estado.

Aclarado lo anterior, de ambos Censos se ve como en sus grados menos y más severos, las personas comienzan a presentar más dificultades con el aumento de la edad. Esta problemática puede ser abordada desde la perspectiva que usan Rantakokko, Mänty, & Rantanen (2013). Ellos explican el problema usando el modelo ecológico del envejecimiento en donde consideran la movilidad como resultado de la interacción entre el ambiente y el ajuste de la persona a este. Mientras el balance entre estos dos se mantenga, la persona puede funcionar adecuadamente. Sin embargo, cuando se rompe, surgen los problemas de movilidad.

De esta manera, estos investigadores recogen que:

“Las personas con limitaciones de movilidad reportan más barreras en su ambiente que personas sin limitaciones. Ejemplos de barreras normalmente reportados por personas de mayor edad incluyen pobre transporte público, veredas discontinuas o disparejas, soleras, ruido, tráfico pesado, mala iluminación, falta de espacios de descanso, terreno

inclinado, largas distancias a los servicios, y condiciones climáticas.” (Rantakokko, Mänty, & Rantanen, 2013)

Esta combinación está presente en Iquique. Por un lado, una población que cada año envejece y va presentando más dificultades de movilidad y al mismo tiempo, por el lado ambiental, existen barreras como inclinación, veredas discontinuas, alto tráfico y otros problemas que fueron mencionados en la sección 2.

Finalmente se debe considerar la dependencia de la población. Cardona y Peláez (2012) recogen esto como uno de los problemas del envejecimiento. Ellos mencionan que “un estado de salud deteriorado de la población mayor demanda un mayor cuidado, que en varias ocasiones no puede ser proporcionado por su familia, trasladándose la obligación al sistema o a la sociedad”.

Continúan ejemplificando que, en 1950, en América Latina y el Caribe, se requerían 35,5 cuidadores por cada 100 mayores de 65 años y para el 2050 se van a necesitar 48,1 cuidadores por cada 100 mayores de 65 años. De esta manera nos encontramos con una población que es cada vez más vulnerable y dependiente. Específicamente en Chile, podemos observar este fenómeno utilizando el índice de dependencia el cuál viene dado por el resultado de la ecuación (4.1).

$$\begin{aligned} & \text{Índice de dependencia} \\ & = \frac{\text{Población}_{0 \text{ a } 14 \text{ años}} + \text{Población}_{65 \text{ y más años}}}{\text{Población}_{15 \text{ a } 64 \text{ años}}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

De esta manera, se puede ver la evolución del índice en el periodo comprendido entre 1992 al 2050 en la Figura 4.3.

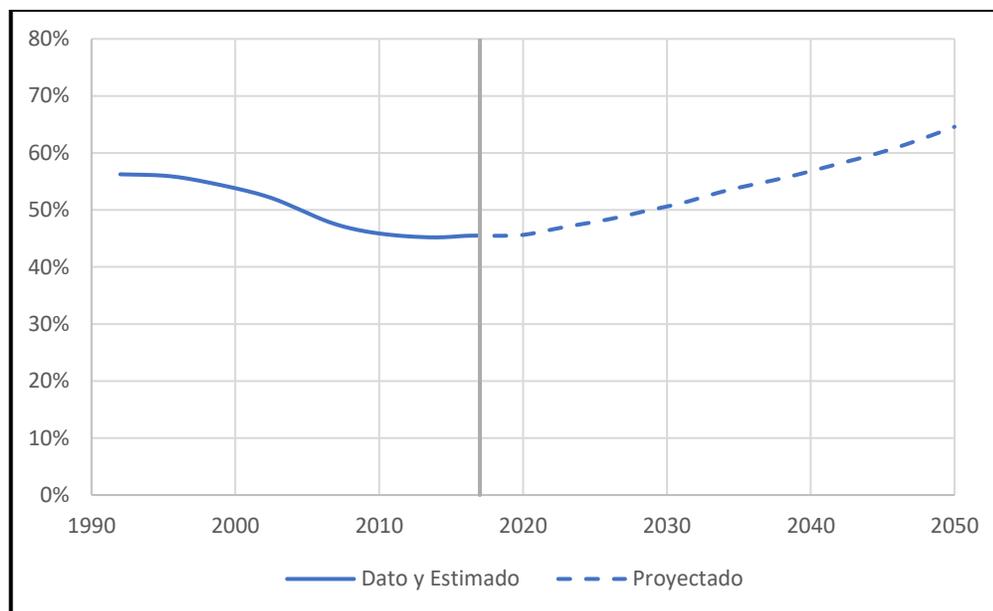


Figura 4.3. Tasa de Dependencia Estimada y Proyectada, 1992 - 2050

Fuente: INE (2018e)

Del gráfico se desprende que en el periodo entre 2010 y 2020 existirá un mínimo esperado de población dependiente. Este mínimo se produce por décadas de disminución de la natalidad lo que conlleva a menos personas en el tramo de 0 a 14 años. Aproximadamente desde el 2020, la tasa de dependencia comenzará a crecer sin detenerse debido a que las personas entre 15 a 64 años disminuirán y comenzará una mayor acumulación de mayores de 65 años provocado por el aumento de la expectativa de vida.

Esto supondrá un nuevo desafío porque a diferencia de comienzos de la década de 1990, aunque alrededor del 2040 habrá una tasa de dependencia similar, en este caso la mayor parte de la población más vulnerable no serán niños, sino que personas mayores de edad como se mostraba en la Figura 4.1.

De esta manera, actualmente el país ya enfrenta un problema dado por los tres factores anteriormente mencionados: aumento de la población de mayor edad; mayor

vulnerabilidad dada por enfermedades o deficiencias provocadas por la edad, principalmente de movilidad; y ciudades que presentan obstáculos y barreras para la población que se hacen más claras con complicaciones de salud. Es más, este problema solo se acentuará con los años debido al comportamiento demográfico.

En la siguiente sección se explicará cómo se obtuvo una estimación para distribuir la población y sus características dentro de Iquique.

4.2. Distribución de la población

Para poder modelar la distribución de la población en la ciudad se utilizan dos encuestas. La primera es la “Encuesta Origen Destino de Viajes: Antofagasta 2010” debido a que esta permite observar el movimiento de la población durante el día. La segunda es el Estudio Nacional de la Discapacidad ya que entrega en detalle enfermedades, dificultades y grados de dependencia de la población chilena. Así, en las siguientes dos subsecciones se explicará cómo fueron utilizadas cada una de estas encuestas y en luego cómo se realizó el cruce de ambas para la modelación de la población.

4.2.1. Encuesta Origen Destino Iquique

La “Encuesta Origen Destino de Viajes: Antofagasta 2010” (EOD de aquí en adelante) divide la ciudad en 72 zonas si se considera las que fueron asignadas para Alto Hospicio y cuatro zonas externas que corresponden a los viajes que provienen desde fuera o que se dirigen a fuera de estas dos comunas. Para el análisis, las zonas de la EOD son agrupadas para coincidir lo mejor posible en las macrozonas planteadas por el plan de evacuación de

Iquique (Dirección de Protección Civil y Emergencia, Dirección Regional de ONEMI Tarapacá, 2017).

Es importante recordar que la EOD se realizó el 2010 por lo que todo el análisis de esta sección corresponde a datos de ese año.

Para elegir la hora en que se realizará la simulación, se utiliza como referencia la macrozona 2 debido a que esta es el centro de la ciudad y atrae la mayor cantidad de viajes en el día. Es importante destacar que la modelación se realizará teniendo en consideración un día laboral fuera del periodo estival para no agregar más factores que afectan la modelación y del cuál no hay una manera directa de representar.

En la Figura 4.4 se observa que la macrozona tiene una población base de aproximadamente 36.600 habitantes aumentando hasta alrededor de las 56.000 personas desde las 10 hasta las 13 horas para luego comenzar a descender establemente hasta volver a cantidad base.

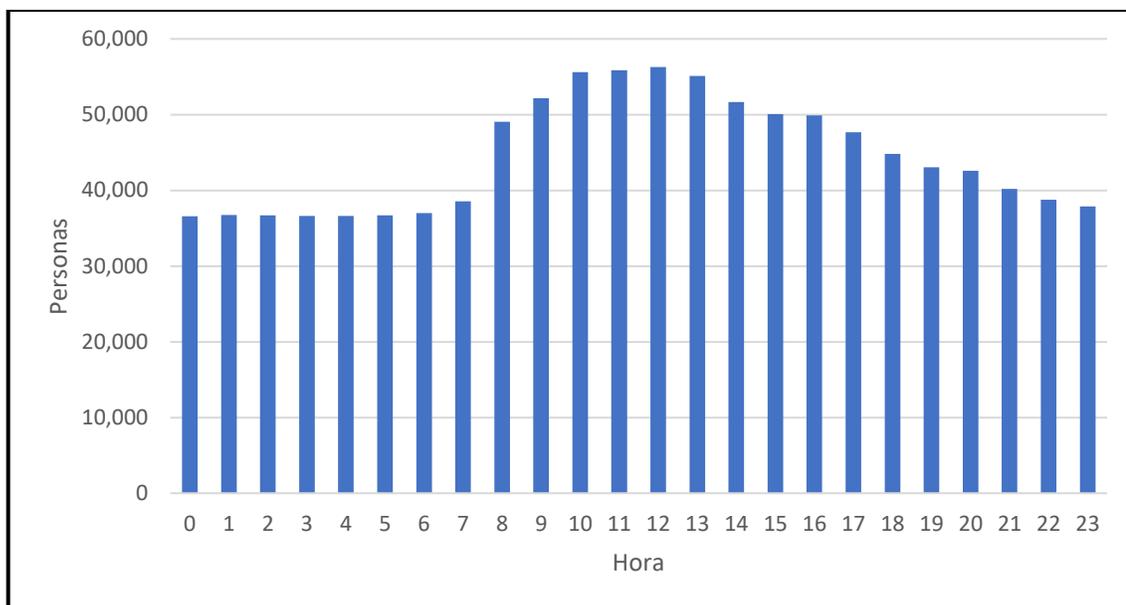


Figura 4.4. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 2

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de TRASA (2012a)

En base a esto, se elige que la modelación sea a las 10 de la mañana debido a que representa el momento en que las personas ya han llegado a sus lugares de trabajo. Esto viene respaldado por la Figura 4.4 y por lo visto en terreno. Desde antes de las 8 am y hasta después de las 9 am había congestión en las avenidas para luego la congestión concentrarse en las calles más pequeñas del centro.

Realizar la modelación suponiendo que el terremoto ocurre a las 10 am facilita el conteo de vehículos estacionados que se muestra en el Anexo B ya que ocurren la menor cantidad de viajes entre zonas si se comparara con cualquier otro momento del día. Además, y más importante, dado que en la modelación no se realiza un análisis meticuloso de la cantidad de personas y vehículos que se está desplazando por la calle, asegurar que la menor parte posible esté utilizando las vías, asegura un mayor apego a la realidad.

Un comportamiento similar pero inverso muestra la macrozona 3, el perfil de esta se puede ver en la Figura 4.5.

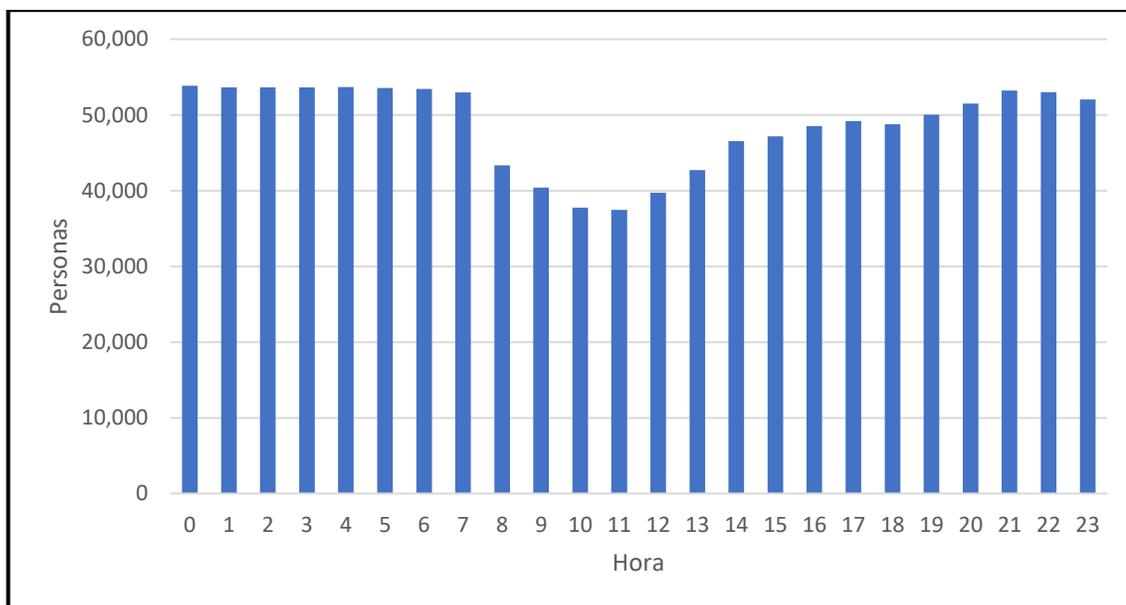


Figura 4.5. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 3

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de TRASA (2012a)

En ella se puede observar que esta macrozona incluye un gran sector residencial de la ciudad debido a las aproximadamente 16.000 personas netas que abandonan este sector todas las mañanas. Esto reafirma la decisión de modelar el escenario diurno a las 10 am debido a que genera la mayor disparidad entre el momento en que los habitantes se encuentran trabajando o estudiando en comparación a cuando están en sus hogares en la noche.

Caso diferente son la macrozona 1 y 4 debido a que las variaciones en la cantidad de personas son menores en estos casos. En la Tabla 4.3, que fue construida al comparar la cantidad de personas entre las 5 y las 10 am, se observa como la macrozona 2 y 3 agrupan cantidades de la población en un orden de magnitud mayor en comparación a las otras

dos. Sin embargo, porcentualmente la macrozona 1 y 2 son las que tienen una variación porcentual mayor, la 3 es menor, pero se mantiene en el orden de magnitud y la 4 tiene la diferencia más pequeña.

Lo anterior se puede explicar en base a que la zona 1 y 2 concentran puntos de trabajo y atraen personas no solo de Iquique, sino que también de Alto Hospicio. De esta manera las dos primeras macrozonas atraen personas que no son habitantes de la ciudad de Iquique propiamente tal, por lo tanto, experimentan un crecimiento mayor que la disminución de las dos últimas. De hecho, el influjo neto a la ciudad es de 6.000 personas.

Tabla 4.3. Variación de personas entre escenario nocturno y diurno por macrozonas

Macrozona	Variación Absoluta	Variación Porcentual
1	5.400	48.0 %
2	19.100	53.7 %
3	-16.100	-30.5 %
4	-2.400	- 8.6 %

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de TRASA (2012a)

Al observar los perfiles con menor variación absoluta, o sea, las macrozonas 1 y 4, nuevamente, son similares pero inversos. La primera tiene dos máximos similares alrededor de las 11 y las 18 con un mínimo a las 14 horas. En cambio, la cuarta tiene dos mínimos locales a las 12 y 16 horas, y un máximo local a las 14 horas. Este comportamiento se puede observar en la Figura 4.6 y la Figura 4.7.

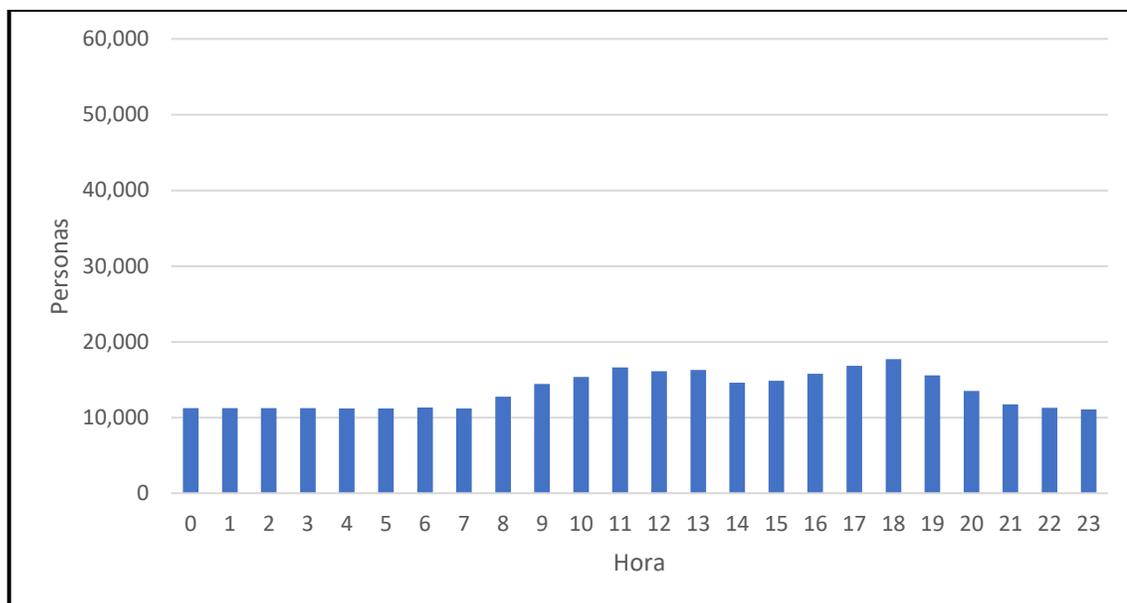


Figura 4.6. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 1

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de TRASA (2012a)

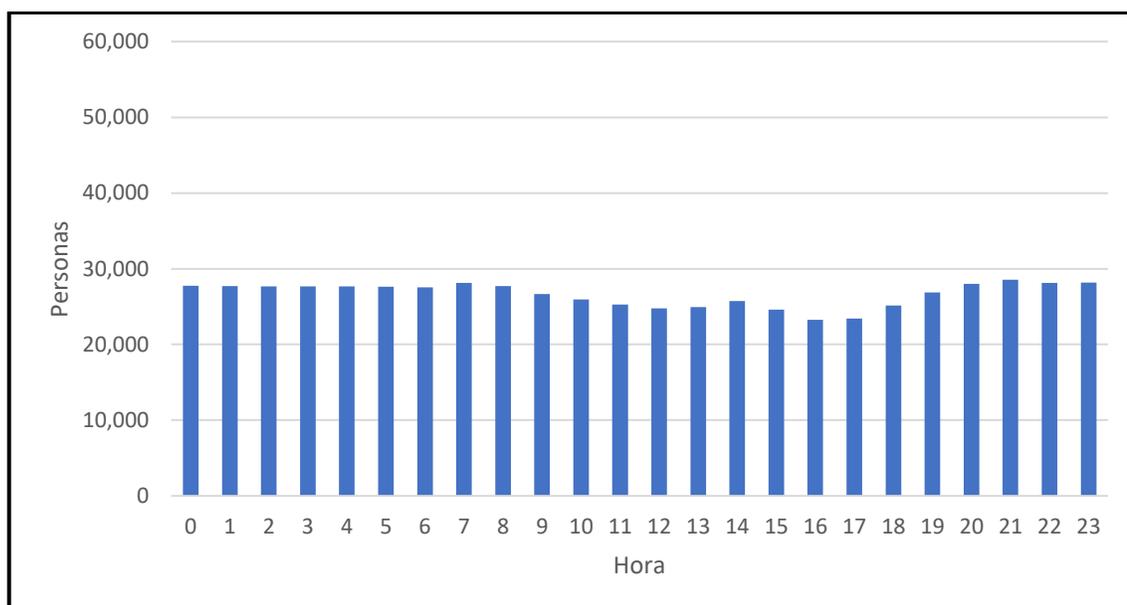


Figura 4.7. Cantidad de Personas por Hora en Macrozona 4

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de TRASA (2012a)

Finalmente es importante destacar en esta sección que la macrozona 1 que corresponde a la ZOFRI. Por lo que se vio en la visita a terreno, en esta debería haber una gran

diferencia en los tiempos de evacuación diurnos y nocturnos debido a que la población que vive en este sector se concentra principalmente cerca de los puntos de evacuación mientras que el comercio y puestos de trabajo, que deberían explicar el aumento del 50% en la cantidad de personas que están en ella, se encuentran a pocos metros sobre el nivel del mar y en los extremos opuestos a las zonas de evacuación.

4.2.2. II Estudio Nacional de la Discapacidad

4.2.2.1. Elección de Encuesta

La decisión de utilizar el II Estudio Nacional de la Discapacidad (ENDisc de aquí en adelante) fue un proceso en donde se fueron descartando otros posibles instrumentos. Esta elección tuvo una mayor dificultad debido a que en la literatura encontrada y mencionada en la sección 3.2 es una decisión común utilizar la EOD para modelar la dinámica de la población dentro de la ciudad, pero las dificultades de la población simplemente se estiman usando una distribución o haciendo algún supuesto relativo a la edad.

De esta manera, el primer paso fue revisar las preguntas y datos de los Censos más recientes para determinar si serían útiles para modelar la población vulnerable. La ventaja de trabajar con este instrumento es que son fuentes completas y determinísticas lo que ayuda a disminuir la cantidad de estimaciones que se realizan para la modelación de la ciudad. Sin embargo, al revisar los Censos del 2002, 2012 y 2017, inmediatamente hay que descartar el tercero porque en el cuestionario de ese año (Instituto Nacional de Estadísticas Chile, 2017c) tomaron la decisión de no realizar una pregunta relacionada a deficiencias o condiciones permanentes de salud.

En cambio, los Censos del 2002 y 2012 sí consideran esto. Como se mostró en la sección 4.1 las correlaciones entre grupos etarios y cantidad de personas afectadas por alguna dificultad son similares en ambos Censos, sin embargo, el porcentaje de la población afectada es radicalmente diferente.

Por un lado, el total de población afectada al 2002 con alguna deficiencia a nivel nacional era de un 2.21%. En la Figura 4.8, se puede observar como la deficiencia “lisiado” es la más presente con un 0.90% del total de la población, seguida por la “demencia mental” presente en 0.65% de los casos.

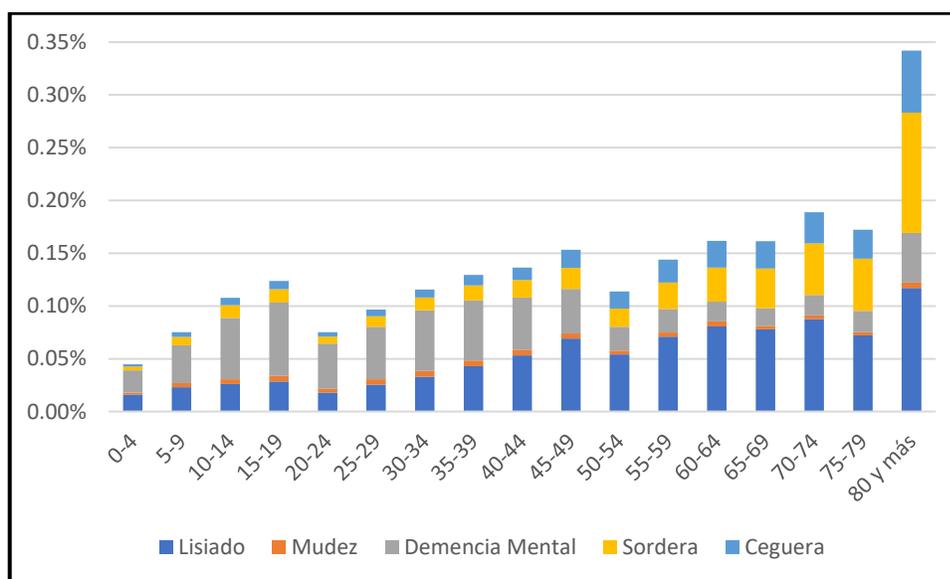


Figura 4.8. Proporción de Deficiencias en la Población por Grupo Etario, Chile 2002

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2003a)

Por el otro lado, el total de la población con alguna condición permanente al 2012 es 12,74%. En la Figura 4.9, se puede observar como la condición “dificultad física y/o de movilidad” es la más presente con un 5.91% del total de la población, seguida por “Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes” presente en 5.35% de los casos. El

detalle completo de la distribución de la población del año 2002 y 2012 se encuentra en el Anexo C.

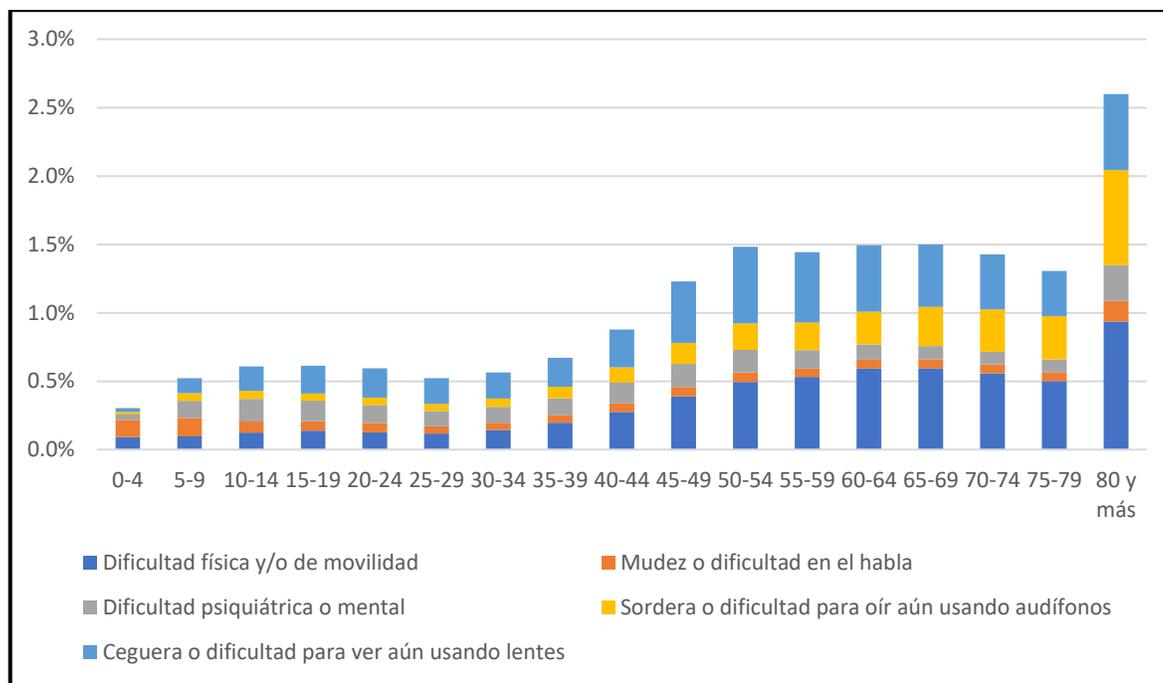


Figura 4.9. Proporción de la Población con Condiciones Permanentes por Grupo Etario, Chile 2012

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2013)

En primer lugar, el problema que surge al observar estos datos es que hay una gran disparidad generada por la pregunta que se realiza. Como se mencionó en la Sección 4.1, la pregunta del Censo 2002 es “¿Presenta alguna de las siguientes deficiencias?” y la del 2012 es “¿Tiene Ud. alguna de las siguientes condiciones permanentes?”. Esta diferencia impide análisis comparados a través de los años debido a que se estarían contrastando grupos diferentes, lo que es un sin sentido.

En segundo lugar, esta disparidad en el 2,21% del total en el 2002 contra el 12,74% del total en el 2012 muestra que se necesita usar un instrumento más sensible debido a

que, si por ejemplo se usara el Censo del 2002, se subestimaría la población con dificultades y si se usara el del 2012, puede que se sobrestime debido a que, al disponer de solo una pregunta, se esconde demasiada información.

En tercer lugar, esta diferencia en las preguntas genera dos grupos en las bases de datos analizadas. El primero es el del Censo 2002. En este conjunto se incluye el recién mencionado y el de 1992. Para el caso de 1992, se puede ver en la base de datos respectiva (Instituto Nacional de Estadística Chile, 1993) que las preguntas, en ambos casos, fueron las mismas.

En tanto, el segundo grupo es el del Censo 2012 en el cual se encuentran a este mismo, la encuesta CASEN 2015 y 2017, y el ENDisc 2015. Para la encuesta CASEN 2015 y 2017 esto se puede ver en los cuestionarios respectivos: Centro Microdatos (2015) y Centro UC, Encuestas y Estudios Longitudinales (2017). En el caso del ENDisc, Servicio Nacional de la Discapacidad (2016b). Todos estos instrumentos de medición comparten la misma pregunta sobre discapacidad.

Es importante destacar el hecho de que, dada la invalidación del Censo 2012 debido a los fallos metodológicos que tuvo, dificulta la validación de la proporción de personas con condiciones permanentes para las dos encuestas CASEN y para el ENDisc ya que las preguntas no son comparables directamente con el Censo 2002. Sin embargo, esto no es un problema del presente estudio y se trabajará con el supuesto de que no hay ningún problema en este aspecto.

Continuando con el proceso de elección de un instrumento, dado que los Censos fueron descartados para generar el escenario, el siguiente paso fue revisar las encuestas

del segundo grupo. La primera opción fue elegir la CASEN 2015 o 2017 debido a que tienen muestras de 266.968 habitantes (Centro Microdatos, 2016) y 216.439 habitantes (Centro UC Encuestas y Estudios Longitudinales, 2018), respectivamente. Incluir una mayor cantidad de habitantes es positivo debido a que se corre un menor riesgo en que partes pequeñas de la población queden sin ninguna observación debido a los métodos de muestreo y selección de hogares.

Sin embargo, en el módulo de salud de ambas el enfoque principal es el acceso y utilización de servicios de la población. Las dificultades físicas o las consecuencias de estas se reducen a siete preguntas idénticas en ambas encuestas. Esto provoca que las dos no sean adecuadas para la modelación.

Finalmente, se concluye que la mejor opción es utilizar el ENDisc dado el especial enfoque que tiene. Entre los principales puntos de interés para la modelación son que, además de preguntar por las condiciones permanentes, el Módulo C de esta entra en detalle en una lista de enfermedades que van desde físicas a mentales. Además, en el Módulo F indagan en los factores ambientales de las personas como por ejemplo el acceso y uso de dispositivos de ayuda como silla de rueda, por ejemplo. El detalle puede ser visto en el cuestionario de esta encuesta (Servicio Nacional de la Discapacidad, 2016b).

La mayor diferencia con todas las herramientas pasadas, son las variables generadas por el mismo estudio. En específico, las dos variables que gradúan la dependencia funcional de adultos y niños en cuatro categorías: “No dependiente, Dependencia Leve, Dependencia moderado, y Dependencia severo” (Servicio Nacional de la Discapacidad, 2016c). En el ENDisc definen a la dependencia funcional como:

“El estado de carácter permanente en que se encuentran las personas que, por razones derivadas de una o más deficiencias de causa física, mental o sensorial, ligadas a la falta o pérdida de autonomía, requieren de la atención de otra u otras personas o ayudas importantes para realizar las actividades esenciales de la vida.” (Servicio Nacional de la Discapacidad, 2016d)

Lo más relevante del enfoque dependencia funcional es, como explica el Servicio Nacional de la Discapacidad (2016d), de la población nacional en situación de discapacidad, el 40.4% también es dependiente funcionalmente; lo que equivale a 1,052,787 personas. Así mismo, 128,123 mayores de 18 años están en situación de dependencia funcional pero no presentan ninguna discapacidad. De esta manera, el ENDisc ayuda a discriminar entre aquellas personas que van a necesitar ayuda para evacuar de quienes no la van a necesitar.

De esta forma, este estudio permite diferencia a las personas que van a necesitar ayuda para evacuar, si estarán usando dispositivos de ayuda al momento de hacerlo y cómo su enfermedad puede afectar el desplazamiento. Sin embargo, al revisar el libro de resultados (Servicio Nacional de la Discapacidad, 2016d) y la base de datos (Servicio Nacional de la Discapacidad, 2016a) se hace claro que este estudio tiene a lo más un límite regional, haciendo que mayor desagregación no tenga validación estadística ni sentido.

4.2.2.2. Problema desagregación II ENDisc

El problema es provocado principalmente por el tamaño de la muestra. Esta es de 39,886 personas lo cual lo coloca en un orden de magnitud menor en comparación a los más de 200,000 registros realizados por las encuestas CASEN. Aunque a nivel nacional esto no es un problema debido a que hay suficientes observaciones para que todos los grupos tengan registros, cuando se observa a nivel regional - en este caso Tarapacá - más

de la mitad de los grupos no tiene observaciones. Incluso al dejar de ocupar los grupos etarios cada cinco años cambiando a los que utilizan en el propio ENDisc y que se muestra en la Tabla 4.4., hay varios grupos que no tienen información. Por ejemplo, en todo el grupo etario de 18 a 29 años, no hay ninguna observación para las condiciones permanentes. El detalle se puede ver en el Anexo D.

Tabla 4.4. Grupos Etarios II ENDisc

Grupo Etario
0 a 17 años
18 a 29 años
30 a 44 años
45 a 59 años
60 y más años

Fuente: Elaboración Propia en Base a (2016d)

Esto provoca que los factores de expansión de la encuesta no tengan ninguna utilidad dado que se van a multiplicar por cero. De esta manera, si se utilizaran los datos de Tarapacá del ENDisc para modelar la evacuación de Iquique resultaría que cualquier persona entre los 18 y 29 no tienen ninguna dificultad, lo que no tiene sentido después de ver los datos censales. Para aclarar, no se revisan los datos de este estudio sobre Iquique debido a que no hay un nivel de desagregación por comunas.

A falta de datos exactos de la comuna de Iquique, se verificó si en los Censos se puede observar una diferencia entre la capital de Tarapacá en comparación al resto del país. En caso de que no haya diferencia los datos se pueden utilizar en la ciudad directamente. En

la Figura 4.10 se puede ver la distribución de la población con alguna condición permanente en la ciudad de Iquique.

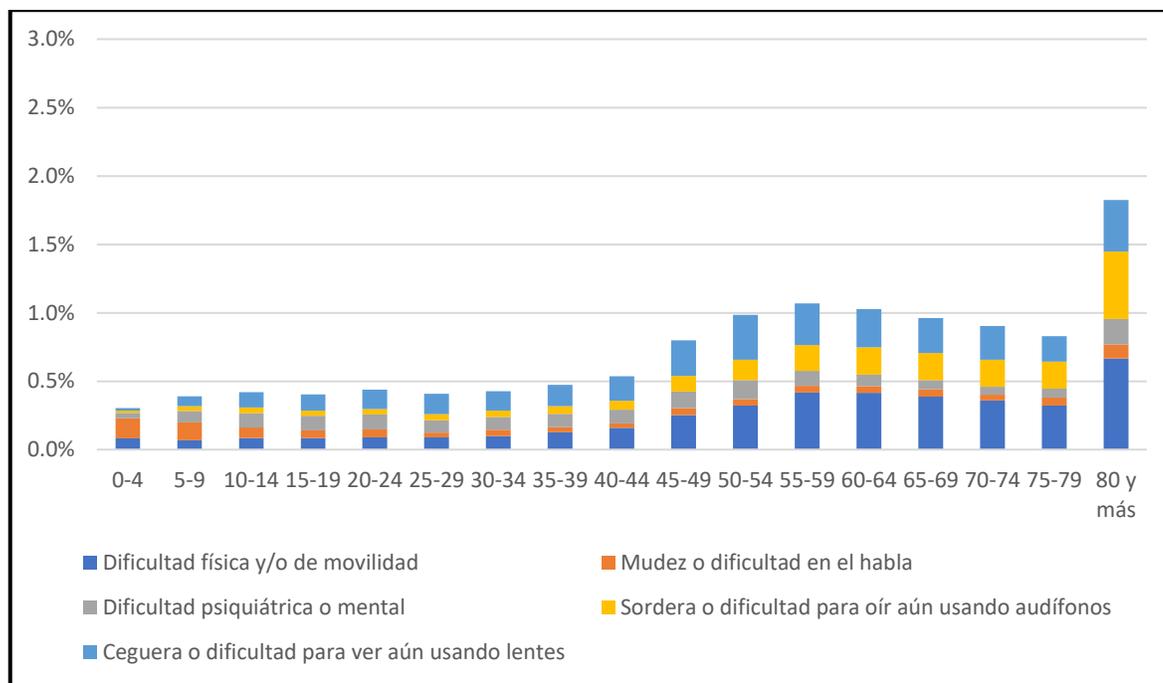


Figura 4.10. Proporción de la Población con Condiciones Permanente por Grupo Etario, Iquique 2012

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2013)

Al comparar este gráfico con el de la Figura 4.9, se aprecia que en cada grupo etario hay, en el total de todas las condiciones, menor cantidad de personas afectas. Al agrupar todas las dificultades para el año 2012, a nivel nacional, el 12.74% de la población presenta a lo menos una dificultad de algún tipo mientras que en caso de Iquique este valor llega al 9.08%. Sin embargo, este valor se puede refinar al considerar que hay mayor similitud al considerar la parte urbana de Chile dado que la comuna de Iquique es principalmente urbana.

En este segundo caso, la parte urbana de Chile tiene un 11.99% de la población con a lo menos una condición permanente mientras que el 9.08% de la población urbana de Iquique tiene a lo menos una condición. El valor en el caso de Iquique no cambia entre la comuna entera y la parte urbana porque la parte rural es casi inexistente.

En tanto, la distribución de cada dificultad sobre el total de personas con alguna condición permanente se muestra en la Tabla 4.5. De esta se puede ver que en ningún caso tiene una diferencia mayor al 10.00% a excepción de la “Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes”. Es importante mencionar que también hay mayor similitud entre el desglose de la parte urbana de Chile con Iquique que al no realizar esta discriminación.

Tabla 4.5. Proporción de Personas con Determinada Dificultad Sobre el Total de Ciudadanos con al Menos una Condición Permanente, Chile e Iquique.

	Chile Urbano	Iquique
Dificultad física y/o de movilidad	46.4%	44.3%
Mudez o dificultad en el habla	10.5%	11.9%
Dificultad psiquiátrica o mental	17.6%	18.2%
Sordera o dificultad para oír aun usando audífonos	23.1%	23.3%
Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	42.0%	36.6%

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2013)

Por lo tanto, finalmente se decide utilizar el Segundo Estudio de la Discapacidad para modelar la presencia de enfermedades y discapacidades en la ciudad de Iquique con dos salvaguardas. La primera es que solo se utilizarán los datos urbanos del Estudio con el fin de replicar la situación de Iquique ya que esta localidad tiene mayores similitudes con la

parte urbana de Chile que con la rural. La segunda salvaguarda es que se debe esperar una sobre estimación de la cantidad de personas con alguna condición permanente en el modelo debido a que la comuna estudiada tiene un menor porcentaje que el país considerado en su totalidad, tanto urbana como rural. Sin embargo, sigue siendo la mejor fuente de datos disponible por lo que se utiliza de todos modos.

4.2.3. Cruce de encuestas

Para realizar el cruce de ambas encuestas se utilizaron dos variables que se consideraron relevantes y que comparten la EOD y el ENDisc. La primera es la edad de la persona y esta es importante debido a que, como se mencionó en la sección 4.1., existe correlación entre el aumento de la edad y la aparición de diferentes condiciones permanentes. De esta manera, se afiata el cruce al considerar una variable importante para la ENDisc.

La segunda es el propósito del viaje de la EOD contra las variables de si la persona estudia o trabaja del ENDisc. La razón para este cruce es que al observar la variable “Propósito ESTRAUS” de la Encuesta Origen Destino se puede observar que el 68.2% de los viajes en la mañana se pueden explicar porque las personas están viajan a trabajar o a estudiar, el detalle se puede observar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Cantidad de Viajes por Propósito entre las 6 am y las 10 am en las comunas de Iquique y Alto Hospicio.

Propósito Viaje	Cantidad	Porcentaje
Trabajo	66,806	33.5%
Estudio	69,202	34.7%
Otro	63,243	31.7%
Total	199,251	100.0%

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de TRASA Ingeniería Ltda. (2012a)

Como comentario, se utiliza la variable “Propósito ESTR AUS” y no “Propósito” debido a que la primera es una simplificación de la segunda. Además, ESTR AUS es un programa de modelación a nivel de ciudad de sistemas de transporte urbano utilizado en Chile para evaluaciones de proyectos. Entonces, dadas las similitudes con la modelación que se lleva a cabo en este trabajo con ESTR AUS, se considera acorde y más simple usar la primera variable.

Continuando con la explicación, del ENDisc se identifican los habitantes que trabajan o estudian y luego estos se distribuyen dentro de la ciudad utilizando el propósito de la EOD. Para hacer esta distribución se programó un algoritmo que realiza el cruce de datos, este proceso se puede esquematizar de la siguiente manera:

Esquema del Algoritmo de Distribución:

Input:

- Datos Encuesta Origen Destino
 - Grupo Etario

- Hora Inicio del Viaje
 - Hora Termino del Viaje
 - Factor de Expansión
 - Propósito ESTRAUS
 - Zona Origen
 - Zona Destino
 - Zona Hogar
- Datos Estudio Nacional Discapacidad
 - Grupo Etario
 - ID discapacidad, previamente generado en base a condiciones permanentes, uso de dispositivos de ayuda y enfermedades.
 - Necesidad de ayuda, previamente generado en base a variable de dependencia funcional

Algoritmo:

- (i) Obtención de la proporción de personas con determinada dificultad, necesidad de ayuda y ocupación (estudio o trabajo) en base al total del grupo etario a los datos del ENDisc.
- (ii) Proyección de las proporciones de (i) en cada grupo etario de todas las zonas de la EOD. Esto genera que en cada zona de la ciudad exista una cantidad de personas con dificultades y dependencia que corresponde a la cantidad de población de cada grupo etario multiplicado por la proporción de (i).

- (iii) La EOD tiene la lista de viajes con hora de inicio y termino que realiza cada persona en un día común y el factor de expansión correspondiente. Comenzando en el primero, se mueve la cantidad de personas que el factor de expansión estima desde la zona de origen a la de destino.
- (iv) Para determinar el subgrupo del cuál se restará en el origen, por ejemplo, el subgrupo de las personas que son del tercer grupo etario, con cierta dificultad permanente, con necesidad de ayuda para desplazarse y trabaja, se realizan los siguientes pasos:
 - a. Se obtiene el total de personas de la zona de origen que coinciden con el grupo etario y su ocupación con el propósito del viaje. O sea, las personas que su ocupación es trabajar se asignan a los viajes con propósito “Trabajo”. Así mismo para estudiantes. Las personas que no trabajan ni estudian se asignan a los viajes con un propósito que no es trabajo o estudio.
 - b. Se calcula la proporción de cada subgrupo dado el total actual obtenido en a.
 - c. Aleatoriamente se elige un grupo en donde la probabilidad de elección es igual a la proporción obtenida en b.
 - d. Se descuenta una unidad, imaginando que es una persona, de ese subgrupo en el origen y se suma en el destino con todas las características de este.

- e. Se repite hasta que se haya descontado una cantidad igual al factor de expansión en la zona de origen.
 - f. Se realizan los pasos del a. al e. para el siguiente viaje hasta que estos se acaben.
- (v) En caso de que se acaben las personas con una ocupación igual que el propósito del viaje, se siguen estos pasos:
- a. Se elige un grupo que tenga una ocupación distinta pero dentro del mismo grupo etario dado que la edad tiene correspondencia con las dificultades. Si originalmente se buscaban personas que trabajen y ese grupo estaba vacío, se elige el grupo de estudiantes o el que no realiza ninguna acción.
 - b. Si el grupo etario está vacío, elegir otro manteniendo la ocupación original dada por el propósito. Se prefiere un grupo etario que sea lo más cercano al original.
 - c. Si el cambio también resulta en un conjunto que ya no tiene personas, realizar a.
 - d. Iterar b. y c. hasta que se haya descontado una cantidad igual al factor de expansión en la zona de origen.
- (vi) Excepciones:
- a. Los viajes no originados en el hogar no se consideraron porque estos provienen de una zona externa de Iquique u Alto Hospicio.

Output:

- Matriz de dos dimensiones de la distribución de personas a cierta hora en dónde en una de las dimensiones se encuentran las zonas y en la otra los subgrupos dados por todas las combinaciones de grupo etario, necesidad de ayuda y discapacidad.

Como aclaración de los *inputs*, el “ID discapacidad” está basado las categorías elegidas en la Sección 3.2. En tanto la “Necesidad de Ayuda” viene dada, en el caso de los adultos, por la variable “dependencia_adulto” y la persona necesitara ayuda si tiene un grado leve, moderado o severo de dependencia. En el caso de los menores de 18 años, debido a que no existe una variable de dependencia en el estudio para los niños, esta vendrá dada por si tienen alguna condición de larga duración, otras enfermedades o si tiene cuidador.

Con todo lo anterior se distribuye la población, considerando sus dificultades y suponiendo que son las 10 am para el escenario diurno, como se mencionó en la Sección 4.2.1. En tanto, para el nocturno se eligen las 4 am dado que la gente se encuentra en sus hogares a esa hora.

4.3. Distribución de los vehículos

Como se mencionó en las Sección 2, la ciudad de Iquique tiene un parque automotriz de gran tamaño. Situación empeorada debido a que las señalizaciones y reglas de estacionamiento son ignoradas y no impuesta por la autoridad. Resultando, sobre todo en las zonas cercanas al centro, en autos mal estacionados en las calles, bloqueando pistas enteras, incluso vías exclusivas para transporte público. De esta manera es relevante

incluir los vehículos debido a que los evacuados de todos modos los van a utilizar a pesar de que las autoridades desalientan esta acción, lo que fue mencionado en la Sección 3.

Por lo tanto, para incorporar los vehículos al modelo, se vuelve a utilizar la EOD. En la siguiente sección se explicará cómo se distribuyeron los vehículos disponibles.

4.3.1. Encuesta Origen Destino

Para distribuir los vehículos, el primer paso es determinar cuáles se considerarán. En el cuestionario de la EOD incluyen una lista de 21 posibles opciones de vehículos que incluyen vehículos de uso particular, de carga y de transporte público. Sin embargo, dado que esta encuesta está basada en hogares y el enfoque de la estimación es que el total de vehículos sean los “que son utilizados por las personas como un modo de viaje para el hogar y que se encuentren en correcto funcionamiento” (TRASA Ingeniería Ltda., 2012b), sólo se consideran los siguientes tipos de vehículos: Auto; Camionetas y Sport Utility Vehicle; Furgón, Van o Miniván; y Furgón escolar. Todos los tipos de vehículos se pueden ver en el Anexo E.

El siguiente paso consiste en ubicar en qué zona se encuentran estos vehículos. Para lograr esto, se ubican todos los hogares en sus respectivas zonas lo que conlleva a que los vehículos también estén localizados. Luego, cada registro de hogar se multiplica por el factor de expansión correspondiente para obtener que, al 2,010, hay 43,636 vehículos que son utilizados por los hogares. Esta cifra es una subestimación del parque automotriz total, como se explica en el Informe Final de la encuesta. La diferencia se puede observar en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Comparación del Parque Vehicular al año 2010

	Dato Municipalidad	Estimación EOD	% Diferencia
Iquique	50,432	31,812	-37%
Alto Hospicio	14,370	11,824	-18%
Total	64,892	43,636	-33%

Fuente: TRASA Ingeniería Ltda. (2012b)

Sin embargo, como se mencionó, el enfoque de la EOD está en vehículos utilizados por los hogares y en funcionamiento por lo que los autores del Informe Final de la encuesta descartan que sea un problema grave.

Una vez ubicados los vehículos en su zona de origen, el siguiente paso es ubicarlos en algún tipo de estacionamiento. Dado la modelación que se llevará a cabo, solo interesa saber si los vehículos se estacionan en la calle o en otro lado. Para determinar esto, se utiliza la pregunta sobre el tipo de estacionamiento realizada en la encuesta. De las seis posibilidades solo se considera la opción “Calle” como quienes se estacionan en la calle. El resto de las opciones no deja totalmente claro si alguien se estacionó en un espacio de la vía de evacuación. Por ejemplo, alguien pudo ocupar un estacionamiento al costado de la calle, justo afuera del lugar donde iba, lo que ocupa espacio de la vía de evacuación, sin embargo, pudo responder a la pregunta del estacionamiento diciendo que dejó el auto en “Lugar a donde fue”. La lista completa de opciones se puede ver en el Anexo E.

Además, ni en la Base de Datos ni en el Informe Final hay una aclaración de la manera en que se preguntó, por lo que se decide subestimar la cantidad de autos estacionados en algún punto que obstruye la calle antes que inflar el valor.

Con la información de dónde estaciona la gente, se realiza el siguiente paso en la distribución. Dado que se conocen los viajes que realiza una persona en un día común, se utiliza el último viaje que haya terminado en la zona del hogar y que se realice en vehículo para determinar cuál es el estacionamiento al comienzo del día siguiente. Esto suponiendo que el último estacionamiento que coincide con la zona del hogar es el lugar en donde el vehículo pasa la noche.

Esto genera una matriz de dos dimensiones en donde en una están las zonas y en la otra el tipo de estacionamiento. Es importante mencionar que no todos los vehículos son asignados a un tipo de estacionamiento por lo que se realiza el supuesto que estos no terminan estacionados en la calle, que es lo que se quiere determinar. Esto probablemente porque la cantidad de vehículos se obtiene con el factor de expansión de hogares y los viajes con el factor de expansión de personas, los que no necesariamente son iguales. Además, si el vehículo no se utiliza en un día laboral, no es posible saber dónde se estaciona.

Ubicados los vehículos en una zona y en un tipo de estacionamiento, el código revisa todos los viajes que se realizan y comienza a restar cantidades en los orígenes y sumar en los destinos en caso de que estos se hayan realizado por una persona que se desplazó en modo “Auto Chofer” antes de la hora de corte que representa el inicio de la simulación. Este último dato se origina de la variable “Modo” y considera nueve diferentes modos de viaje. La razón de solo considerar solo “Auto Chofer” es para evitar doble conteos que podría generar si se considera también, por ejemplo, a los que viajan como “Auto Acompañante”.

De esta manera se logra distribuir los vehículos en la ciudad, con una aproximación del tipo de estacionamiento y en el horario que se desea modelar. Esto último permite completar el corte temporal diurno y nocturno. Para el diurno se elige las 10 am y para el nocturno las 4 am debido a que los viajes laborales empiezan a generarse desde las 6 am.

4.4. Actualización a corte temporal 2019

Con lo desarrollado en la Sección 4 se obtiene la distribución de personas y vehículos en la ciudad para el año 2010. Sin embargo, el conteo realizado en la ida a terreno fue hecho a mediados del 2019. Por lo tanto, para poder simular los escenarios en el corte del 2019 se debe actualizar la población y el tamaño del parque automotriz. En las siguientes dos subsecciones se explica cómo se realizó.

Es importante destacar que la validación fue hecha con datos del corte temporal 2010 para disminuir la cantidad de ponderadores involucrados en la estimación de datos.

4.4.1. Actualización población

Para actualizar la población y los vehículos se divide el análisis en la comuna de Iquique y Alto Hospicio. A pesar de que ambas generan una conurbación, tienen un comportamiento marcadamente diferente en términos de crecimiento de población. Esto se puede observar en la Tabla 4.8. Mientras que Iquique crece un 52%, Alto Hospicio lo hace un 116%.

Tabla 4.8. Población comunas Iquique y Alto Hospicio.

	Iquique	Alto Hospicio
Censo 2002	125,776	50,215
Censo 2017	191,468	108,375

Fuente: INE (2003a; 2018a)

Además de esta división, también se separa en los cinco grupos etarios que fueron planteados previamente debido a que ninguno crece en la misma medida que el otro.

De esta manera, utilizando el Censo 2002 y 2017 se formuló una recta que une ambos tiempos para los diez casos. Posteriormente se determinó la tasa de crecimiento de la población entre el 2010 y 2019 para llevar los datos de la EOD del 2010 al 2019. Estos ponderadores se pueden observar en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Factores de expansión poblacionales 2010 - 2019

	Iquique	Alto Hospicio
0-17	1.18	1.32
18-29	1.20	1.52
30-44	1.25	1.34
45-59	1.28	1.61
60 y más	1.38	1.69

Fuente: INE (2003a; 2018a)

4.4.2. Actualización vehículos

Para actualizar el número de vehículos se realizó una regresión entre este valor desde el 2008 y el PIB de Chile. A partir de la información histórica del parque automotriz que entrega el INE (Instituto Nacional de Estadística Chile, 2019), y el PIB hasta el tercer trimestre del 2019 (datosmacro, 2019) se obtiene que hay una alta correlación entre el parque automotriz y el PIB. En particular, la correlación es de 0.98 para Iquique y de 0.94 para Alto Hospicio.

En la Tabla 4.10 se presenta la regresión lineal realizada entre estos valores.

Tabla 4.10. Estimación Parque Vehicular en Base al PIB

	Intercepto	Factor PIB	Stadístico t
Iquique	-7,996	0.19	15.34
Alto Hospicio	25,804	0.15	7.98

Fuente: Elaboración Propia en Base a DatosMacro (2019) y INE (2019)

Finalmente se calcula un ponderador entre las cantidades del 2010 y 2019 para actualizar al año 2019 la cantidad de vehículos que entrega la EOD.

5. MODELO DE SIMULACIÓN

En esta sección se detallan todos los componentes, variables, datos, parámetros y lógicas del modelo computacional. Este fue construido en Netlogo 6.0.4 que está especialmente diseñado para la simulación basada en agentes y que opera en instantes

discretos de tiempo llamados “*ticks*” en donde se actualizan las variables del sistema y de las entidades si corresponde.

5.1. Componentes

5.1.1. Entidades

El modelo está constituido dos tipos de entidades: los evacuados y los vehículos. **Los evacuados** representan los habitantes de Iquique. Son la entidad más relevante del modelo ya que el objetivo de la simulación es evaluar el tiempo que le toma a la población poder llegar hasta un punto en donde no serán alcanzados por el tsunami.

Dado el enfoque del modelo, los evacuados están principalmente determinados por su edad y si tienen alguna dificultad de movilidad. Estos dos parámetros determinan la velocidad máxima que pueden alcanzar las personas. De esta manera, los evacuados se rigen por las siguientes etapas:

- 1) Decisión de evacuar en grupo
- 2) Elección de vehículo
- 3) Decisión de evacuar
- 4) Elección de punto de encuentro
- 5) Elección de ruta
- 6) Desplazamiento

Estos seis puntos se basan en la propuesta de Mas et al. (2012) en donde estructuran la toma de decisiones en base a cuatro puntos. “Evacuación en grupo” y “Elección de

vehículo” son particulares a este modelo. En la Sección **Error! Reference source not found.** se describe en detalle cada etapa.

Los vehículos representan el parque automotriz de Iquique limitado a vehículos particulares. Los principales atributos que poseen los vehículos son la velocidad máxima, aceleración y desaceleración. En tanto, estas entidades no se mueven a menos que a lo menos un evacuado se haya subido al vehículo y heredan el punto de encuentro que eligió el evacuado. En la Sección 5.3 se detalla el funcionamiento de los vehículos.

5.1.2. Recursos

Existen tres tipos de recurso en el modelo: calles, puntos de encuentro y vías de evacuación. Los cuales son explicados en detalle en las Sección 5.4.1 para el primero y para los otros dos, la Sección 5.4.2.

5.1.3. Medidas de desempeño

La principal medida de desempeño es la cantidad de personas evacuadas en cada minuto, tanto a nivel de toda la población como la segmentada por diferentes partes de la población. Por un lado, cuando se habla de personas evacuadas por minutos se refiere a la cantidad de entidades que alcanzan un punto de encuentro, o sea, que llegan a la zona segura. Por el otro lado, las partes en que se puede dividir la población son los grupos etarios y, vulnerables y no vulnerables.

Otras también relevantes serán la densidad de autos y evacuados en las calles, y cantidad de personas alcanzadas por el tsunami.

5.2. Proceso de evacuación de las personas

Cada persona modelada es representada por una entidad en la simulación y su comportamiento viene dado por los seis puntos que fueron mencionados en la sección 5.1.1 los que consisten en Evacuación en grupo, Elección de vehículo, Decisión de evacuar, Elección de punto de encuentro, Elección de ruta y Desplazamiento.

De esta manera, cada una de estas etapas se explica en las siguientes subsecciones.

5.2.1. Decisión de evacuar en grupo

Goto et al., en su trabajo del 2012, asumen que las entidades desde el comienzo representan grupos de personas. En aquel trabajo crean cuatro categorías: evacuados normales, que caminan a la máxima velocidad; evacuados lentos, que representan grupos que tienen a lo menos un niño, un adulto mayor o una persona con discapacidad y caminan a la mitad de la velocidad máxima; motocicletas; y automóviles. A partir de esta idea, en la modelación de nuestro trabajo, cada entidad debe buscar y juntarse con el resto de su grupo.

Para la formación de los grupos, el programa requiere como *input* tres datos. El primero son las entidades que van a crear dichos grupos, a las cuales se llaman “entidades creadoras” en esta sección. El segundo dato es el subconjunto de entidades que pueden ser parte del grupo de la entidad creadora y, finalmente, el rango de búsqueda.

De esta manera, las entidades creadoras buscan entidades que pertenezcan al subconjunto de posibles compañeros hasta que se llega al límite del tamaño del grupo o no quedan más entidades dentro del rango de búsqueda.

Una vez terminado el proceso de búsqueda, la entidad más lenta será asignada como el líder del grupo lo que implica que el resto de las entidades del grupo se moverán al punto donde se encuentra el líder

Finalmente, cuando todas las entidades del grupo estén juntas, éstas comenzarán la evacuación hacia el punto de encuentro a la velocidad del líder, siguiendo su ruta y su lógica de movimiento. Esto se realiza de esta manera debido a que el enfoque del trabajo es determinar el impacto de personas con movilidad reducida en el sistema y está en línea con el trabajo de Goto *et al* (2012).

Es importante mencionar que la evacuación en grupo no es estrictamente necesaria y dependerá del modelador si el escenario necesita que se formen grupos en la evacuación.

5.2.2. Elección de vehículo

Una vez que los grupos son creados, se realiza el procedimiento de asignación de vehículos. Es importante destacar que la asignación de vehículos puede suceder tanto si el procedimiento de creación de grupos se activó o no.

Este procedimiento requiere de tres *inputs*: grupo de asignación, rango de búsqueda y cantidad de autos a asignar. El grupo de asignación es el tipo de entidades que buscaran un auto lo que permite discriminar entre quienes utilizaran un vehículo y aquellas que no. Esto permite, por ejemplo, que solo las entidades que presentan algún problema de movilidad o los grupos que tengan a lo menos una de estas entidades utilice vehículos.

La segunda variable es el rango de búsqueda. Las entidades que pueden optar a utilizar un vehículo buscaran en un área circular en donde ellos son el centro y el radio viene dado

por el rango de búsqueda. Aquí es fundamental el supuesto de que las entidades ignoran cualquier construcción que pueda haber en una cuadra (edificios, casas, recintos privados) por lo que el rango de búsqueda es la distancia efectiva y no tiene modificaciones por accidentes geográficos.

El último *input* es la cantidad de autos. Como se explica en la Sección 4.3 los autos son previamente estimados.

5.2.3. Decisión de Evacuar

La primera etapa de la modelación del agente es el momento en que comienza a evacuar. El tiempo que le toma a una persona llegar hasta un Punto de Encuentro es afectado considerablemente por el momento que comienza a evacuar dado que esto, en parte, determina con cuanta congestión se encontrará en las calles.

Considerando lo anterior, se sigue el enfoque tomado por Solís & Gazmuri (2017), en donde el momento en que cada entidad empieza a evacuar viene dado por una distribución aleatoria Rayleigh. La función acumulada esta descrita por:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1)$$

En donde se obtiene, para este caso, la proporción de personas que ha comenzado a evacuar hasta el momento “t” dado un parámetro de escala “σ” que está determinado por la media de la población según la siguiente expresión:

$$\mu = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (5.2)$$

En el caso de Iquique, Solís y Gazmuri proponen una media $\mu = 3$ minutos. Este valor es justificado en base a sistema de alerta temprana que posee la ciudad y la educación de la población. Para la modelación de la simulación de este trabajo, se utiliza la misma media.

Utilizar la distribución Rayleigh para replicar el inicio de la evacuación de los agentes es una práctica común como se puede ver en los trabajos de Mas et al. (2013), León & March y Álvarez (2017).

En resumidas cuentas, en este modelo, las entidades son creadas en el instante cero que coincide con el momento en que se supone que ocurre el terremoto. En ese mismo momento, a cada evacuado se le asigna el valor de una realización de la variable aleatoria que distribuye Rayleigh con media 3 minutos. Cuando el valor asignado a la entidad sea igual al tiempo transcurrido en la simulación, esta comenzará a evacuar.

5.2.4. Elección de punto de encuentro

Cuando el agente comienza a evacuar, su primera acción es buscar la calle más cercana. Si escapa caminando, se dirigirá inmediatamente, al comenzar la evacuación, al punto más cercano de la red vial. Si evacua en grupo, irá hasta la ubicación del líder y desde allí buscará la calle más cercana. Lo mismo sucederá si evacua en auto: la persona o grupo llega hasta el auto y luego se dirige al segmento de calle que se encuentre más próximo.

Los evacuados se comportan de esta manera debido a la modelación de las cuadras. Las cuadras, a pesar de estar indicadas en los archivos georreferenciados de la EOD (TRASA Ingeniería Ltda., 2012c) no tienen el detalle de si en esos espacios hay edificios, plazas o cualquier otro tipo de relieve urbano. De esta manera, se trabaja con el supuesto de que la persona se dirige a la calle más cercana porque ese es el único camino que lleva directamente a la calle. Por lo general los edificios, casas o estructuras deslindan con solo un segmento de calle y solo tienen salida a la red por ese deslinde.

En el código propiamente tal, cuando los evacuados ingresan a la red, se dirigen al nodo más cercano dado que en cada uno de estos se encuentra cargada la ruta de menor longitud hasta algún Punto de Encuentro. En la sección 5.2.5 se explica cómo se genera la ruta.

Una vez en el nodo, comenzarán a seguir la ruta que los llevará hasta un Punto de Encuentro. El sustento para que las personas sepan a donde dirigirse viene de que, en el simulacro de un terremoto en la región de Tarapacá, el 85% de las personas mostraron conocimientos y utilizaron las vías de evacuación (Walker Rousseau, 2012).

5.2.5. Elección de ruta

El fin de las vías de evacuación es agilizar este proceso. Debido a esto, “ONEMI ha determinado las vías de evacuación que los habitantes de Iquique deben usar para evacuar hacia la zona segura. Los habitantes deben encontrar una ruta hacia la vía de evacuación más cercana y posteriormente evacuar siguiendo la vía” (Solís, 2016).

Para este trabajo, la búsqueda de la ruta se basa en encontrar la de menor longitud. Longitud porque no se considera la congestión u otros factores que puedan disminuir la velocidad de los evacuados. Considerando este enfoque, un algoritmo que se ajusta a la necesidad es el A* (Hart, Nilsson, & Raphael, 1968).

Por ejemplo, Gregor Lämmel (2010) utiliza en su tesis de doctorado en donde modela la evacuación de una ciudad hasta lograr un Equilibrio de Nash para los tiempos de escape de todas las personas. Para esto utiliza el algoritmo A* para la primera iteración y de ahí modifica los tiempos de las rutas en base a la congestión de la iteración anterior. Justifica la elección del algoritmo realizando una revisión bibliográfica en donde concluye que este algoritmo llega a una solución y tiene mejores tiempos de ejecución que otros algoritmos comunes.

Goldberg y Harrelson (2004) proponen variaciones y mejoras para el algoritmo A*. Sin embargo, en la modelación del presente trabajo, el tiempo que toma calcular todas las rutas es mucho menor que la simulación de la evacuación. De esta manera, es poco relevante la eficiencia del algoritmo por lo que A* es suficiente. La razón de que el tiempo de ejecución del algoritmo de búsqueda de rutas sea no relevante se explica en la sección 5.4 con más detalle.

5.2.6. Cálculo de Velocidad

Para los agentes que evacuan sin utilizar un vehículo, en primer lugar, es calculada en base a la congestión que tiene en frente cada persona. Una vez que esta ha sido calculada, se multiplica por un factor relativo a la inclinación de las calles lo que es relevante en la

ciudad de Iquique por su geografía. Esta ponderación es considerada debido al trabajo realizado por Ignacio Solís en su tesis de magíster (2016).

De esta forma la velocidad efectiva de los evacuados viene dada por la siguiente ecuación:

$$v_{efectiva} = v_{densidad} * \mu_{inclinación} \quad (5.3)$$

El cálculo de $v_{densidad}$ se explica en la sección 5.2.6.1 y el ponderador $\mu_{inclinación}$ se explica en la sección 5.2.6.2

5.2.6.1. Relación Velocidad-Densidad

El cálculo de la velocidad se realiza en base al trabajo de Goto *et al* (2012) en donde los autores utilizan la relación de la

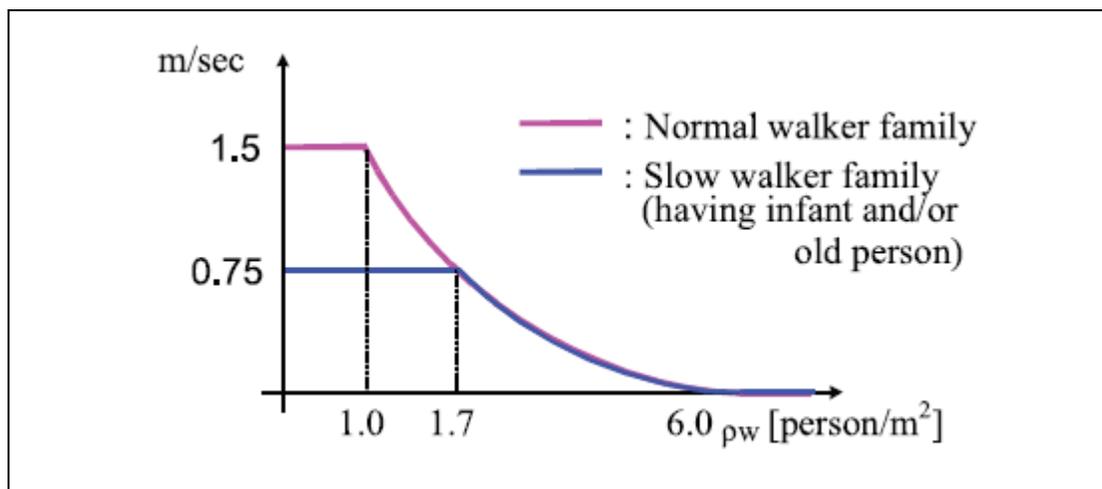


Figura 5.1.

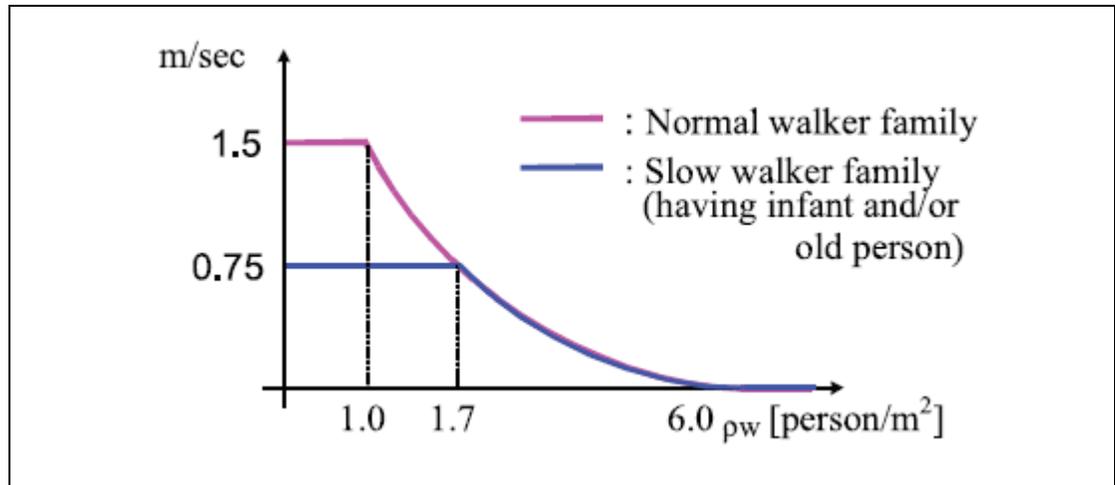


Figura 5.1. Relación Velocidad-Densidad en Frente para los agentes.

Fuente: (Goto, et al., 2012)

Como ya se mencionó en secciones anteriores, ellos consideran dos tipos de entidades, las cuales se mueven en grupos dependiendo de la persona más lenta de ese conjunto de evacuados. El primer tipo, aquellos que no tienen ninguna dificultad, se mueven a una velocidad máxima de $1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$ mientras la densidad sea menor a $1 \left[\frac{persona}{m^2} \right]$. En tanto, el segundo tipo, o sea los grupos que tienen algún infante o persona mayor de edad, tendrán una velocidad máxima de $0.75 \left[\frac{m}{s} \right]$ mientras que la densidad sea menor a $1.7 \left[\frac{personas}{m^2} \right]$. Esta densidad no es al azar y viene dada por la intersección de la velocidad de las personas lentas con la curva de densidad/velocidad de las personas con velocidad normal.

En el caso del presente trabajo, como se explicó en la 3.2.2, las velocidades de las personas con dificultades se obtuvieron en su mayoría de casos en donde no hay congestión. Para sortear esta disparidad se utiliza la misma lógica que aplica el equipo de Yozo Goto: para todos aquellos que tengan una velocidad a flujo libre menor que las personas sin dificultades, la velocidad en congestión vendrá dada por el mínimo del cruce

de la rapidez a flujo libre con la curva de densidad/velocidad de las personas sin ninguna dificultad.

De esta manera, la velocidad de los evacuados del grupo etario de 30 a 44 años, sin dificultad viene dada por la Ecuación (5.4). Esta se desprende directamente de

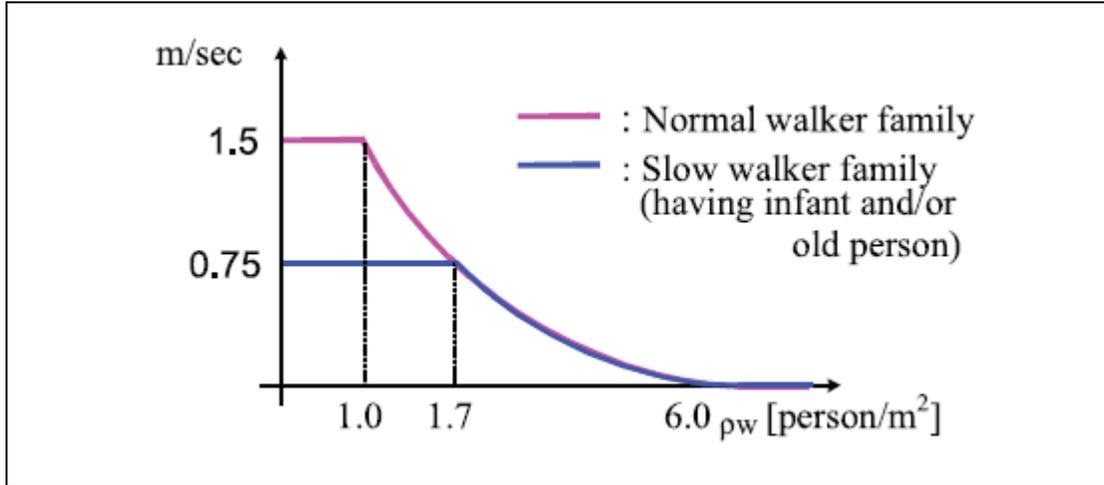


Figura 5.1.

$$v = \begin{cases} 1.5 \frac{m}{s} & \text{si } \rho < 1.0 \frac{per}{m^2} \\ \frac{18}{7} - \frac{15}{14} \rho \frac{m}{s} & \text{si } 1.0 \leq \rho < 1.7 \frac{per}{m^2} \\ \frac{45}{43} - \frac{15}{86} \rho \frac{m}{s} & \text{si } 1.7 \leq \rho < 6.0 \frac{per}{m^2} \\ 0.0 \frac{m}{s} & \text{si } 6.0 \leq \rho \frac{per}{m^2} \end{cases} \quad (5.4)$$

Como excepción, el grupo etario de 18 a 29 años tendrá una velocidad igual a $1.60 \left[\frac{m}{s} \right]$ mientras su densidad sea menor a $1.0 \left[\frac{per}{m^2} \right]$ y luego tendrá una rapidez igual a las tres otras condiciones de la Ecuación (5.4).

En los casos para los grupos etarios o que tengan alguna dificultad, siendo más lentos que $1.50 \left[\frac{m}{s} \right]$, pero más rápida que $0.75 \left[\frac{m}{s} \right]$, la velocidad viene dada por la ecuación en (5.5).

$$v = \begin{cases} v_f \frac{m}{s} & \text{si } \rho < \rho_f \frac{\text{per}}{m^2} \\ \frac{18}{7} - \frac{15}{14} \rho \frac{m}{s} & \text{si } \rho_f \leq \rho < 1.7 \frac{\text{per}}{m^2} \\ \frac{45}{43} - \frac{15}{86} \rho \frac{m}{s} & \text{si } 1.7 \leq \rho < 6.0 \frac{\text{per}}{m^2} \\ 0.0 \frac{m}{s} & \text{si } 6.0 \leq \rho \frac{\text{per}}{m^2} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\text{Donde } \rho_f = 125 - 1,415v_f$$

La velocidad para el grupo de personas con dificultad que los hace más lentos que $0.75 \left[\frac{m}{s} \right]$, viene dada por (5.6).

$$v = \begin{cases} v_f \frac{m}{s} & \text{si } \rho < \rho_f \frac{\text{per}}{m^2} \\ \frac{45}{43} - \frac{15}{86} \rho \frac{m}{s} & \text{si } \rho_f \leq \rho < 6.0 \frac{\text{per}}{m^2} \\ 0.0 \frac{m}{s} & \text{si } 6.0 \leq \rho \frac{\text{per}}{m^2} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\text{Donde } \rho_f = 6 - \frac{86}{15} v_f$$

Originalmente en el *paper* citado como fuente, la curva de la

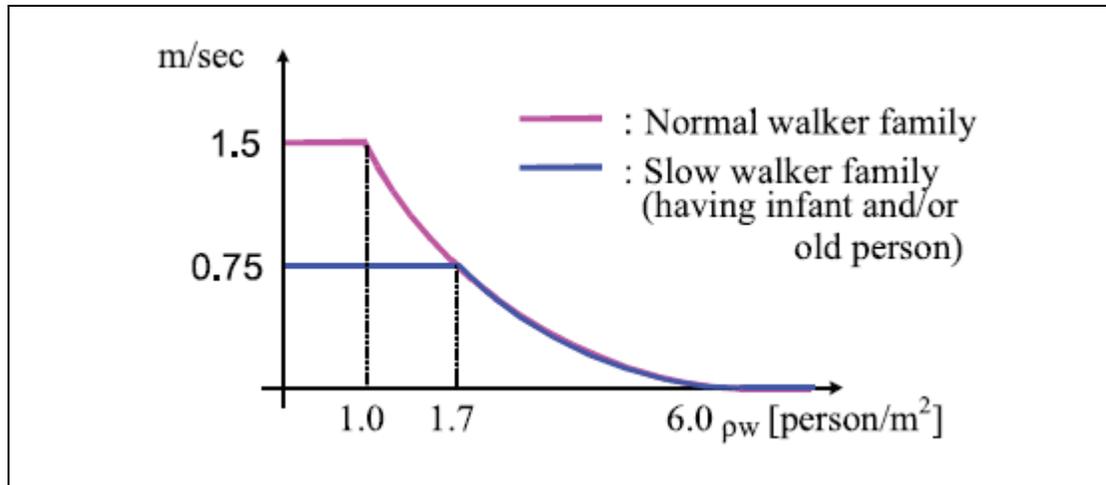


Figura 5.1 no son segmentos de recta. Sin embargo, este no especifica la función y al intentar realizar alguna regresión con los puntos conocidos, en general se consiguen ecuaciones cuadráticas que devuelven velocidades negativas.

A pesar de lo anterior, la diferencia entre la rectificación y el original no debería tener consecuencias visibles en los resultados de la modelación. Sin embargo, si va a colaborar en la disminución del tiempo del cálculo de la velocidad de las entidades porque este proceso se lleva a cabo en cada *tick* de la simulación para cada evacuado.

Siendo la velocidad de flujo libre un dato conocido para cada agente y la velocidad en cada momento, función de la densidad, solamente falta explicar cómo se obtiene esta.

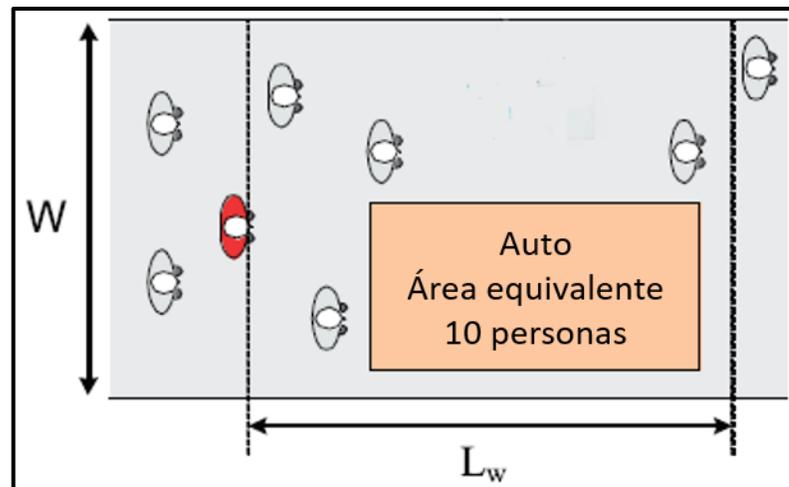


Figura 5.2. Velocidad de Evacuación y Densidad al frente del Agente.

Fuente: (Goto, et al., 2012)

En la Figura 5.2 se ilustra el cálculo de la densidad. Cada entidad observa L_w metros más adelante que ella y cuenta todas las entidades de evacuados que se encuentran, dentro de esa distancia en la pista. También cuenta a los vehículos que equivalen a 10 personas. Con este valor, cada persona obtiene la densidad según la ecuación

$$\rho = \frac{\text{Número de personas} + 10 * \text{Número de vehículos}}{W * L_w} \quad (5.7)$$

En donde W es el ancho de la pista y L_w el largo del área de cálculo.

Es importante destacar que, para los grupos de personas, la persona más lenta de este es la única que calcula la densidad y velocidad, y el resto hereda estos valores. De esta manera, avanzan todos juntos. En las primeras versiones del código, los líderes constantemente densidades al frente de ellos muy altas. Esto se debía a que era común que contaran a todo su grupo lo que conllevaba a tener muchas entidades en poco espacio. Por lo tanto, en la versión final, los líderes no consideran a sus seguidores a la hora de calcular

la densidad. De esta forma, se produce congestión en la red, pero los grupos se mueven a una velocidad razonable.

Dado que la calle está dividida en pistas para vehículos y veredas, los evacuados tendrán la posibilidad de cambiarse de pista o vereda y lo harán si la densidad a la que se enfrentarían en la otra pista es menor a la densidad que tienen al frente en determinado momento. La explicación detallada de las pistas se encuentra en la Sección 5.4.1.

5.2.6.2. Factor de Inclinación

Una de las características de las vías de evacuación de Iquique es la inclinación de sus vías de evacuación. Dependiendo de la zona, el perfil de altura de las calles varía considerablemente. En la Macrozona 1, desde su punto más lejano, se tienen vías planas de varios kilómetros con la mayoría de la ganancia de altura en los últimos metros. En tanto, la Macrozona 2 y 3, aunque también son vías de varios kilómetros, el ascenso está distribuido a lo largo de todo el trayecto. Finalmente, en la medida que se avanza hacia el sur, o sea, a la Macrozona 4, las rutas comienzan a ser más cortas, pero con una mayor pendiente ya que los 30 a 40 metros de ascenso se realizan en tramos pequeños.

Para la condición de las vías de evacuación de Iquique y considerar la particularidad de cada una de ellas, Solís (2016) utiliza la *Tobler's Hiking Function* (Tobler, 1993) para modelar el efecto de la pendiente sobre los evacuados. Esta función está descrita en la ecuación (5.8).

$$w_s \left(\frac{dh}{dx} \right) = 6e^{-3.5 \left| \frac{dh}{dx} + 0.5 \right|} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (5.8)$$

Donde $\frac{dh}{dx}$ es la pendiente, o sea, la tangente del ángulo de inclinación de la calle.

Sin embargo, en la descripción que realiza Tobler, él considera que la velocidad máxima que alcanza una persona en un plano es $1.4 \left[\frac{m}{s} \right]$ mientras que, en la modelación del presente trabajo, la velocidad a flujo libre es de $1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$. Esta diferencia se desprende principalmente del hecho de que las personas que están escapando de un desastre lo van a hacer a mayor velocidad. Además, la ecuación no considera variaciones en la velocidad dadas por la congestión.

Para salvar esta diferencia, se calcula el factor de inclinación $\mu_{inclinación} \left(\frac{dh}{dx} \right)$ que es el que se utiliza en la ecuación (5.3). Para obtener este ponderador, simplemente se divide la velocidad que debería tener una persona a flujo libre según la ecuación original de Tobler, considerando la inclinación de la calle dividido por la velocidad en el plano. La expresión que representa lo recién descrito, se puede ver en la ecuación (5.9).

$$\mu_{inclinación} \left(\frac{dh}{dx} \right) = \frac{w_s \left(\frac{dh}{dx} \right)}{w_s(0)} \quad (5.9)$$

5.3. Etapas escape de vehículos

A pesar de que evacuados y vehículos guardan varias similitudes, principalmente porque los primeros evacuan en los segundos, tienen diferencias, principalmente en las lógicas de movimiento. Además, los autos no tienen un momento en que empiezan a evacuar, estos dependen totalmente del instante en que los evacuados llegan.

Por lo anterior, en esta subsección se explicará el funcionamiento de los vehículos.

5.3.1. Asignación

Inicialmente, los vehículos son distribuidos entre calles y el resto del espacio, en cada zona según las proporciones calculadas en la Sección 4.3. El punto exacto de la calle o del resto del espacio no se conoce por lo que esa parte de la asignación se realiza aleatoriamente. Ya cargados los vehículos, estos permanecerán inmóviles durante toda la evacuación a menos que sean asignados a una persona o grupo de evacuados. Esto es relevante ya que los vehículos que no son usados, pero están estacionados en la red, generarán congestión extra.

Dado que la asignación de vehículos es llevada a cabo por las entidades que representan a los evacuados, este proceso ya fue explicado en la Sección 5.2.2.

Finalmente, es posible colocar un tiempo extra para los evacuados entre que llegan al auto y se suben a este. Cuando ese periodo haya finalizado, el vehículo comenzará la evacuación.

5.3.2. Elección de Ruta

La ruta del vehículo se puede definir de dos maneras diferentes. La primera es idéntica a la de los evacuados. El auto se dirige a punto de la red más cercano de la red y una vez en ella, se dirigirá al nodo más cercano. Una vez en el nodo, copiará la ruta de menor distancia al Punto de Encuentro que ya tiene cargada ese vértice y la seguirá hasta llegar al destino.

La segunda posibilidad es que el vehículo herede la ruta que fue calculada para el evacuado. Para la evacuación vertical, las personas que recurren a este modo calculan su

ruta desde el punto en que son cargadas hasta el edificio de evacuación. Esto es posible debido a que no son muchos los que pueden optar a esta opción. De esta manera, cuando una entidad se subía el vehículo, este adquiría la ruta que ya había sido calculada.

Sin embargo, en este trabajo no se realizaron escenarios con evacuación vertical debido a que serían demasiados los casos a analizar. Por lo tanto, los vehículos sólo recurren al primer método para determinar cuál será la ruta que siguen.

5.3.3. Cálculo Velocidad Vehículos

Antes de integrarse a la red, el modelo trabaja bajo el supuesto de que los autos se mueven sin considerar ningún tipo de congestión. Esto es siguiendo el mismo comportamiento de los evacuados y una simplificación del hecho de que no se cuenta con el detalle de qué ahí en cada manzana.

Una vez en una calle, los vehículos según la descripción del modelo que realizan Goto *et al* (2012) con dos excepciones. La primera es que los peatones que están en la misma pista, al frente y en una distancia menor a la máxima que puede recorrer el auto en el presente intervalo de tiempo, siempre serán considerados por este. La segunda, es que los vehículos tienen aceleración y desaceleración.

La razón de estas modificaciones se debe a que en las iteraciones del modelo que no las consideraban, los automóviles escapaban ignorando cualquier congestión por lo que se producía una evacuación caracterizada por un primer grupo (todas las personas en vehículo) escapando en los primeros minutos mientras que el segundo grupo (las personas que caminan) lo hacía, en casi su totalidad, posterior a los vehículos. Este resultado va en

contra de las recomendaciones de la autoridad y de otras simulaciones de evacuación, incluso la de Goto *et al*, en donde la conclusión es que un uso indiscriminado de vehículos genera una evacuación más lenta de las ciudades.

5.3.4. Desplazamiento por intervalo de tiempo

De esta manera, para continuar con la sección anterior, los vehículos están caracterizados por una aceleración y una desaceleración de $1.41 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ y $7.14 \left[\frac{m}{s^2} \right]$, respectivamente. Estos valores son planteados por Wang *et al* (2016) en donde simulan la evacuación multimodal de la ciudad de Seaside, Oregón.

A pesar de que en la literatura de micro simulación de transporte hay una amplia gama de aproximaciones a este problema, se decidió que el objetivo del vehículo fuese avanzar lo más rápido posible sin crear ninguna colisión. Esto implica que, en cada intervalo, el vehículo debe tener suficiente espacio para avanzar lo que su velocidad corresponda más una distancia de precaución dada por lograr una total detención si el automóvil o evacuado que está adelante se detuviera completamente.

Además, el desplazamiento en cada intervalo de tiempo viene dado por la descripción de un movimiento uniforme rectilíneo con el fin de mantener la simplicidad. De esta manera, el comportamiento del auto, aceleración y desaceleración viene determinada por las siguientes variables y datos:

d_t	Desplazamiento en el intervalo t
v_t	Velocidad al inicio del intervalo t
a_t	Aceleración constante durante el intervalo t
Δt	Largo de los intervalos (todos son iguales)

$d_t^{seguridad}$	Distancia a la entidad del frente más cercana en el intervalo t
v_{max}	Velocidad máxima $\left(11.11 \frac{m}{s}\right)$
a_{decel}	Desaceleración máxima $\left(7.14 \frac{m}{s^2}\right)$
a_{accel}	Aceleración máxima $\left(1.41 \frac{m}{s^2}\right)$
$d_t^{max_decel}$	Distancia que se recorrerá en t si la aceleración es igual a a_{decel} sumado a la distancia que se recorrerá en $t + 1$ si el vehículo se tuviera que detener completamente
$d_t^{max_accel}$	Distancia que se recorrerá en t si la aceleración es igual a a_{accel} sumado a la distancia que se recorrerá en $t + 1$ si el vehículo se tuviera que detener completamente

En donde $d_t^{max_decel}$ esta definida por la Ecuación (5.10) y $d_t^{max_accel}$ por la Ecuación (5.11).

$$d_t^{max_decel} = v_t * \Delta t + \frac{a_{decel} * \Delta t^2}{2} + \frac{(v_{t+1} + a_{decel} * \Delta t)^2}{2a_{decel}} \quad (5.10)$$

$$v_{t+1} = \min(v_{max}, v_t + a_{accel} * \Delta t)$$

$$d_t^{max_accel} = v_t * \Delta t + \frac{a_{accel} * \Delta t^2}{2} + \frac{(v_{t+1} + a_{decel} * \Delta t)^2}{2a_{decel}} \quad (5.11)$$

$$v_{t+1} = \max(0, v_t - a_{decel} * \Delta t)$$

Es importante mencionar que $d_t^{seguridad}$ siempre considerará a los peatones, lo que como se mencionó, es una diferencia al trabajo del equipo de Goto debido a que los vehículos, por lo general, no alcanzaban una densidad de $1 \left[\frac{persona}{m^2}\right]$ el cuál es el requisito que ponían en su modelación para que el auto se detuviera por personas al frente.

Con las variables definidas, la decisión que toman los vehículos se divide en tres casos:

Pseudo Código Algoritmo Aceleración Vehículos:

(i) If ($d_t^{max\ accel} \leq d_t^{seguridad}$), then

$$v_{t+1} = \min (v_{max}, v_t + a_{accel} * \Delta t)$$

En el primer caso, el vehículo intentará llegar a su velocidad máxima si la entidad más cercana está suficientemente lejos.

(ii) Ifelse ($d_t^{max\ decel} \leq d_t^{seguridad} < d_t^{max\ accel}$), then

$$v_{t+1} = \frac{-a_{decel} * \Delta t + \sqrt{a_{decel}^2 * \Delta t^2 - 4a_{decel}(v_t * \Delta t - 2d_{safe})}}{2}$$

En el segundo caso, el vehículo mantendrá su velocidad en un intervalo que le permita tener suficiente espacio si es que la entidad más cercana de adelante frenara en seco.

(iii) Else ($d_t^{seguridad} < d_t^{max\ decel}$), then

$$v_{t+1} = 0$$

Finalmente, si no hay espacio suficiente para detenerse sin generar una colisión, el auto se detiene completamente. Este enfoque es tomado ya que se trabaja con el supuesto que no habrá choques y esto solo ocurre cuando una entidad se incorpora a la red o a la pista muy cerca del vehículo que ese está moviendo.

5.3.5. Lógica de desplazamiento

Dependiendo de los *inputs* que se le asignen a Netlogo, los vehículos pueden calcular la velocidad una vez por intervalo o con una menor frecuencia. Así mismo, estas entidades tienen la capacidad de cambiarse a una de las pistas adyacentes dependiendo también de la frecuencia que se le asignen. En tanto, el cambio de pistas funciona como lo muestra la Figura 5.3.

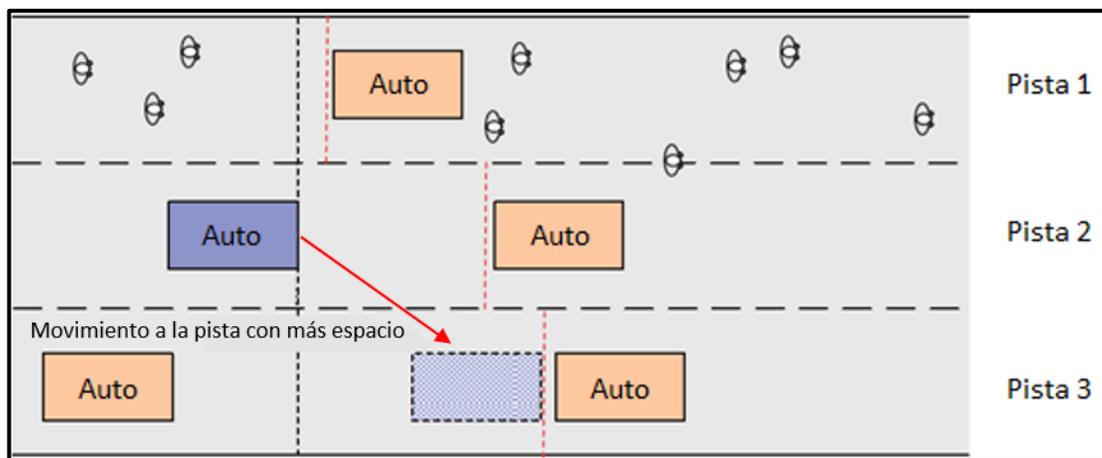


Figura 5.3. Caso con múltiples líneas

Fuente: (Goto, et al., 2012)

Como se muestra, el vehículo al iniciar el cambio de pista buscará en cuál puede avanzar una mayor distancia en el presente intervalo de simulación y se moverá si encuentra una que le permita avanzar más que en la que se encuentra actualmente. Si no hay ninguna pista mejor, se mantendrá en la actual.

Para determinar cuál pista le permite avanzar más, simplemente se hace el supuesto que el vehículo ya se encuentra en una de las otras líneas y se guarda la distancia que puede avanzar en esa. Al terminar de revisar la presente y las adyacentes, si se realiza el

cambio, el vehículo se retirará de la pista actual, se asignará a la nueva y la velocidad será calculada como se explicó en la sección anterior.

Finalmente, cuando los vehículos llegan al final de un *link* y van a pasar al siguiente, revisan que haya suficiente espacio al comienzo de la calle a la que están pasando. Si esta condición no se cumple, los autos tendrán que esperar para realizar el cruce. Esto le da mayor realismo a la simulación porque genera congestión aguas arriba, de lo contrario, los autos se comenzarían a juntar al principio de las calles y se acumularía una cantidad sin sentido de vehículos en un espacio reducido.

Los evacuados no tienen esta restricción debido a la manera que su desplazamiento es modelado. Ese tipo de entidades no va a generar una concentración tan alta mientras que los vehículos si lo harán porque estos si pueden detenerse completamente.

5.4. Modelación Iquique

Geográficamente hablando, los eventos que interesan para la modelación son los que componen la red. En esta sección se detalla el funcionamiento de calles: nodos y links, Puntos de encuentro y vías de evacuación.

5.4.1. Calles

En el Sistema de Información Geográfica (*GIS* por sus siglas en inglés) las calles son representadas por líneas o polilíneas. A su vez, estas son construidas a partir de la unión de dos puntos. Para visualizar esta información, Netlogo descompone todas las líneas en los puntos que las componen y los proyecta en la interfaz creando los nodos. Realizado

esto, con la misma información, une los nodos que corresponde usando links. Lo que crea toda la red de la ciudad.

Dado que los nodos y links guardan información relevante para el modelo, estos serán explicados en detalle.

5.4.1.1. Nodos

En primer lugar, los nodos guardan “información sobre el ancho, la inclinación y el largo de la calle en el tramo que representa” (Solís, 2016). Toda esta información y los archivos que la recolectan fueron facilitados por Ignacio Solís.

Dado que la cantidad de nodos es mucho menor a la de evacuados, por ejemplo, en la Macrozona 2 hay 1,431 vértices y se evacuan aproximadamente 56,000 personas, resulta más eficiente que el cálculo de las rutas de evacuación sea guardada y calculada en los nodos. Además, dado que la geografía de la ciudad no cambia entre réplicas, la obtención de las rutas de evacuación debe ser hecha solo una vez cuando se carga la información geográfica en vez de en cada ocasión en que la población es renovada para otra iteración.

Finalmente, los nodos que pertenecen a las vías de evacuación calculan la ruta hasta un Punto de Encuentro. En tanto, los que no pertenecen calculan la ruta hasta la vía de evacuación más cercana.

5.4.1.2. Links

En segundo lugar, se encuentran los *links*. En el modelo original, estos sólo cumplían el rol de conectar los nodos y así tener un grafo conexo en donde es posible aplicar el algoritmo A* para encontrar las rutas. Los *links* ni siquiera eran utilizados para calcular

las densidades en frente de los evacuados ya que la información era recogida por las entidades en los nodos y calculaban la densidad usando el ancho total de la calle. Sin embargo, en el presente trabajo, se necesitan las pistas para que los vehículos puedan realizar cambios entre una y otra de la misma manera en que lo modela Goto *et al.*

Para llevar esto a cabo, el primer paso es que el *link* toma el mayor ancho guardado en los nodos que lo componen. La modelación se realiza de esta manera debido a que no hay una forma de distinguir a qué calle corresponde qué dato con la información dada.

Con lo anterior, se decide que las calles se comportaran como una vía local. Esto significa que el ancho de las pistas es de 3.5 *m* y las veredas de 2.0 *m*. Esto se puede observar gráficamente en la Figura 5.4. Las veredas son consideradas debido que en la visita a terreno se observó que todas las calles tenían aceras a ambos lados, por lo tanto, no se pueden ignorar a la hora de modelar ya que estas funcionan como *buffer* para que las personas no pasen directamente a la calle cuando la red se empieza a llenar.

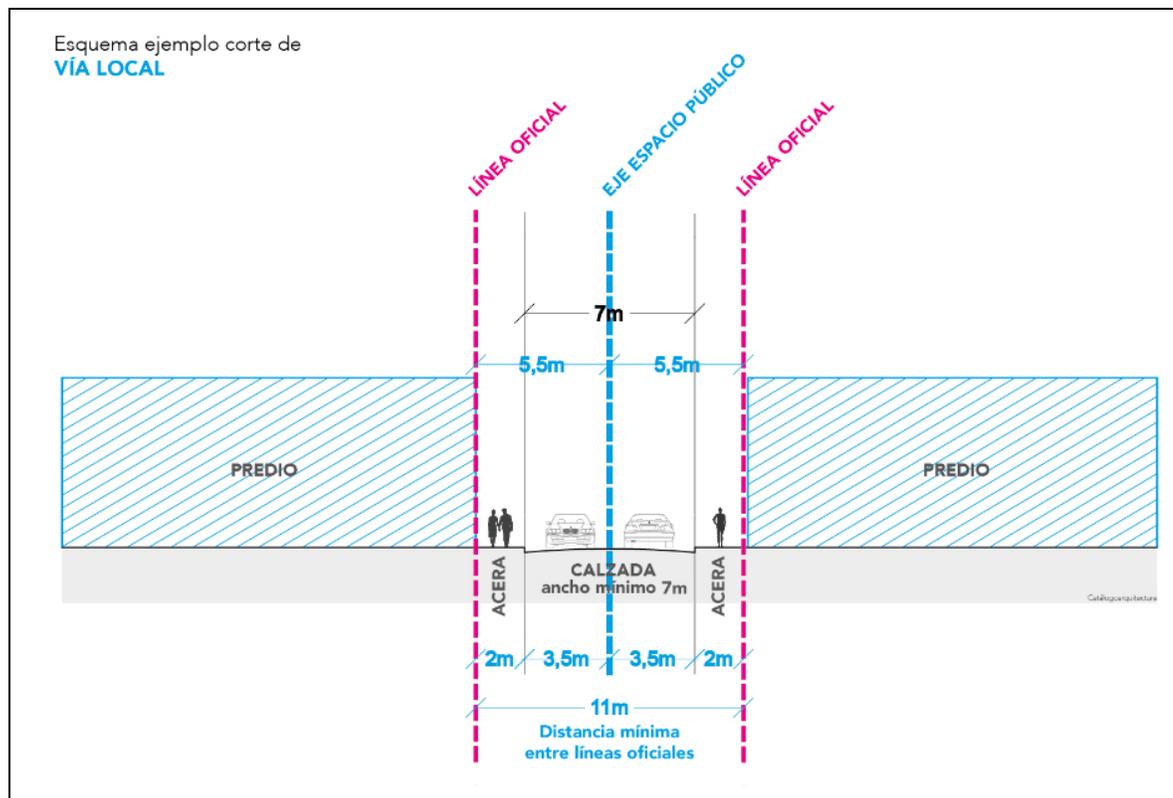


Figura 5.4. Esquema Ejemplo Corte de Vía Local

Fuente: (Catálogo Arquitectura, 2018)

Dado que el ancho de la calzada más la vereda no es de 11 *m* en todas las calles, se utiliza un algoritmo para que las pistas siempre midan 3.5 *m* y las veredas estén en torno a los 2.0 *m*. Este es representado por el siguiente algoritmo:

Sea $rest = (Ancho\ Calle) \bmod 3.5$ [m]

(i) If $rest \leq 2.0$ [m], then

a. $Número\ pistas = \left\lfloor \frac{Ancho\ Calle}{3.5} \right\rfloor$

b. $Ancho\ de\ cada\ vereda = 2 + \frac{rest}{2}$ [m]

(ii) Else

a. $Número\ pistas = \left\lfloor \frac{Ancho\ Calle}{3.5} \right\rfloor + 1$

b. $Ancho\ de\ cada\ vereda = 2 - \frac{rest}{2}$ [m]

Hasta este punto, los *links* guardan el ancho total de la calle, las características de sus pistas y sus veredas. Sin embargo, por la modelación original de Ignacio Solís, todas las entidades se mueven sobre una misma línea que viene dada por el camino de menor distancia entre dos nodos. Debido a esto, visualmente en la interfaz todos los evacuados y vehículos parecieran estar en la misma pista. En resumidas cuentas, esto impide que las entidades se evadan.

Para sortear este problema, las calles también tienen almacenadas dos listas, cada una con una cantidad de elementos igual a la cantidad de veredas y pistas. Una de las listas guarda a todos los evacuados que se encuentran en ella y la otra se encarga de almacenar a los vehículos. Con esto se logra que las entidades solo consideren a los evacuados y vehículos que se encuentren en su pista a pesar de que gráficamente utilizan el mismo espacio si varias entidades se encuentran a la misma altura de una calle.

Originalmente sólo las entidades tenían un identificador del *link* y la pista o vereda en que se encontraban lo que hacía más lenta la ejecución debido a que Netlogo debía recorrer la totalidad de las entidades buscando todas las que coincidían con *link* y pista en vez de solamente dirigirse al grupo que es almacenado en el *link*.

Para que las entidades correctas estén en estos grupos, cuando una persona ingresa a la red, esta tiene un 50% de probabilidades de entrar en la vereda derecha y un 50% de hacerlo en la vereda izquierda. Así mismo, los vehículos tienen un 50% de probabilidades de incorporarse por la pista derecha y un 50% por la pista izquierda.

En tanto, cuando hay un cambio de pista, la entidad es retirada del grupo del *link* del que viene y se une al nuevo. Finalmente, cuando se pasa de un segmento de calle al siguiente, la entidad intentara mantener la pista o vereda en que se encuentra si no hay congestión. Sin congestión, en el caso de que la calle a la que se pase tenga menos pistas que la anterior, la entidad ingresará por la que se encuentra más a la izquierda. En el caso de que haya congestión, los evacuados son indiferentes a esto, pero los autos buscaran la pista que tenga suficiente espacio para entrar.

5.4.2. Puntos de Encuentro y Vías de Escape

Finalmente, con respecto a la geografía urbana de la ciudad, se encuentran los Puntos de Encuentro y las Vías de Escape. Ambos están definidos por la ONEMI. Los primeros están principalmente dados por la intersección de las vías perpendiculares a la playa y la “Línea de Seguridad”. Estos puntos están conectados a la red y son los destinos de todas las rutas de evacuación.

En tanto, las Vías de Escape se distinguen del resto de las calles debido a que la población las preferirá para evacuar la ciudad. Además, en la visita a terreno realizada por Ignacio Solís, midió el ancho de cada tramo de estas. En cambio, el ancho del resto de las calles lo definió en base al Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2013).

5.5. Aspectos de Modelación en Netlogo

5.5.1. Input del modelo

La lista detallada de *Inputs* del modelo se puede encontrar en el Anexo F. Sin embargo, los más relevantes son los siguientes:

- 1) Sistema de Información Geográfico
 - a. Archivo de calles.
 - b. Archivos de zonas pertenecientes a las macrozonas.
 - c. Archivo de Puntos de Encuentro.
 - d. Archivo de pendiente
 - e. Archivo de vías de evacuación.
- 2) Caracterización y Población y Vehículos
 - a. Archivo de distribución y caracterización de la población en el escenario diurno.
 - b. Archivo de distribución y caracterización de la población en el escenario nocturno.
 - c. Archivo de distribución y caracterización de los vehículos en el escenario diurno.

- d. Archivo de distribución y caracterización de los vehículos en el escenario nocturno.

5.5.2. Output del modelo

Considerando la cantidad de escenarios que se modelan, se programaron varios métodos para que la información fuera procesada antes de terminar cada simulación con el fin de disminuir el trabajo posterior de análisis. Es importante mencionar la variable “*recording_period*” debido a que esta controla el proceso de registro. Dado que se grafican planos de calor, si se guardaba uno por cada intervalo de tiempo en la simulación, la memoria RAM se agotaba. De esta manera, la variable controla cada cuanto tiempo se guardan datos. En general, utilizo un valor igual a $60[*ticks*]$.

De esta forma, el *output* del modelo se divide en tres

- (i) Datos (por réplica y promedio de la ejecución completa)
 - a. Cantidad de vehículos que han evacuado
 - b. Cantidad de personas del grupo vulnerable que han evacuado
 - c. Cantidad de la población completa que ha evacuado
- (ii) Mapas de calor
 - a. Posición de los vehículos
 - b. Posición de las entidades del grupo vulnerable
 - c. Posición de las entidades de la población completa
 - d. Densidad promedio de todas las calles
- (iii) Consola
 - a. Autos efectivamente utilizados y tiempo de ejecución de cada réplica

Tres aclaraciones son necesarias. Cuando se habla de grupo vulnerable, en el contexto de este trabajo, es una opción que se puede definir. Hay tres posibilidades que se pueden elegir del menú desplegable “help_policy”: no considerar a nadie como vulnerable, considerar a aquellos con dependencia funcional como vulnerable, o considerar a los que tengan dependencia funcional y alguna condición permanente.

La segunda es que un parche representa la unidad de espacio mínima que utiliza Netlogo. En este se puede guardar información y se ve gráficamente como un cuadrado. Múltiples de ellos componen la totalidad del mapa. Por ejemplo, en el programa algunos de los parches pertenecen a las calles mientras que otros componen el interior de las cuadras de la ciudad.

Finalmente, por temas de eficiencia, en los mapas de calor solo se registran los parches pertenecientes a las calles, lo que disminuye de manera considerable cantidad de datos que se tienen que guardar. Por ejemplo, en la Macrozona 2, hay un total de 42,587 parches que son relevantes para la modelación, pero solo 8,868 de esos pertenecen a las calles. Además, en las versiones que se consideraban todos los parches, la información extra que proporcionaba era inútil ya que sólo se veía una distribución uniforme de personas en las zonas, lo que respalda que la modelación se hizo correctamente, pero nada más.

5.5.3. Interfaz de Netlogo

La interfaz del modelo consiste en el mapa que representa el área de estudio. Este está constituido por 114,000 parches que pueden ser imaginados como píxeles. En este espacio sucede toda la simulación y en ella se pueden ver cómo avanzan las entidades. Sin embargo, cuando están todas en la calle, no es posible distinguir la cantidad que hay

debido a que está demasiado compactado. Esta es la razón de haber creado los mapas de calor.

Además de los parches, los elementos que aparecen en la interfaz son:

- Círculo Negro: evacuado que no ha entrado a la red.
- Círculo Azul: evacuado que ingresó a la red.
- Triángulo Violeta: vehículo que no ha entrado a la red
- Triángulo Magenta: vehículo que ingresó a la red.
- Casa Café: punto de encuentro no considerado por el programa.
- Casa Naranja: punto de encuentro que utiliza el programa.
- Casa Azul: edificio de evacuación vertical.
- Líneas Rojas: vías de evacuación.
- Líneas grises: calles de la ciudad.

En la Figura 5.5 se puede observar un ejemplo de lo recién descrito.

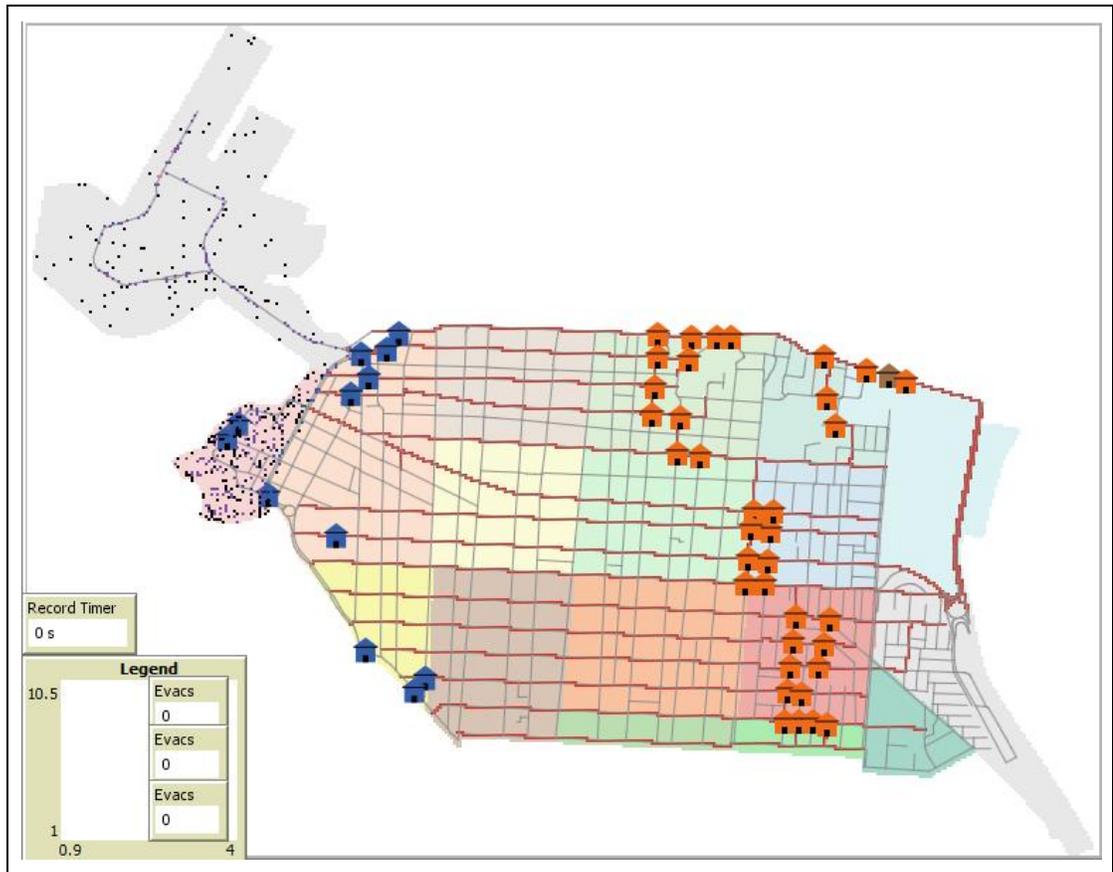


Figura 5.5. Ejemplo Interfaz Netlogo

Fuente: Elaboración Propia

5.6. Supuestos

En esta sección se detallan supuestos que hayan quedado sin mencionar o que no hayan sido explicados con el detalle necesario.

a) Evacuados

- i. Los evacuados, si no tienen ninguna condición permanente, su velocidad corresponderá a la de su grupo etario. En caso de que sí tengan alguna condición

permanente, su velocidad corresponderá a la de la condición. No habrá mezcla de velocidades o ponderaciones por combinación de edad y condición.

- ii. Así mismo, sólo se toma en consideración la condición que es modelada con una velocidad más lenta. Las combinaciones no generan menor velocidad u otro tipo de ponderación.
- iii. Los evacuados no sufren cansancio ni otros malestares físicos o psicológicos que puedan alterar la velocidad. Solo la densidad y la pendiente afectan.
- iv. Como menciona Spearpoint y MacLennan (2012), la obesidad es un problema que disminuye la velocidad de evacuación de las personas. Sin embargo, dado que modelar esto significaría cruzar con más encuestas, se supondrá que esta condición no afecta.
- v. Cuando se componen los grupos, en caso de que el líder no encuentre a nadie que pueda componer el grupo, de todos modos, evacuará y lo hará solo.

b) Autos

- i. El sentido de todas las calles está dado para facilitar la evacuación de la ciudad. Esto significa que no habrá vehículos intentando girar.
- ii. La red parte sin vehículos circulando. Solamente estarán cargados en las calles los autos que su estacionamiento fue asignado en la red.
- iii. Todos los vehículos tienen las mismas dimensiones y tienen la misma equivalencia a personas donde la conversión es de un auto es igual a diez personas para el cálculo de la densidad.

- iv. Los autos pueden aparecer estacionados en la pista de más de la derecha o en la vereda de la izquierda. Los autos que aparecen en la calle son los que, cuando se realizaron los conteos, estaban estacionados en una pista. En tanto, los que aparecen en la vereda representan a los que estaban estacionados en la calle, pero ocupaban parte de la vereda o espacios designados.
- v. Los vehículos, una vez que llegan al Punto de Encuentro, dejan de producir congestión.
- vi. Una vez que los evacuados se suben al auto, no se bajan de este y terminan su ruta en este modo.

6. VALIDACIÓN

En su tesis del 2016, Ignacio Solís divide la validación de los resultados en tres partes: Fuentes de Datos, *Face Validation* y Análisis de Sensibilidad. En el primero utiliza datos del simulacro realizado el 2013 para compararlos con los resultados de su simulación. En el segundo, un panel de expertos del CIGIDEN que revisa los resultados y en el tercero, realiza análisis de sensibilidad para la media de la distribución Rayleigh que marca cuando comienza a evacuar las personas.

Se aprovechará que él ya realizó la validación y se comparará sus resultados con los de la presente tesis para asegurar que los aspectos básicos del modelo no han cambiado. Luego se realizará el análisis de sensibilidad para los aspectos que cambian: vehículos y el efecto de estos sobre la población vulnerable.

6.1. Comparación Modelo Tesis Ignacio Solís

Para la validación se utilizará la Macrozona 2 debido a que, durante el escenario diurno, tiene un gran aumento de la población y concentra gran cantidad de vehículos.

La base de las lógicas de desplazamiento de la población en el modelo de Solís y en el presente son las mismas, sin embargo, él subestima la cantidad de población que hay durante el día en la Macrozona 2. Él estima alrededor de 36,600 personas cuando la estimación realizada por el presente trabajo estima cerca de 48,285 personas. Para poder comparar, se utilizaron la cantidad de personas que estima la EOD que viven en la zona, sin agregar las que deberían llegar por los viajes realizados a esta. Esta cantidad es de cerca de 32,000 personas, lo que se asemeja más a la cantidad utilizada por Solís.

La otra diferencia es que Solís, como se mencionó en la Sección 3, él divide a la población en dos, los lentos y los rápidos, al primero le da una velocidad de $1.5 \left[\frac{m}{s} \right]$ y al otro, de $0.75 \left[\frac{m}{s} \right]$. Los rápidos son las personas entre 10 y 65 años, los lentos el resto.

Así, se obtiene la Figura 6.1. En ella aparecen tres escenarios. “*Free For All*” es la evacuación según las estimaciones del presente trabajo y que se detallará en la siguiente sección. “*Modelación Solís (2016)*” es el caso que modeló Solís en su tesis. Y “*Simulacrum Solís (2016)*” es la modelación usando las 32,000 personas, pero con la separación de grupos y velocidades del presente trabajo.

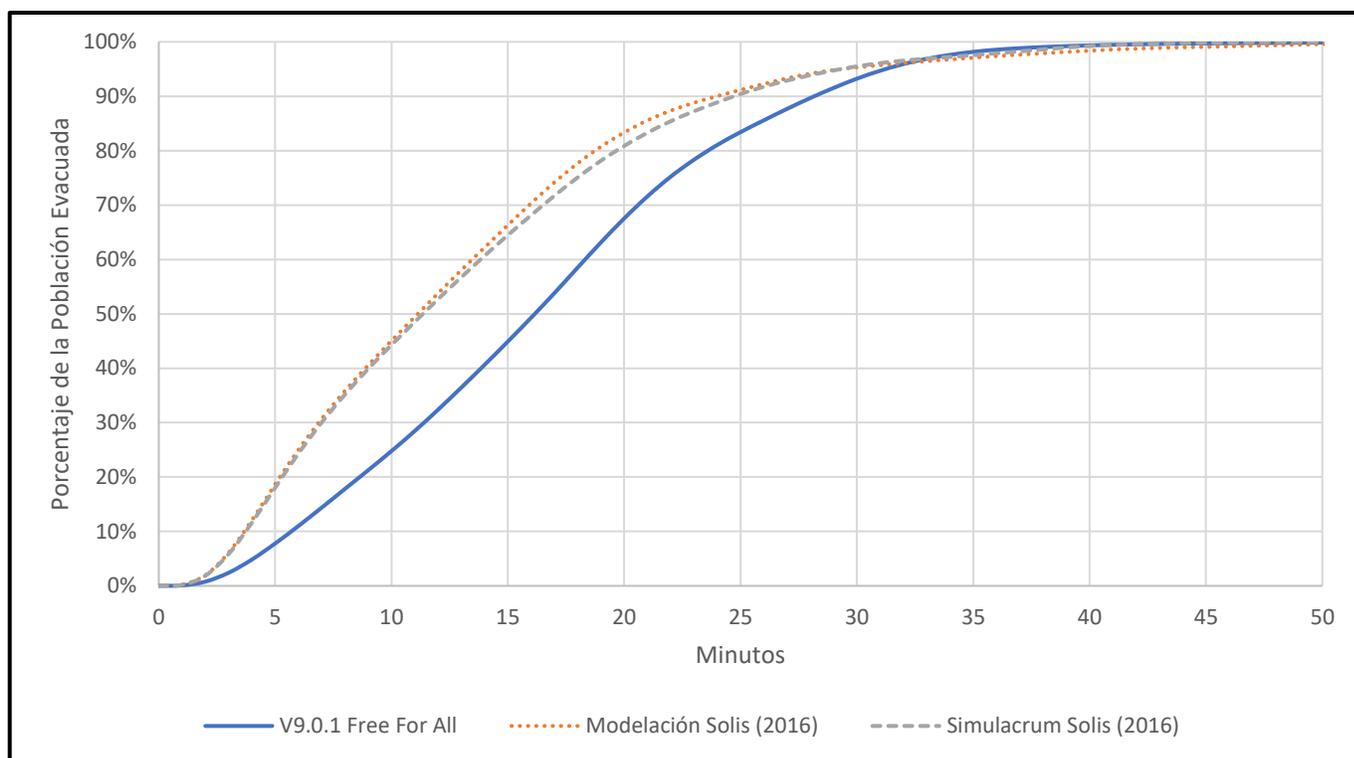


Figura 6.1. Comparación Solís (2016)

Fuente: Elaboración Propia

De la figura se observa que, a pesar de ser 4,500 personas menos, “*Simulacrum Solís (2016)*” tiene una evacuación más lenta pero que sigue el patrón de la Modelación de Solís. Esto es esperable porque el trabajo actual, no solo considera que los grupos más jóvenes y de mayor edad son más lentos, también agrega la consideración de personas con condiciones permanentes que son más lentas.

Esto muestra que el modelo se sostiene en base al trabajo anterior y que es relevante considerar la población vulnerable debido que, a pesar de que hay menor cantidad de personas, la evacuación es más lenta.

En el gráfico también se observa que desde el minuto 32, “*Simulacrum Solís (2016)*” termina la evacuación antes y hay una pequeña parte de la población que tarda más en las

otras dos réplicas. Esto sucede porque en la estimación de Solís, él estima menos personas en la zona del puerto (particularmente alejada de la zona segura) que las estimaciones del presente trabajo.

Como comentario final, en la figura aparece la evacuación *Free For All*. No se comentará en esta subsección, pero es importante que aparezca para tener en consideración la diferencia que se produce por la diferencia en la estimación de la población.

6.2. Casos base

Según las estimaciones, para el corte temporal 2010 en la Macrozona 2 hay 48,285 personas de las cuales 3,943 tienen algún nivel de dependencia (leve, moderado o severo). Así mismo, 7,500 personas tienen algún nivel de dependencia o alguna discapacidad. Con esta información se plantean los tres casos de comparación:

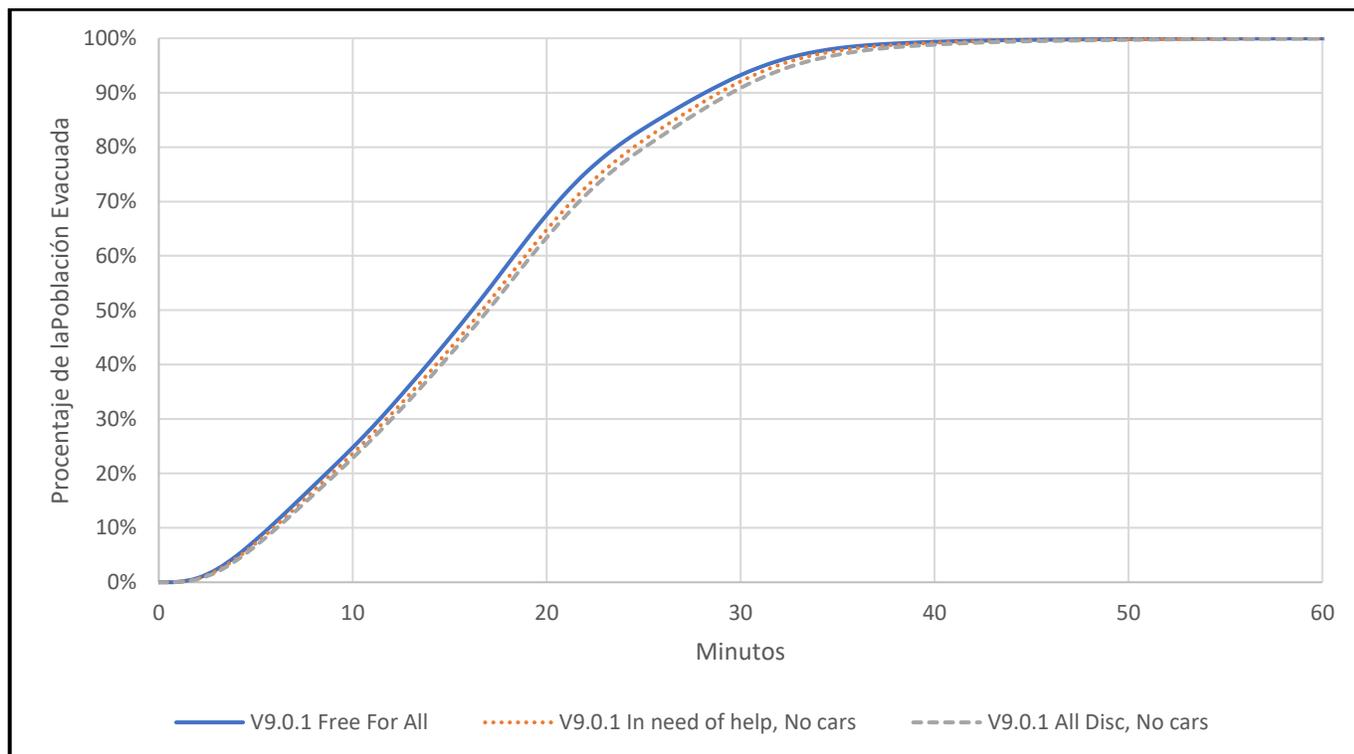
- 1) Todos escapan por su cuenta (abreviado *FFA* del inglés *Free For All*).
- 2) Ayuda a Dependientes (*In need of help*)
- 3) Ayuda a Dependientes y todos los que tengan una discapacidad (*All disc*)

De aquí en adelante los grupos se llamarán según el nombre que aparece entre paréntesis y cuando utilice la expresión “grupo vulnerable”, se puede estar refiriendo al grupo de personas que serán ayudadas en el caso 2) o 3), el contexto hará claro cuál de los dos.

En el caso 1) todos evacuan por su cuenta, independiente si esto es lógico o no. En el Caso 2) Alguien en el grupo etario 2 o 3 sin dificultades ayuda a evacuar a un dependiente.

En el caso 3) alguien del grupo etario 2 o 3 sin dificultades ayuda a evacuar a un dependiente o alguien con condición permanente.

Así se obtienen las curvas acumuladas de personas ya evacuadas Figura 6.2.



	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
FFA	7.8	24.8	44.9	67.5	83.4	93.2	98.2	99.3	99.7	99.9
In need of help	7.2	23.7	42.9	64.8	81.3	92.0	97.7	99.2	99.6	99.8
All disc	6.7	22.8	41.8	63.4	79.8	90.9	97.0	98.8	99.5	99.7

*Valores de las tablas en porcentaje

Figura 6.2. Porcentaje de Población Evacuada: Casos Bases, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede ver, los resultados son consistentes con lo esperado debido a que las personas de los grupos *In need of help* y *All disc* fuerzan a sus acompañantes a caminar más lento lo que a su vez provoca que la evacuación sea más lenta. Así mismo, el grupo

All disc es más lento que el *In need of help* debido a que el segundo es un subconjunto, hay menos personas con dificultades, que el primer grupo.

A continuación, se muestra la Figura 6.3. Este tipo de gráficos será llamado de aquí en adelante como “Gráfico de diferencia caso (nombre del caso de comparación)”. En estos gráficos, se resta la cantidad de personas evacuadas de un escenario menos la cantidad de evacuados en ese minuto del caso de comparación. De esta manera, cuando la curva está en los valores positivos, significa que más personas han evacuado que en el caso de comparación y cuando la curva se encuentra en los valores negativos, es lo contrario.

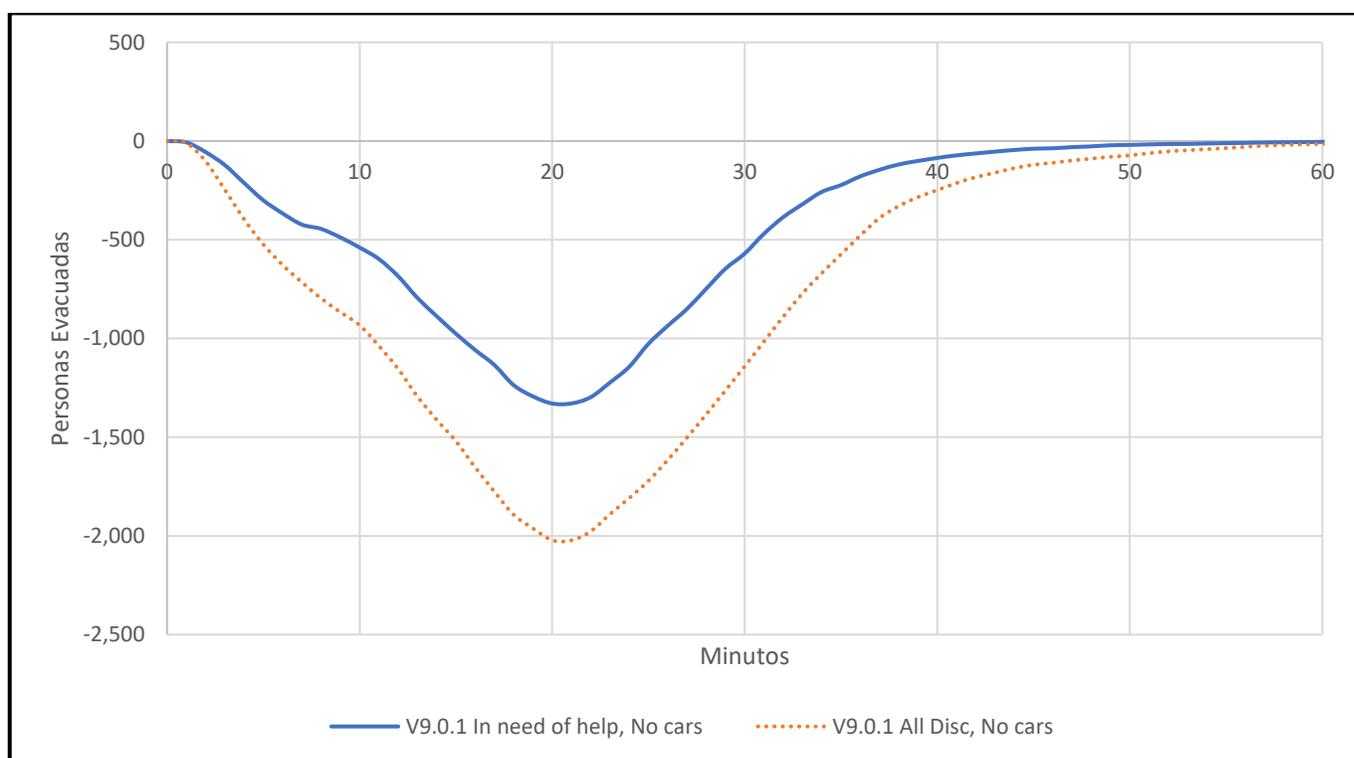


Figura 6.3. Diferencia Caso FFA: MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 6.3. se aprecia de manera más clara como los casos *In need of help* y *All disc* son más lentos que el FFA. En particular, en el minuto 21 desde que comienza la evacuación ocurre la mayor diferencia de evacuados las que, respectivamente, son cerca de 1,330 y 2,020 personas. Esto inmediatamente muestra que es relevante considerar la evacuación en grupos debido a que disminuye considerablemente la velocidad general de evacuación.

6.3. Análisis de sensibilidad

6.3.1. Vehículos

En la Macrozona 2 se estimó un total de 11,164 vehículos que pueden ser utilizados para evacuar en el corte temporal 2010. Sin embargo, como se está realizando el análisis de sensibilidad se simularán escenarios que incluyen más vehículos que esa cantidad para analizar el efecto de estos en la evacuación. De esta manera, todos los casos de esta sección se compararán con la base FFA ya que el fin es analizar el cambio en los tiempos de evacuación.

Con respecto a los vehículos, hay dos principales variables que afectan los tiempos de escape: tiempo en prepararse y subir al auto (*delay* de aquí en adelante), y la cantidad de vehículos que la población puede utilizar. A pesar de que el modelo incorpora naturalmente cierta parte del tiempo en llegar y subirse a un auto debido a que los evacuados deben caminar a este, también se debe considerar el tiempo que tarda la gente en subirse y salir de un estacionamiento, por ejemplo. Por eso se utiliza el *delay*.

Para probar la sensibilidad de estos dos parámetros, se simularon las combinaciones del uso de 4,830; 9,660; 14,490; 19,320; y 24,150 vehículos (10%, 20%, 30%, 40% y 50%

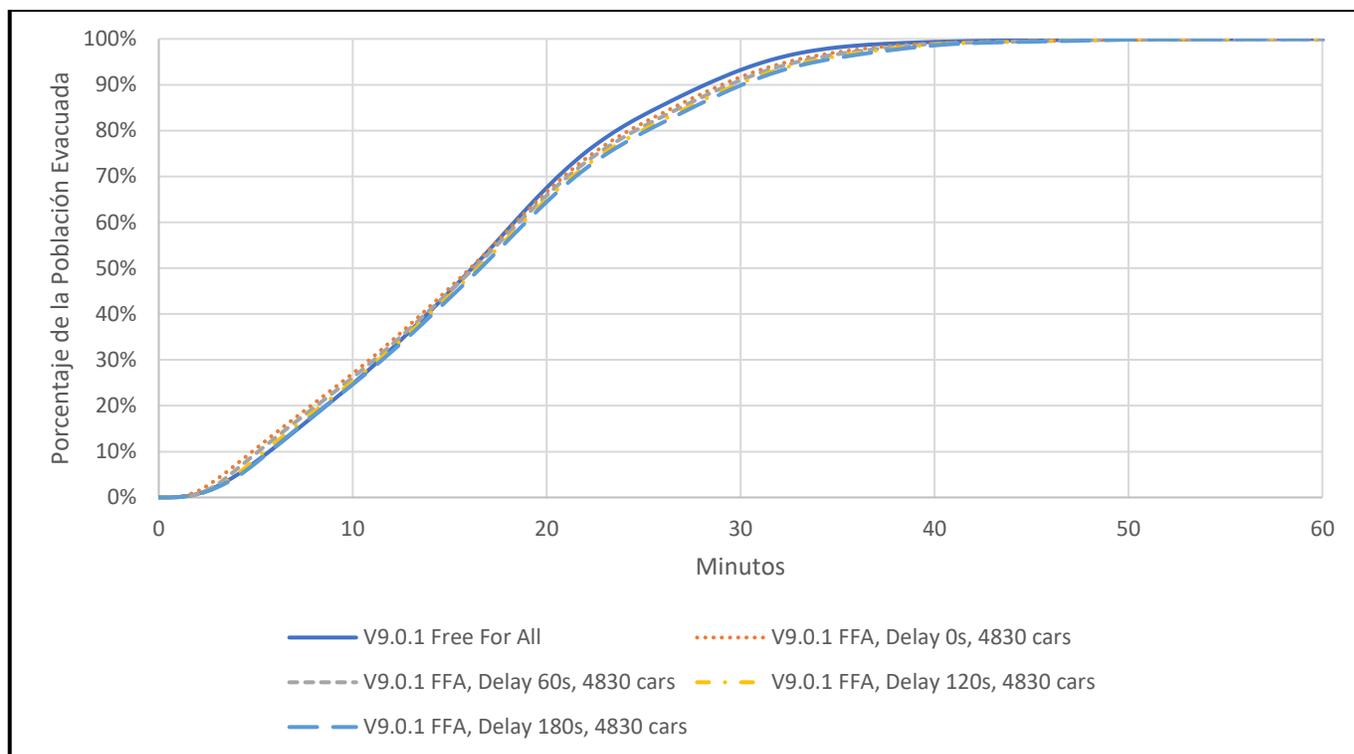
de la población) cruzado con 0[s], 60[s], 120[s] y 180[s] de *delay*. Goto *et al.* (2012) utilizan un *delay* de dos minutos, por eso el análisis de sensibilidad se encuentra entre ese valor.

En las dos subsecciones que siguen se realiza en análisis fijando la cantidad de vehículos y luego con respecto al *delay time*.

6.3.1.1. Sensibilidad cantidad de vehículos fijo

Dado que el comportamiento de las curvas acumuladas de evacuados tiene un comportamiento continuo, solo se mostrará el caso de 4,830; 9,660; y el de 24,150. La razón de esto es que los dos primeros casos representan el uso del 43% y 87% de los autos disponibles. El último se utiliza para mostrar la sensibilidad y que el modelo funcione correctamente. En cada uno de estos tres casos se espera que al aumentar el *delay*, la evacuación sea más lenta debido a que los evacuados en auto tardan más tiempo en partir.

En primer lugar, se encuentra el caso de 4,830 vehículos con variación en el *delay time*.



	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
FFA	7.8	24.8	44.9	67.0	83.4	93.2	98.2	99.3	99.7	99.9
Delay 0s	10.6	27.0	45.7	66.6	81.7	91.7	97.1	99.0	99.5	99.9
Delay 60s	9.6	26.2	44.9	65.8	81.0	91.0	96.7	98.9	99.5	99.9
Delay 120s	8.4	25.3	44.1	65.0	80.2	90.3	96.2	98.7	99.4	99.9
Delay 180s	7.5	24.6	43.5	64.5	79.6	89.9	95.9	98.6	99.4	99.8

*Valores de las tablas en porcentaje

Figura 6.4. Porcentaje de Población Evacuada: 4,830 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

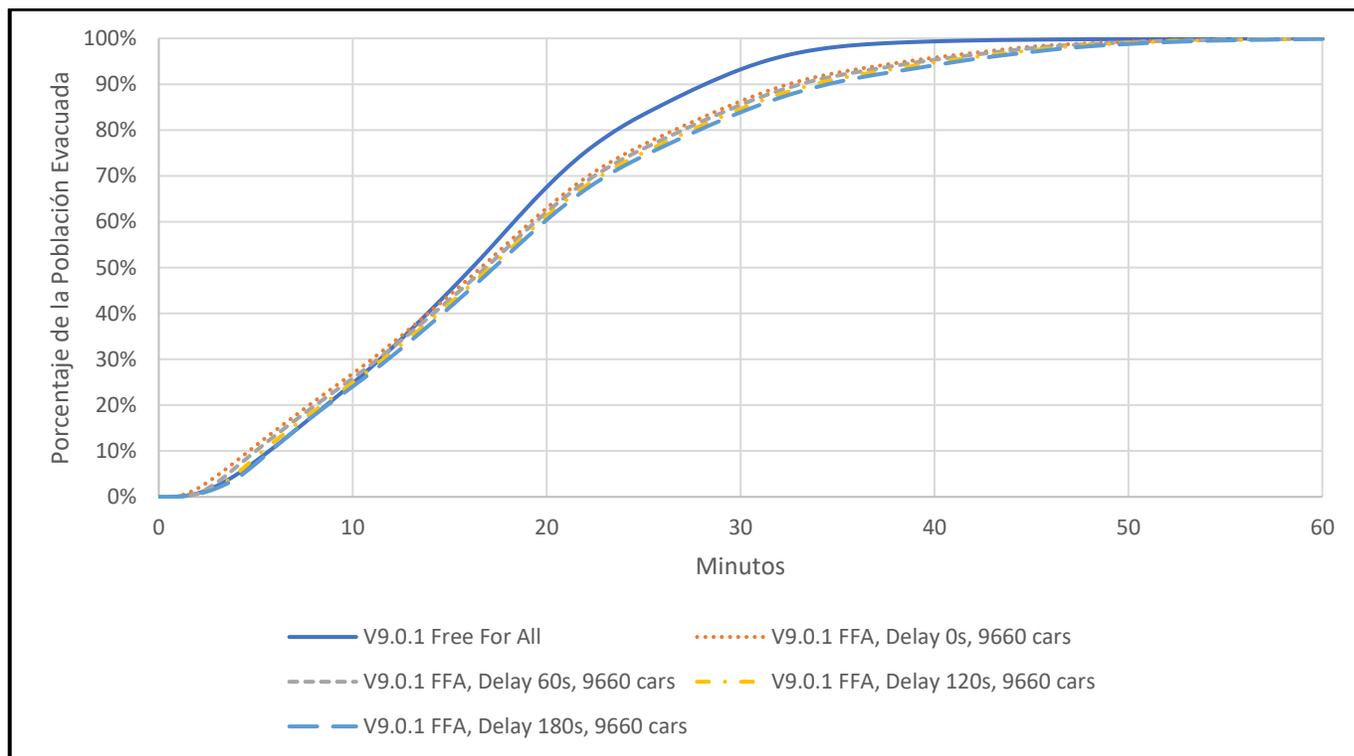
De la Figura 6.4 se observa que, en los primeros minutos de simulación, aproximadamente hasta los 15 minutos, la evacuación en vehículo supera a la que solo se realiza caminando (caso base *FFA*). Este es un fenómeno común que se observa en las simulaciones. Mientras más vehículos disponibles y menos *delay time*, la evacuación en los primeros minutos es más rápida.

Esto se produce porque los primeros evacuados se encuentran con la red prácticamente vacía y pueden evacuar a grandes velocidades. Sin embargo, en la medida que los evacuados a pie empiezan a utilizar las pistas de la calle ya que las veredas se congestionan, el flujo mixto se vuelve caótico y a pesar de que hay un grupo de personas que evacua en auto muy rápido, el desorden en la calle termina superando el efecto de haber menos gente en la red y el resultado es peor.

De esto también se desprende lo que se llamará “problema de la red vacía”. Este consiste en que al no haber personas y vehículos viajando por la red antes de que comience la evacuación, la población se encontrará con una densidad falsamente baja al comienzo del escape. Esto en la realidad no sucede porque hay gente caminando por las veredas y utilizando las calles para moverse por la ciudad.

En los trabajos revisados que existe evacuación multimodal no mencionan este problema ni se encargan de este. Sin embargo, hay autores que estiman cierta cantidad de personas naturalmente en la red o simulan el funcionamiento de la ciudad antes del desastre. Por ejemplo, Castro *et al.* (2019) estiman la cantidad de personas y vehículos en la red en base a cantidades por metro cuadrado, sin embargo, a juicio del autor del presente trabajo, ellos sobre estiman la cantidad de personas en la zona modelada. Por el otro lado, Dawson *et al.* (2011) simulan el funcionamiento de la ciudad antes de empezar a evacuar. Esta aproximación es más rigurosa y en el caso de las ciudades de Chile se puede realizar utilizando la EOD respectiva ya que esta incluye información del origen, destino, modo y momento del viaje. Sin embargo, esto escapa a lo que esta tesis aspira a lograr.

Volviendo al análisis de sensibilidad, el siguiente caso es cuando se pueden utilizar hasta 9,660 vehículos para la evacuación. En la Figura 6.5 se puede observar claramente el aumento del tiempo de evacuación del segmento de ciudad con respecto al caso anterior.



	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
FFA	7.8	24.8	44.9	67.5	83.4	93.2	98.2	99.3	99.7	99.9
Delay 0s	11.2	26.9	44.0	63.0	76.9	86.3	92.5	95.8	98.2	99.3
Delay 60s	10.0	25.9	43.0	62.1	76.0	85.5	91.9	95.3	97.9	99.1
Delay 120s	8.6	24.9	42.2	61.2	75.1	84.6	91.2	94.7	97.4	99.0
Delay 180s	7.2	24.1	41.3	60.4	74.4	83.9	90.5	94.1	97.0	98.8

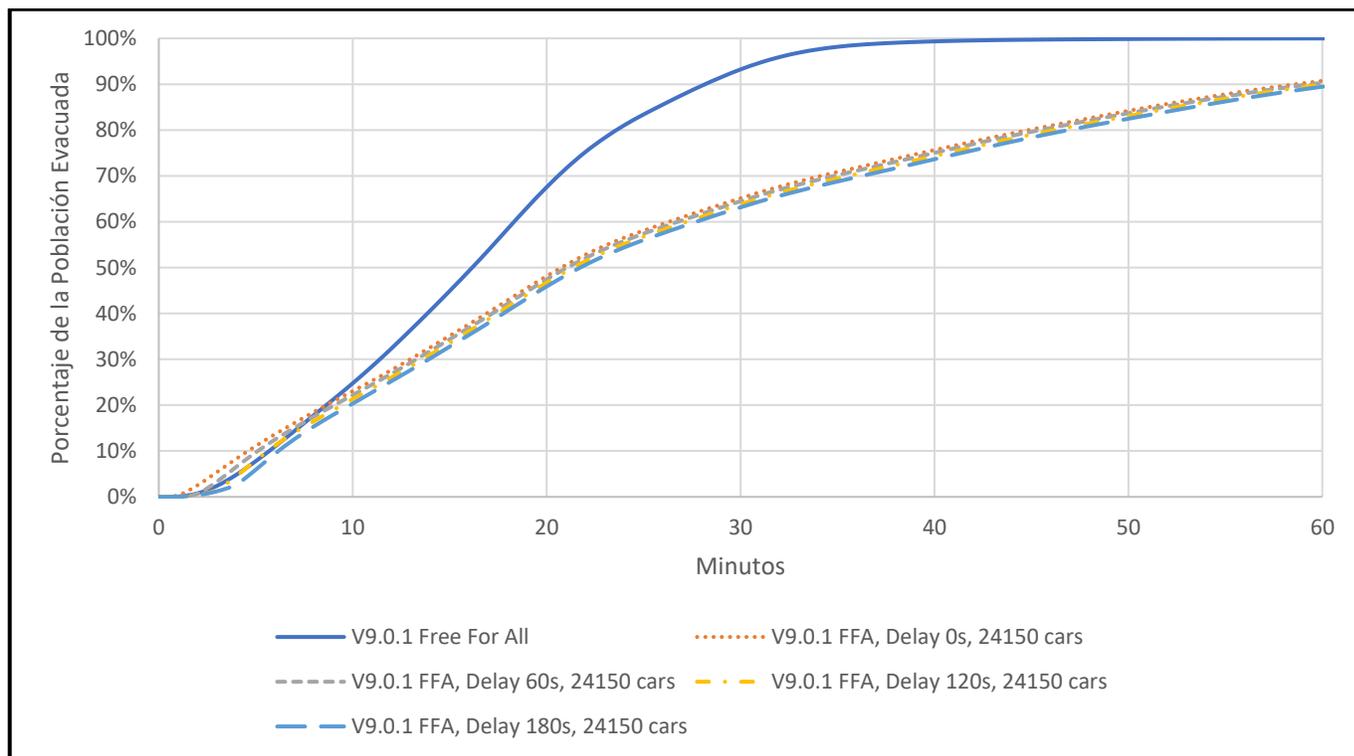
*Valores de las tablas en porcentaje

Figura 6.5. Porcentaje de Población Evacuada: 9,660 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, en el caso extremo superior, el de 24,150 vehículos, se observa un tiempo de evacuación radicalmente mayor que en los casos pasados (Figura 6.6). De esta manera es claro y el modelo se comporta según lo esperado: el uso indiscriminado de los vehículos

empeora los tiempos de evacuación de la ciudad. La razón de esto se debe a la combinación caótica de peatones y vehículos que se analizó cuando se estaba intentando entender el “problema de la red vacía”.



	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
FFA	7.8	24.8	44.9	67.5	83.4	93.2	98.2	99.3	99.7	99.9
Delay 0s	11.1	23.1	35.1	48.2	58.1	65.1	70.9	75.6	80.1	84.2
Delay 60s	9.7	22.2	34.4	47.4	57.4	64.5	70.2	75.0	79.6	83.7
Delay 120s	8.0	21.3	33.6	46.7	56.7	63.8	69.4	74.3	79.0	83.1
Delay 180s	5.9	20.3	32.8	45.9	56.0	63.1	68.8	73.6	78.4	82.5

*Valores de las tablas en porcentaje

Figura 6.6. Porcentaje de Población Evacuada: 24,150 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

Al momento de analizar en detalle los tres casos se concluye que un aumento del *delay time* no es tan relevante a la hora de la evacuación y actúa de manera independiente con la cantidad de vehículos.

En la Tabla 6.1 se muestra en qué momento se produce el mayor retraso de la evacuación comparado con el caso base *FFA*, o sea, el momento de la mayor diferencia de personas evacuadas. Además, en la tabla aparece la diferencia de personas que han evacuado entre el escenario de *delay* 0 segundos y 180 segundos.

Tabla 6.1. Momento Máximo Retraso

	4,830 cars	9,660 cars	24,150 cars
Momento máximo retraso[<i>min</i>]	26	29	32
Diferencia <i>delay</i> 0-180[<i>s</i>]	1,009	1,165	971

Fuente: Elaboración Propia

Uno de los hallazgos es que el *delay* time no afecta el momento en que se produce la mayor diferencia de personas evacuadas con respecto al caso base dentro de una misma cantidad de vehículos. No importa si hay un *delay* de 0 o de 180 segundos en el caso de 4,830 vehículos, el máximo retraso ocurre a los 26 minutos.

Esto hace concluir que el *delay* time no afecta cuando va a terminar la evacuación, sino que es la congestión el principal responsable de esto. De lo contrario, el *delay* afectaría el comportamiento de cuándo se produce el mayor déficit de personas evacuadas en la ciudad. Para ser más preciso, el *delay* principalmente afecta la primera mitad de la evacuación, o sea qué tan rápido se van aquellos que no enfrentan mayor congestión. Sin embargo, en la segunda mitad, cuando la congestión se hace más severa, este es el factor clave.

Además, de la Tabla 6.1 se observa que la diferencia de personas evacuadas entre los escenarios de diferente cantidad de vehículos para un mismo par de tiempos oscila entre

un mismo valor. Por ejemplo, para el par *delay* 0-180 segundos, en el momento de máximo retraso, la diferencia está alrededor de 1,000. Es más, esta diferencia, una vez que la red ya se cargó, prácticamente no cambia. De esto se concluye que no hay efectos combinados entre cantidad de vehículos utilizados para escapar y las diferentes opciones de *delay time*.

Estos dos fenómenos se pueden observar en los tres gráficos de diferencia que siguen.

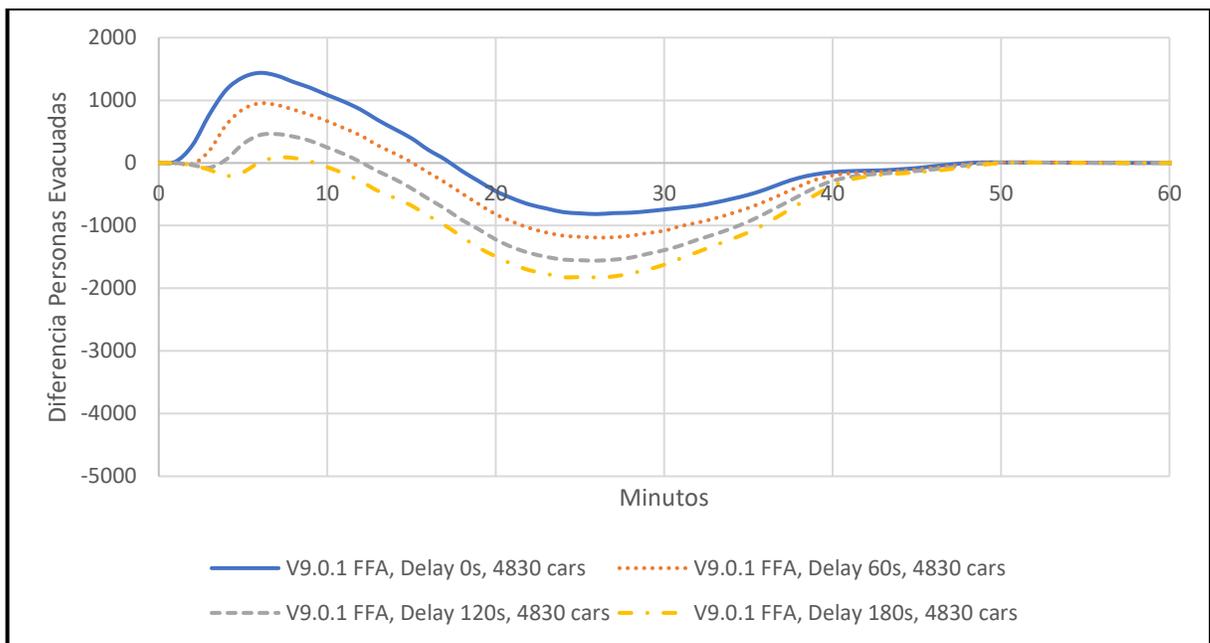


Figura 6.7. Diferencia Caso FFA: 4,830 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

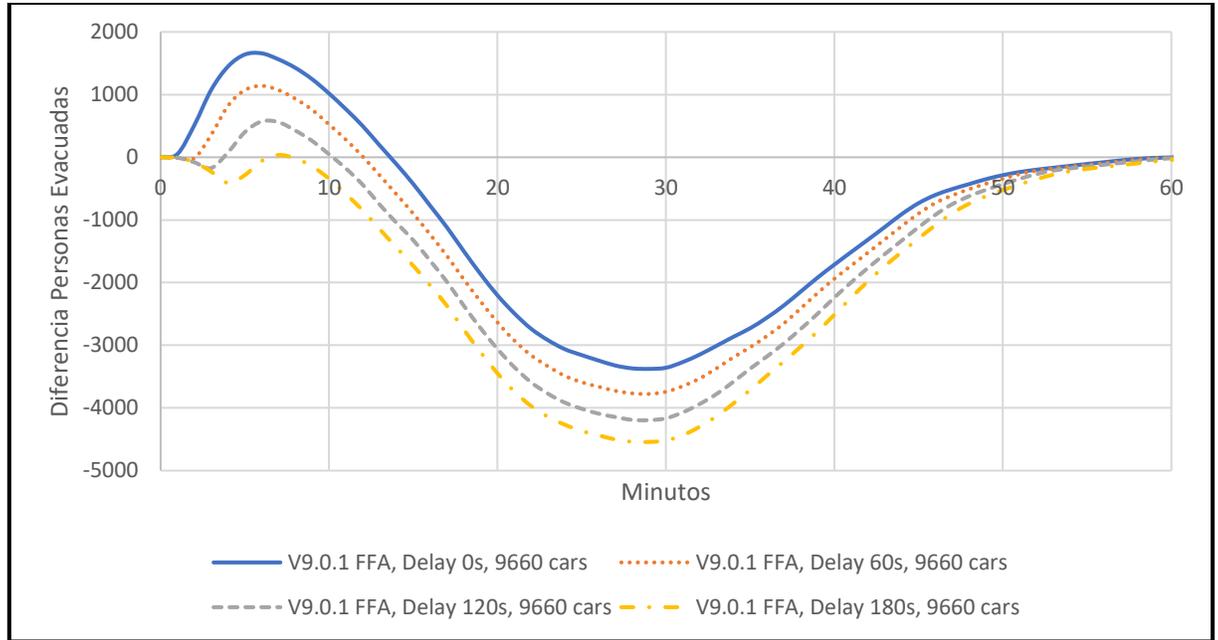


Figura 6.8. Diferencia Caso FFA: 9,660 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

***Notar cambio de escala de esta figura con respecto a las dos anteriores.**

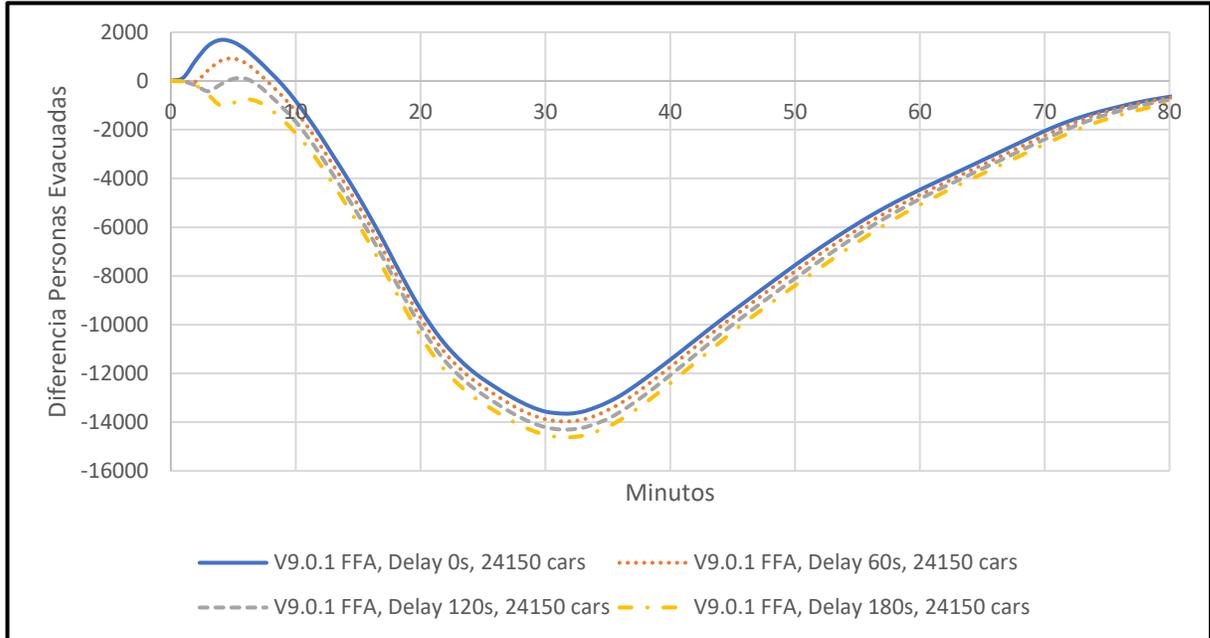


Figura 6.9. Diferencia Caso FFA: 24,150 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

En las tres figuras se puede ver que el *delay* afecta cuantos evacuan al comienzo. Si el *delay* es 0 segundos, es cuando más escapan en los primeros minutos y cuando el *delay* es 180 segundos, menos personas que el caso base escapan en los primeros 10 minutos. Sin embargo, esta diferencia de aproximadamente 2,000 personas entre ambos casos disminuye cuando la congestión se vuelve el principal factor y se hace estable alrededor de 1,000 personas.

Además, al comparar las tres figuras, se observa que el momento en que finaliza la evacuación depende de la cantidad de vehículos principalmente y en mucha menor medida, el *delay time*.

6.3.1.2. Sensibilidad *delay time* fijo

En la Figura 6.10 se puede observar el comportamiento de la evacuación cuando se fija el *delay time* y varía la cantidad de vehículos utilizados. De esto se espera que a medida que aumentan la cantidad de vehículos utilizados, aumente el tiempo que demora en evacuar la ciudad.

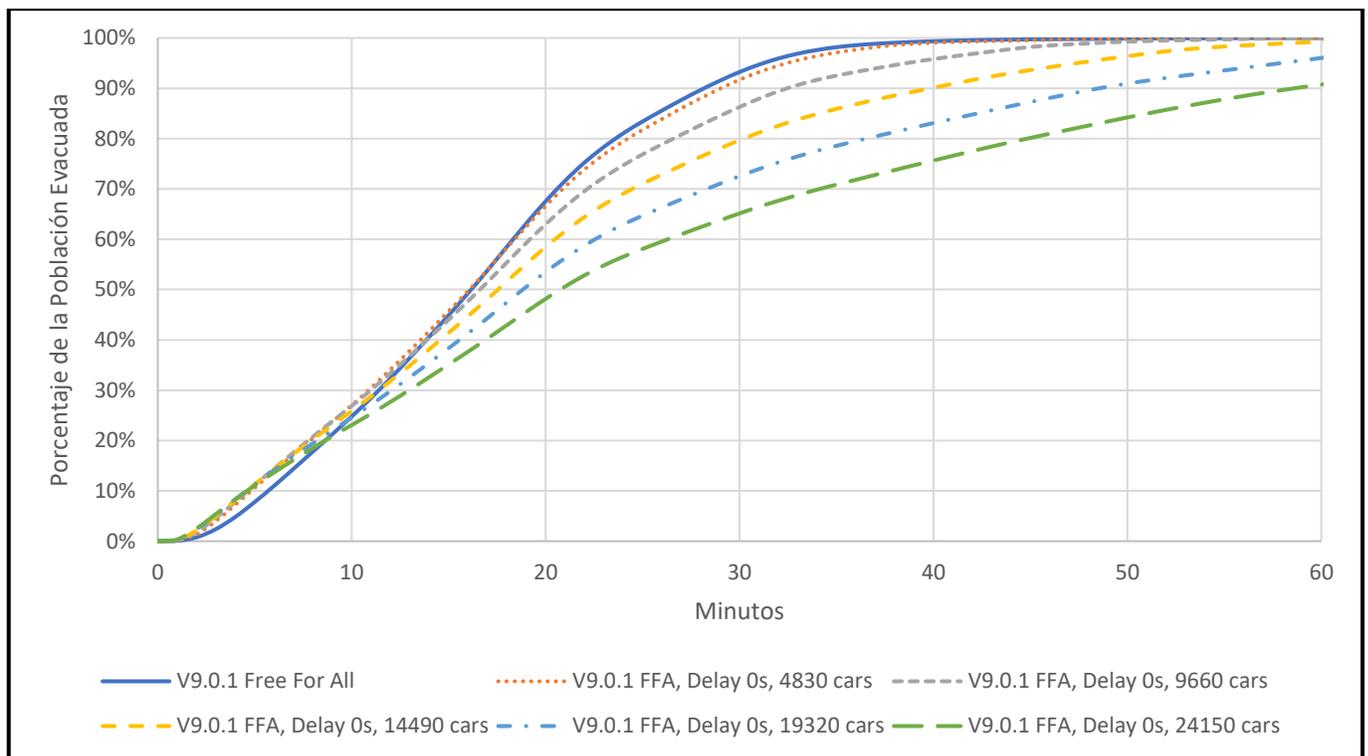


Figura 6.10 Porcentaje de Población Evacuada: *Delay time* 0s, MacroZona 2, Corte 2010

Fuente: Elaboración Propia

A partir de este se refuerza lo dicho en la sección anterior: en la medida que aumentan los vehículos, los tiempos de evacuación empeoran. A pesar de que convendría mostrar este mismo gráfico, pero con *delay* de 180 segundos, la diferencia no es lo suficiente grande para ser distinguible visualmente. Para solucionar esto se utilizan las Tablas 6.2, 6.3 y 6.4.

Tabla 6.2. Porcentaje de Población Evacuada: 4,830 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
4,830 cars delay 0s	10.6	27.0	45.7	66.6	81.7	91.7	97.1	99.0	99.5	99.9
4,830 cars delay 180s	7.5	24.6	43.5	64.5	79.6	89.9	95.9	98.6	99.4	99.8

*Valores de las tablas en porcentaje

Fuente: Elaboración Propia

Entre la Tabla 6.2 y la Tabla 6.3, nuevamente se ve como la cantidad de vehículos es el principal responsable del retraso en la evacuación. Por ejemplo, al minuto 25, entre el caso de 4,830 vehículos con el de 9,660 hay aproximadamente una diferencia de 5% en *delays* equivalentes, pero entre extremos de retraso hay aproximadamente un 2% de diferencia en la cantidad de personas que han evacuado.

Tabla 6.3. Porcentaje de Población Evacuada: 9,660 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
9,660 cars delay 0s	11.2	26.9	44.0	63.0	76.9	86.3	92.5	95.8	98.2	99.3
9,660 cars delay 180s	7.2	24.1	41.3	60.4	74.4	83.9	90.5	94.1	97.0	98.8

*Valores de las tablas en porcentaje

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, la Tabla 6.4 muestra el escenario con 24,150 vehículos en donde hay una gran cantidad personas que no han evacuado comparado con el caso anterior pero la diferencia del 2% provocada por el *delay* se mantiene.

Tabla 6.4. Porcentaje de Población Evacuada: 24,150 vehículos, MacroZona 2, Corte 2010

	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min
24,150 cars Dealy 180s	11.1	23.1	35.1	48.2	58.1	65.1	70.9	75.6	80.1	84.2
24,150 cars delay 0s	5.9	20.3	32.8	45.9	56.0	63.1	68.8	73.6	78.4	82.5

*Valores de las tablas en porcentaje

Fuente: Elaboración Propia

Como conclusión, variar el *delay time* no tiene gran efecto en los resultados de la simulación. Sin embargo, el modelo es sensible a la cantidad de vehículos por lo que, si se utilizan, se debe hacer con precaución. De lo contrario, la red se enfrentará con mayor congestión. También es importante destacar que no se hizo mayor análisis de los primeros minutos de evacuación debido al “problema de la red vacía” ya que cualquier conclusión que se saqué de este periodo puede cuestionarse.

6.3.2. Población vulnerable

En esta sección se explora la interacción entre los grupos vulnerables y los vehículos. El primer grupo por analizar está compuesto aquellos que tengan algún nivel de dependencia y está compuesto por 3,943 personas. Este, como ya se mencionó, es el grupo “Necesidad de ayuda” o INoH para abreviar.

El segundo grupo está compuesto por aquellos que tienen algún grado de dependencia y/o tienen alguna condición permanente. 7,500 personas caen en esta categoría y es llamada “All Disc”.

Es esperable que el primer caso sea más rápido que el segundo porque es necesario ayudar a un porcentaje menor de la población más lenta.

6.3.2.1. “Necesidad de ayuda”

Dado que las diferencias en este análisis son más pequeñas que en el caso anterior, se utilizarán los “gráficos de diferencia” en vez de las curvas acumuladas. Como base se utilizará el caso “V9.0.1 In Need of Help, No cars” que aparece en la Figura 6.2.

De esta manera, en la Figura 6.11 hay cuatro curvas que corresponden a la comparación con el caso base recién mencionado. En este se muestran cuatro casos en donde la cantidad de vehículos está fija en 1,000 y varía el *delay time* y quienes pueden utilizar los vehículos. En los casos que aparece “*Everyone use*” significa que cualquier persona o cualquier pareja puede utilizar un vehículo. En tanto, en los casos “*Vulnerable use*” solamente las parejas pueden utilizar los vehículos.

Es importante recordar que en estos casos las personas que pertenezcan al grupo definido como vulnerable, busquen un acompañante que los ayude a evacuar y crearan una pareja. Nadie más crea parejas.

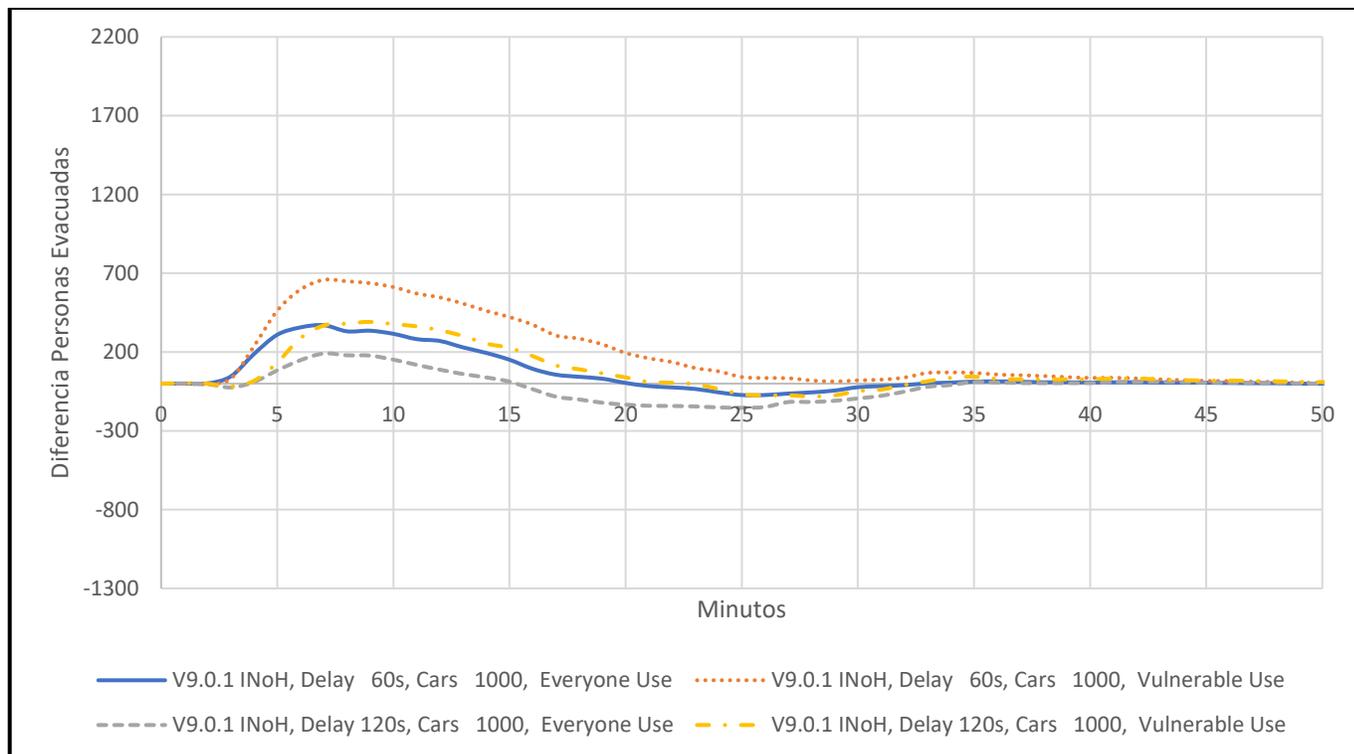


Figura 6.11 Diferencia “V9.0.1 In Need of Help, No cars”: comparación 1,000 vehículos

Fuente: Elaboración Propia

Lo primero que se desprende de esta figura es la consistencia entre los resultados y lo esperado a la hora de comparar cuando solamente las parejas conformadas por alguien sin dificultades y una persona del grupo INoH utilizan vehículos en comparación a cuando todos pueden utilizarlos. Esto se puede ver al comparar la línea naranja y azul. Ambos son el mismo caso a excepción que en la naranja solo los vulnerables y su acompañante pueden utilizar los vehículos. En la misma línea, el peor caso (línea gris) es aquel que tiene el mayor *delay time* y todos pueden usar los vehículos disponibles.

Un resultado inesperado es que una utilización estratégica de los vehículos por uno aleatorio, en este caso, significa que el comportamiento de la evacuación es similar a una que tiene un *delay time* 60 segundos menor que ella. Esto se desprende al comparar el

caso en donde todos utilizan vehículos con 60 segundos de *delay* (línea azul) contra el caso en donde solo el grupo vulnerable usa vehículos y tiene un *delay* de 120 segundos (línea amarilla).

En la Figura 6.12, que plantea las mismas condiciones, pero con 3,943 vehículos, ocurren los mismos dos fenómenos que se acaban de describir.

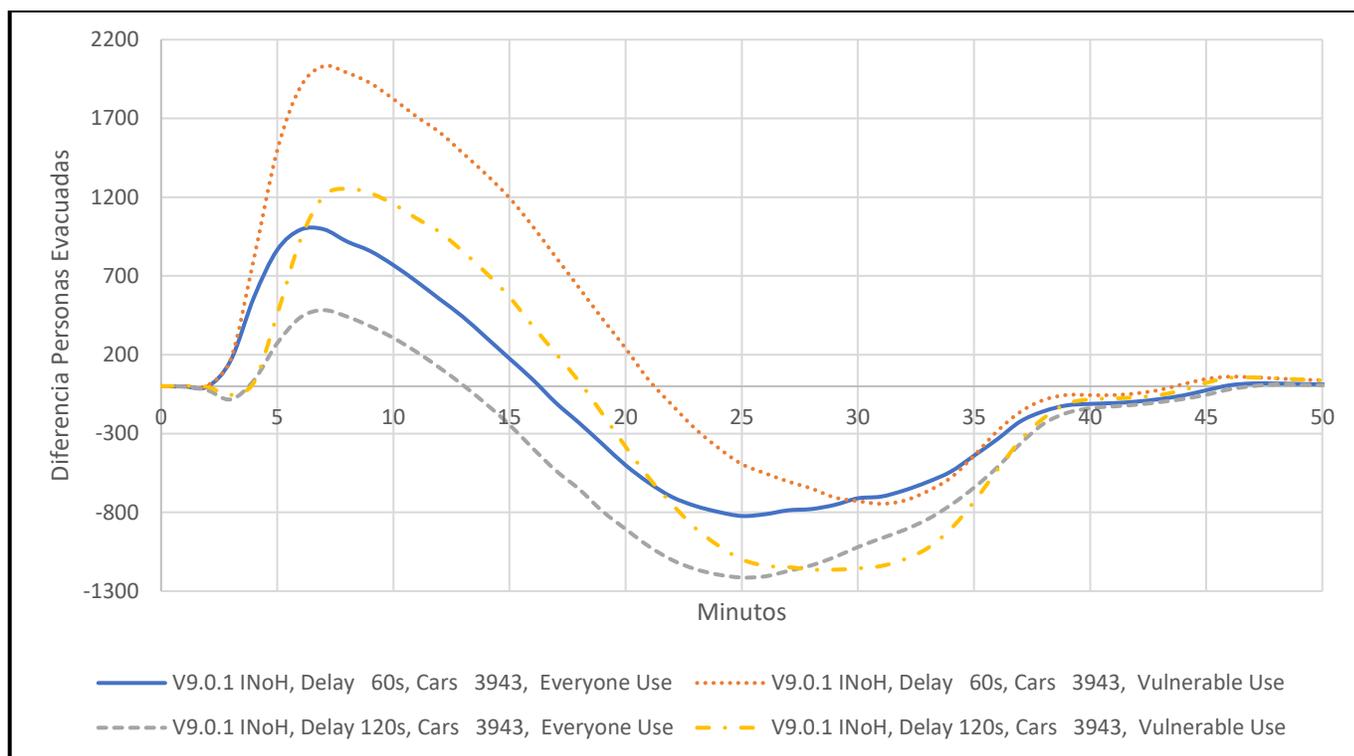


Figura 6.12 Diferencia “V9.0.1 In Need of Help, No cars”: comparación 3,943 vehículos

Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, en estos escenarios, se hace patente que, en los casos de 60 y 120 segundos de *delay* y uso de vehículos por los vulnerables, aunque al comienzo la evacuación es más rápida que el homólogo en que todos pueden utilizar los vehículos; al final es peor. Esto solo ocurre cuando hay 3,943 vehículos disponibles. En los escenarios

con 500, 1,000 y 1,970 vehículos disponibles esto no sucede, aunque progresivamente va empeorando en la medida que aumentan los vehículos.

Esto ocurre porque la distribución dentro de la ciudad de los vulnerables no es igual, por lo tanto, ciertas configuraciones provocan que los autos tengan que recorrer más distancia, lo que implica que están más tiempo en la red generando congestión. En los resultados, Sección 7.2, se analiza con mayor detalle un ejemplo de este fenómeno.

Es posible que también afecte el hecho de que los casos en que cualquiera puede utilizar un automóvil se permiten que haya vehículos con solo un pasajero. En cambio, cuando solo el grupo vulnerable puede utilizar automóviles, siempre se subirán dos personas: el vulnerable y su acompañante. Esto provoca que, en el segundo caso, siempre que un auto llega a un punto de encuentro, los dos pasajeros en vez de uno lo hacen. Sin embargo, esto no explica por qué la segunda mitad es peor que el caso en que todos pueden usar los vehículos disponibles.

Finalmente, en los diferentes escenarios no es totalmente claro si se debe permitir el uso de vehículos para evacuar al grupo INoH dado que la utilización de estos no genera una mejora absoluta con respecto al caso base. Utilizando el mejor caso (*Delay* 60s y 1,000 vehículos) se construye la Comparación Escenarios INoH: Tabla 6.5 y Tabla 6.6.

Tabla 6.5. Comparación Escenarios INoH: Porcentaje del Total de Evacuados

	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min
Total (V9.0.1 INoH, No cars)	7.2%	23.7%	42.9%	64.8%	81.3%	92.0%	97.7%	99.2%
Total (<i>Delay</i> 60s, Cars 1,000)	9.0%	25.9%	44.4%	65.4%	81.2%	91.8%	97.9%	99.3%
Diferencia	1.8%	2.2%	1.5%	0.6%	-0.1%	-0.2%	0.2%	0.1%

Fuente: Elaboración Propia

La diferencia al comienzo es a favor del uso estratégico de vehículos, pero desde el minuto 25 la evacuación es ligeramente más lenta en el caso cuando se observa la población completa. En tanto, en la Tabla 6.6 se ve el efecto cuando solo sobre la población vulnerable.

Tabla 6.6. Comparación Escenarios INoH: Porcentaje del Grupo Vulnerable

	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min
Vulnerable (V9.0.1 INoH, No cars)	5.0%	19.2%	34.1%	52.9%	71.9%	86.4%	95.0%	97.9%
Vulnerable (<i>Delay</i> 60s, Cars 1,000)	16.1%	33.1%	43.6%	56.6%	71.8%	84.8%	96.0%	98.5%
Diferencia	11.1%	13.9%	9.5%	3.8%	-0.1%	-1.6%	0.9%	0.6%

Fuente: Elaboración Propia

El cambio es drástico y la población vulnerable se ve muy favorecida. Incluso, durante los primeros 15 minutos, los vulnerables evacuan más rápido que el resto, así, eliminando el sesgo que tiene su grupo. Dado que los tiempos de evacuación empeoran en la segunda mitad de la evacuación, se debe analizar el uso de vehículos caso a caso ya que puede ser beneficio alejar a la gente que este muy cerca del nivel del mar.

Como cierre, se debe recordar que el efecto de la “red vacía” puede estar provocando esta mejora durante los primeros 20 minutos lo que impide sacar conclusiones de por qué el modelo se comporta de esta manera. Para sortear esta dificultad, en la sección de resultados se utiliza el corte temporal 2019, lo que permite incluir el conteo de vehículos estacionados. Aun así, no se consideran los autos y personas que ya están en la realidad, pero es un paso en esa dirección.

6.3.2.2. Evacuación población *All disc*

Al igual que con el segmento de la población INoH, las diferencias entre casos son menores por lo que se utilizan los “gráficos de diferencia”. Además, para poder comparar con los escenarios de la sección anterior, el caso base a utilizar será “V9.0.1 All Disc, No cars” que representa la evacuación cuando todos los que tienen alguna dificultad o grado de dependencia son ayudados por alguien sin problemas.

Con esto, en la Figura 6.13 y Figura 6.14 se muestran los casos con 1,000 y 3,943 vehículos disponibles para evacuar. Estos tienen la misma configuración que los mostrados en la subsección anterior, pero con un grupo poblacional diferente. En tanto, la Figura 6.15 muestra el caso extremo cuando las 7,500 personas que pertenecen al grupo *All Disc* utilizan un vehículo para evacuar.

De las dos figuras que siguen se distinguen los patrones que se observaron lo que corrobora la solidez del modelo.

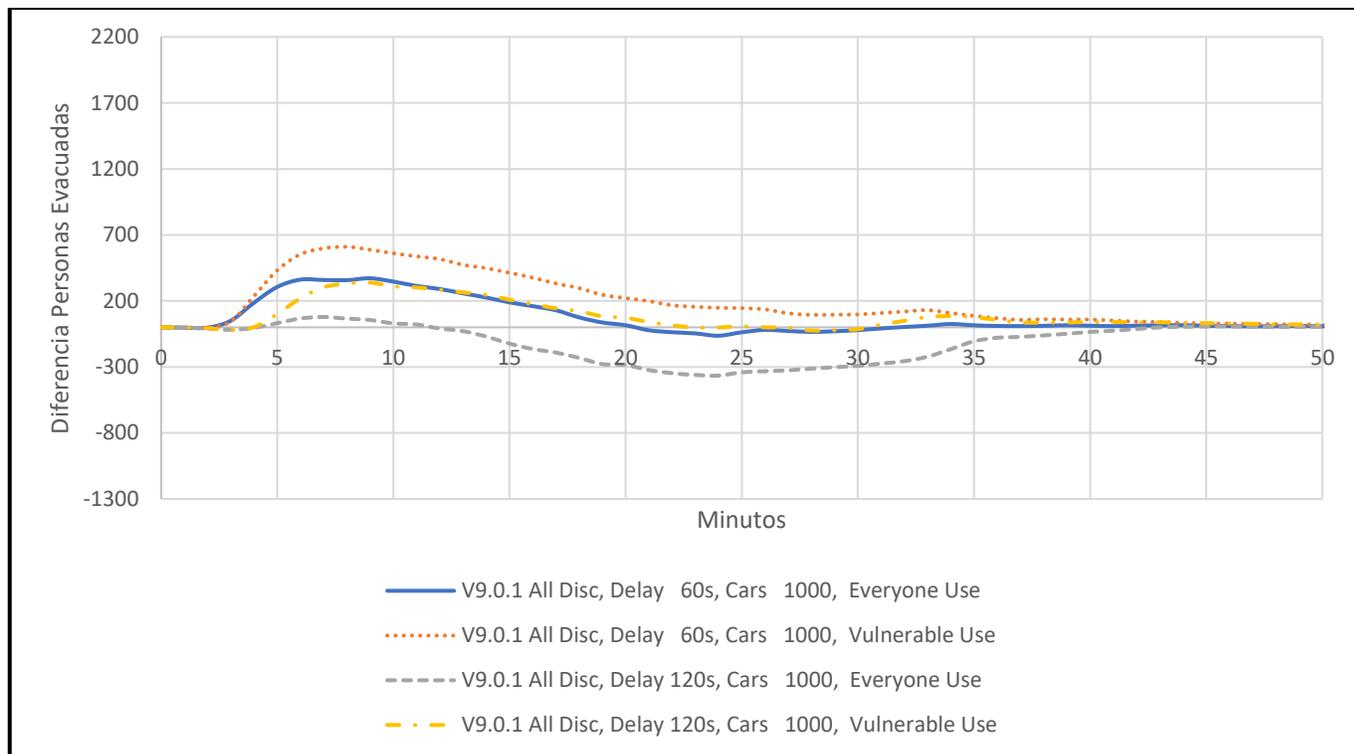


Figura 6.13. Diferencia “V9.0.1 All Disc, No cars”: comparación 1,000 vehículos

Fuente: Elaboración Propia

En primer lugar, cuando el grupo vulnerable y sus acompañantes son los que pueden utilizar el vehículo, la evacuación es más rápida que en el caso homólogo con uso aleatorio de los autos. Esto es claro al comparar las curvas naranjas con las azules y las amarillas con las grises.

Como aclaración, cuando se habla del caso homólogo, se está refiriendo al caso que tiene igual grupo vulnerable para emparejar, el *delay time* es el mismo, la cantidad de vehículos es la misma, pero quienes los pueden usar es diferente.

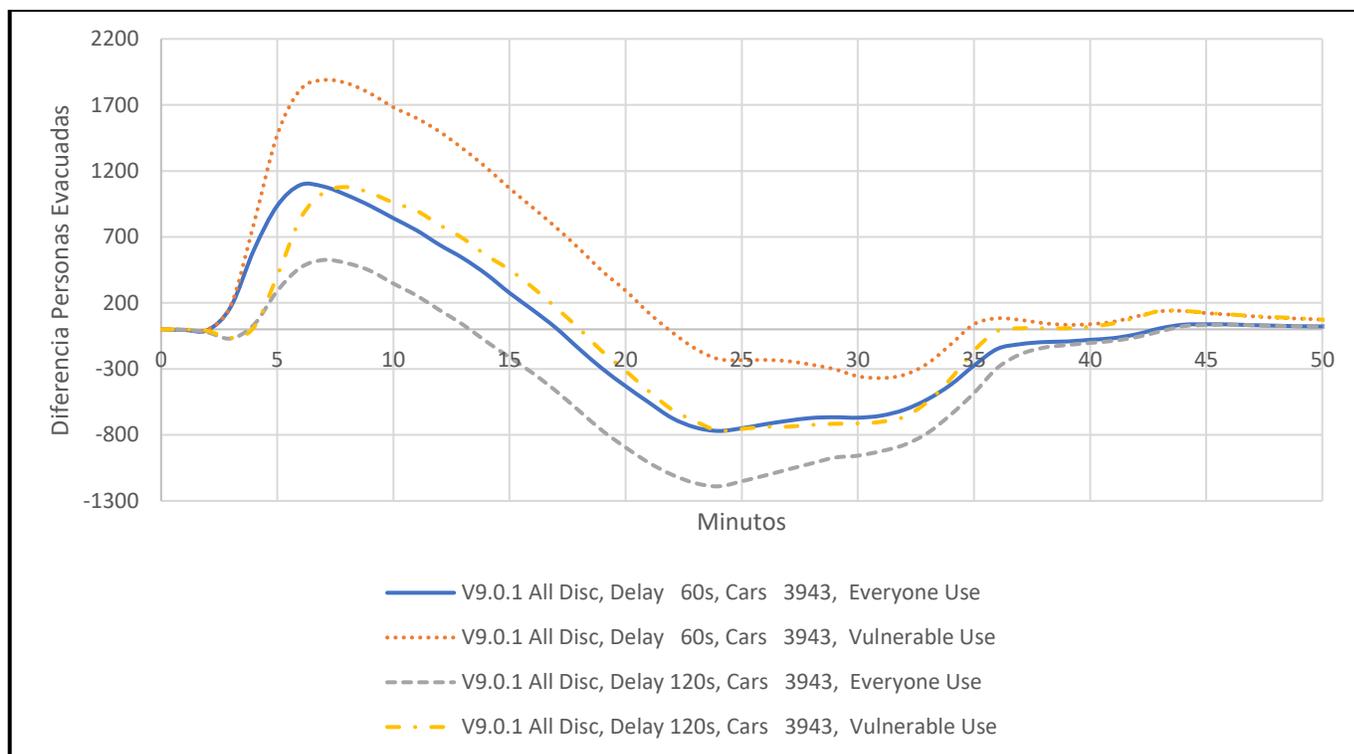


Figura 6.14. Diferencia “V9.0.1 All Disc, No cars”: comparación 3,943 vehículos

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, se observa que el uso estratégico de los vehículos en comparación aleatorio es a lo menos tan bueno como 60 segundos de *delay* para la evacuación de la ciudad (comparación curvas amarillas con azules). Es más, en la Figura 6.15, la diferencia entre el caso de uso estratégico con *delay* de 120 segundos contra el caso de uso aleatorio con *delay* de 60 segundos es mucho mayor. Esto indica que la población vulnerable se ve beneficiada en los primeros 17 minutos de evacuación, pero luego la evacuación se vuelve más lenta que el caso base. Esto confirma que el uso de vehículos se debe analizar caso a caso y que se debe tener en consideración el tiempo que tarda en llegar el tsunami porque esto puede provocar que sea beneficioso alejarse rápidamente del nivel cero sobre el nivel del mar, además de la geografía de la macrozona.

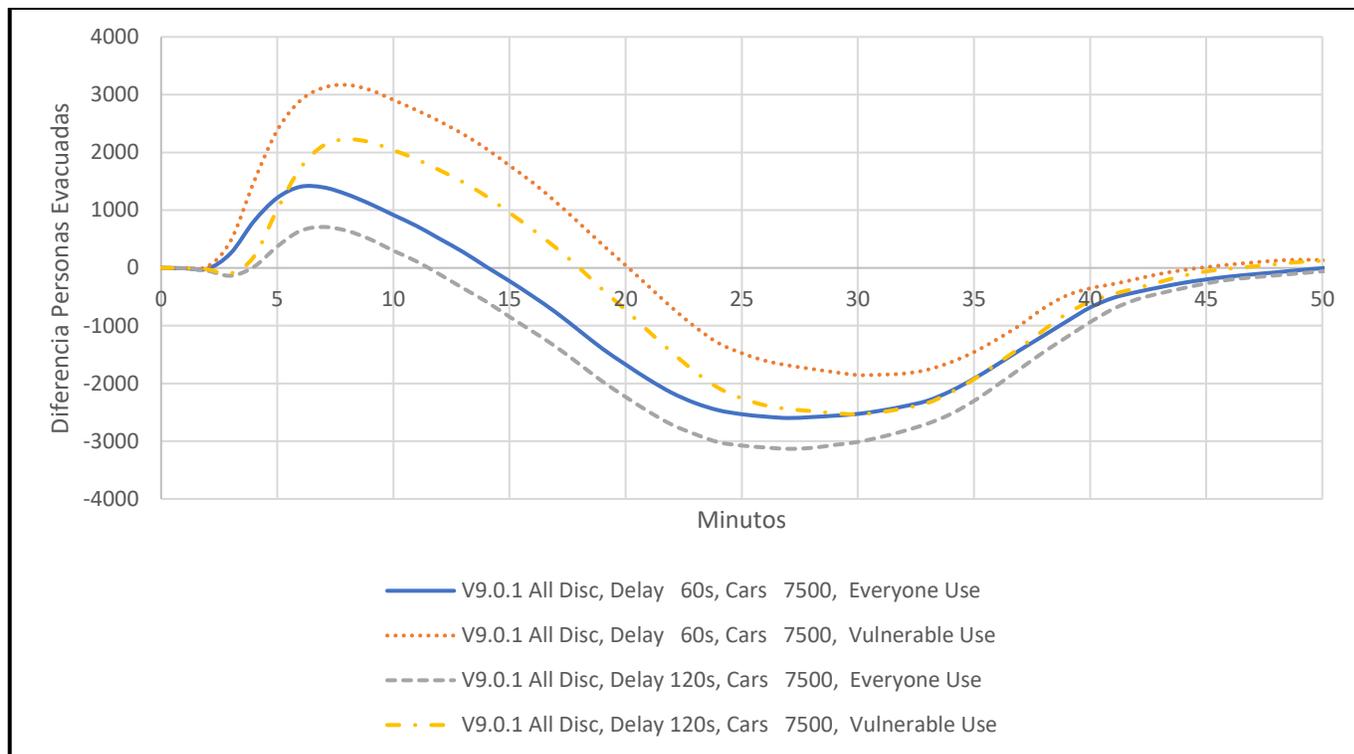


Figura 6.15. Diferencia “V9.0.1 All Disc, No cars”: comparación 7,500 vehículos

Fuente: Elaboración Propia

La mayor diferencia que se aprecia con respecto al caso INoH es que en ningún momento el uso estratégico de vehículos es peor que el caso homólogo. Este resultado es el esperable y no es claro porqué esto no sucedía en los casos del grupo vulnerable INoH.

7. RESULTADOS

La última parte que se incluye en el modelo es la inundación. Interpretando los datos que aparecen en el trabajo de Cienfuegos *et al.* (2014), se estima el momento en que llegará el tsunami a cierto punto de la ciudad. Esta información es guardada y cargada en el modelo en los puntos que representan las intersecciones de la ciudad. De esta manera,

cuando una entidad llega a un nodo que se ha inundado, muere. En la Figura 7.1. aparecen los tiempos estimados en que el tsunami llega a cada intersección.

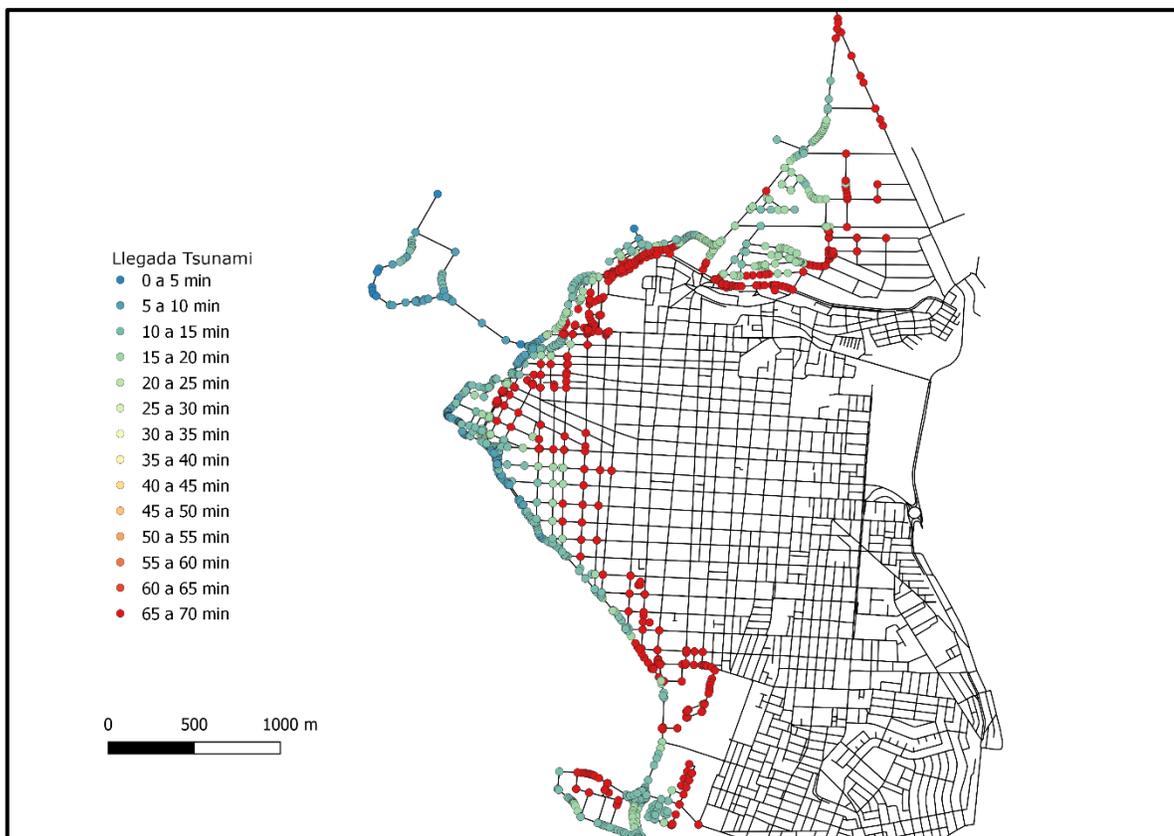


Figura 7.1. Momento Llegada Tsunami Producido por Megaterremoto de 9.0 M_w

Fuente: Elaboración Propia en Base a Cienfuegos *et al.* (2014)

Es importante mencionar que, en el trabajo original, el tsunami sigue avanzando hasta las dos horas. Sin embargo, esto no es relevante en el caso del presente trabajo debido a que ninguna evacuación supera los 60 minutos.

En tanto, para cada escenario se simularon cinco casos, cada uno con 50 réplicas (la enumeración de cada escenario será utilizada en el resto de la sección):

- 1) Evacuación solo caminando con autos estacionados en las calles.

- 2) Evacuación mixta, con vehículos estacionados en las calles, en donde cualquiera los puede usar. Con un máximo de 1000 vehículos a utilizar.
- 3) Evacuación mixta, con vehículos estacionados en las calles, en donde solo el grupo vulnerable los puede usar. Con un máximo de 1000 vehículos a utilizar.
- 4) Evacuación mixta, con autos estacionados en las calles, en donde cualquiera los puede usar. La cantidad de automóviles que se pueden utilizar es igual al tamaño del grupo vulnerable.
- 5) Evacuación mixta, con autos estacionados en las calles, en donde solo el grupo vulnerable los puede usar. La cantidad de automóviles que se pueden utilizar es igual al tamaño del grupo vulnerable.

Para todos estos escenarios, el grupo vulnerable será el constituido por las personas con algún nivel de dependencia, aquellos que tienen alguna condición permanente, y aquellos que tienen algún nivel de dependencia y una condición permanente. Este grupo era el que era abreviado como *All Disc* en la sección anterior y cada persona de este será acompañada por alguien que no pertenezca a este grupo y se encuentre en el grupo etario 2, 3 o 4.

Originalmente existían seis escenarios, pero se eliminó el escenario en que la población evacuaba caminando y no se cargaban los automóviles ya que no presentaba una diferencia significativa con el Escenario 1. El modelo no fue capaz de simular la esa diferencia. Sin embargo, esta no resulta tan sustantiva si se compara con el uso de vehículos. Esto se puede ver en el Anexo G en donde se revisan los resultados del trabajo de Álvarez (2017). Por esto, no fue enumerado.

Es importante ser específico con el momento que representa cada simulación para que se pueda comparar con otros trabajos y representante fielmente la realidad para que el trabajo sea aplicable. De esta forma, los resultados se obtuvieron utilizando la población y parque automotriz estimada del 2019 a partir de la EOD del 2010. Además, la estimación de la EOD se combinó con el conteo de autos estacionados en las calles de la ciudad realizado en agosto del 2019.

Por un lado, en el escenario diurno se modelan las tres Macrozonas para el año 2019, en un día laboral a las 10 am. Esto provoca que en la Zona 1 y 2, haya más personas que al comparar con el escenario nocturno. En el caso de la tercera, la población disminuye ya que es principalmente habitacional.

Por el otro, el escenario nocturno se modelan las Macrozonas 2 y 3 para el año 2019, en un día laboral a las 4 am. Aunque se utiliza esta hora, a partir de la EOD se observa que prácticamente no ocurren viajes entre las 11 pm hasta las 5 am por lo que haber elegido cualquier instante entre esas horas no hubiera provocado una diferencia notable.

La razón para no modelar la Macrozona 1 se debe a que fuera de un sector habitacional que se encuentra por sobre las zonas que se inundan y cerca de los puntos de encuentro, el resto está técnicamente vacío. Dado que no existen hogares en el resto de la Macrozona, la EOD reporta que nadie se encuentra allí. De esta manera, no hay información siguiendo el método utilizado anteriormente para realizar la simulación.

Finalmente, dado que no se realizó conteo de vehículos para los escenarios nocturnos. Simplemente se utilizó la estimación que se puede realizar a partir de la de EOD y se consideró que la mitad de los vehículos que se estacionan en la calle lo harán en una pista

de la calle y la otra mitad en un estacionamiento permitido que no ocupa espacio de las pistas.

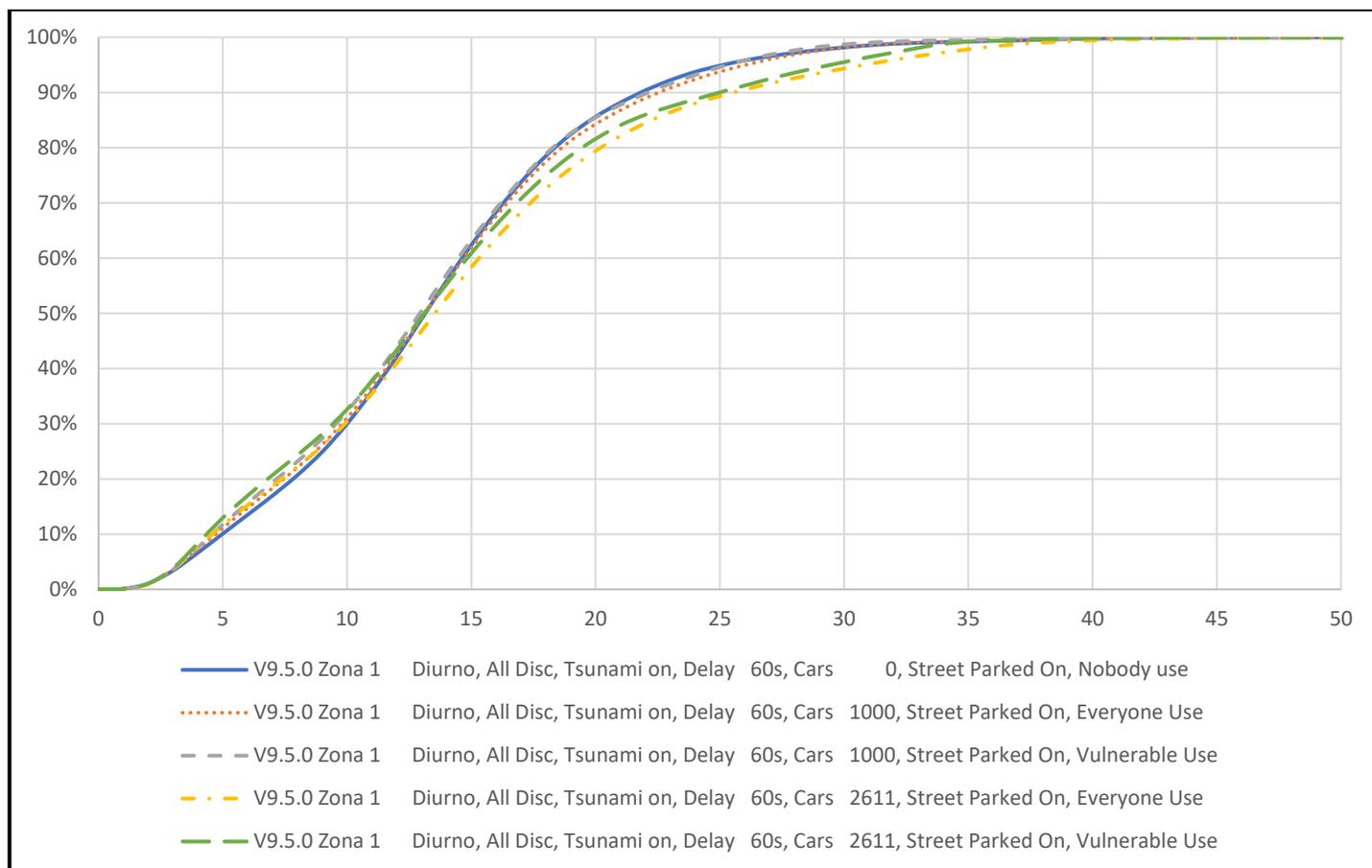
7.1. Resultados Macrozona 1

7.1.1. Macrozona 1, diurno

En este escenario, se modelan 19,060 personas de las cuales 1,234 tienen algún nivel de dependencia y 2,611 tienen algún nivel de dependencia y/o alguna discapacidad. Además, se estimó un total de 6,683 vehículos disponibles para usar de los cuales se contabilizaron 1,321 estacionados en una pista de la calle y 298 en un estacionamiento en la calle. Es importante mencionar que este fue la peor zona contabilizada dado que no se pudo ingresar al sector amurallado en donde hay gran cantidad de locales y según la EOD, se concentra la mayor cantidad de personas. Además, en esta zona hay gran presencia de desarmaduras, venta de automóviles y camiones estacionados en la calle. Esto último solo se observó en esta Macrozona y para modelar los camiones se contabilizaron como equivalentes a tres vehículos.

En la Figura 7.2 se muestran los resultados. Ajustado a lo esperado y lo visto en la validación, a grandes rasgos la evacuación a pie es la más rápida. Seguida por el uso de 1,000 vehículos y el peor resultado es cuando se utilizan aproximadamente 2,600 autos. En los casos que se pueden utilizar vehículos, es más eficiente que la población vulnerable los utilice en vez de que cualquiera los pueda usar.

En ninguno de los casos se logra evacuar la población entera en menos de 20 minutos, que es la meta propuesta por la ONEMI. Para ese momento, dependiendo del caso, solo ha evacuado entre el 80 y 85 por ciento de la población.



	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Muertos	1	1	1	19	8

Figura 7.2. Resultados Macrozona 1, Escenario Diurno

Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al sesgo que tiene el grupo vulnerable de ser más lento, la utilización de 1,000 vehículos permite que este grupo evacúe más rápido que si lo hiciera caminando. En tanto, la evacuación con 2,611 vehículos provoca que el grupo evacue más lento. Por lo tanto, la utilización de pocos vehículos, en el modelo, resulta beneficioso para este grupo, aunque repercute en una evacuación más lenta a nivel general.

En tanto, en esta Macrozona casi no ocurren fatalidades debido a que las partes que se inundan más rápido son las con menor cantidad de personas. Además, la Avenida

Circunvalación que es la vía de evacuación más larga que atraviesa toda la Macrozona 1 se encuentra lo suficientemente alta para que no se inunde o se inunde avanzada la evacuación. De esta manera, las personas que se encuentran más lejos de la zona segura, al llegar a esta avenida, se encuentran relativamente a salvo de la ola. Similar es el caso de las personas que evacúan por las otras vías de evacuación. A pesar de que en estas se produce congestión, el tsunami no los alcanza porque la aglomeración se produce después la calle “Las Montañas” que es la última que se inunda.

La congestión del Escenario 1 a los diez minutos se puede observar en la siguiente figura.

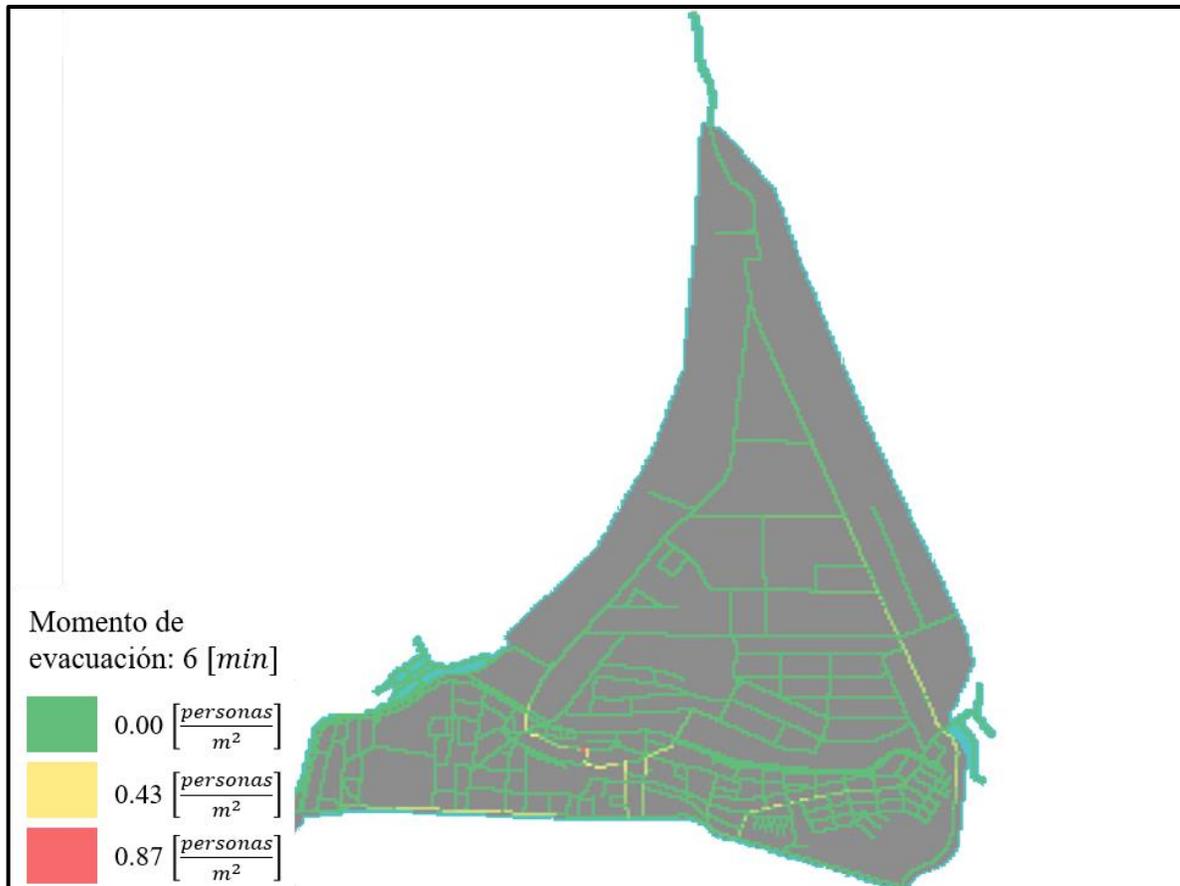


Figura 7.3. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 1 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno

Fuente: Elaboración Propia.

Es importante recordar que la densidad se calcula utilizando la Ecuación (5.1) que usa un factor de equivalencia en donde los autos equivalen a diez personas. Con esto se obtiene la cantidad equivalente de personas que hay en un tramo de calle y se divide por el área de ese tramo, el cual viene definido por dos intersecciones.

Además, esta densidad sirve más como referencia interna por sobre un valor comparable con otros modelos. En teoría, no se debería observar congestión en calles con

menos de $1 \left[\frac{per}{m^2} \right]$, sin embargo, esto no considera la densidad que experimenta cada entidad enfrente de ella en cada momento.

Finalmente, cuando se utilizan vehículos la mortalidad asciende en los casos que se permite utilizar 2,600 vehículos. La razón de esto es que los autos, además de aumentar la congestión en mayor proporción que una persona, provocan largas colas que atochan las calles por varias cuadras disminuyendo la velocidad de evacuación aguas arriba. A pesar de esto, en el caso de que solo la población vulnerable puede utilizar vehículos, mueren menos personas provocado por el hecho de que el grupo vulnerable y sus acompañantes evacuan más lento.

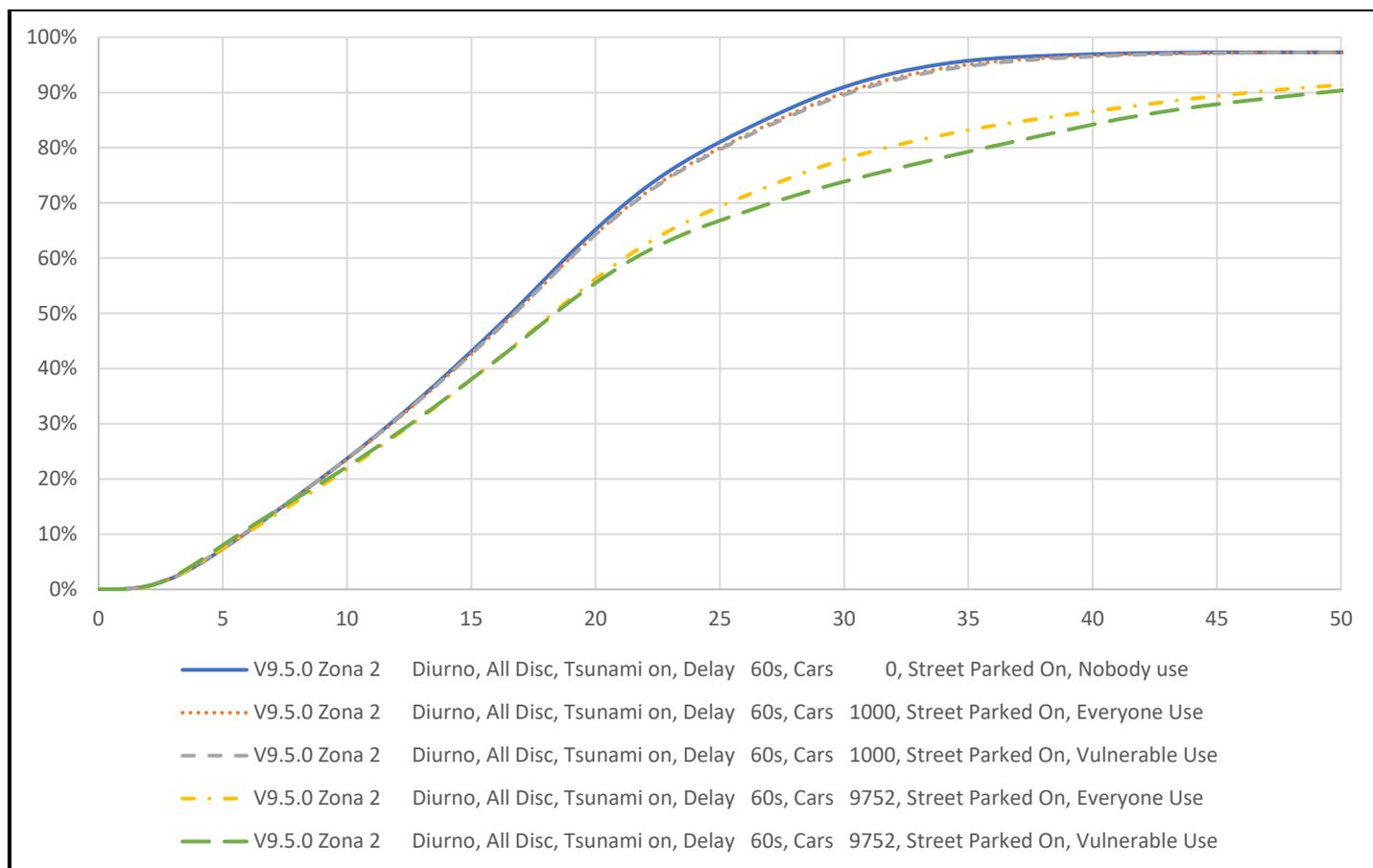
En el Anexo H se puede ver la evolución cada 10 minutos del escenario recién mencionado utilizando los mapas de calor.

7.2. Resultados Macrozona 2

7.2.1. Macrozona 2, Diurno

En este escenario, se modelan 61,158 personas de las cuales 5,066 tienen algún nivel de dependencia y 9,752 tienen algún nivel de dependencia y/o alguna discapacidad. Además, se estimó un total de 21,813 vehículos disponibles para usar de los cuales se contabilizaron 3,651 estacionados en una pista de la calle y 4,014 en un estacionamiento en la calle. Por lejos esta es la zona más vulnerable debido a que la densidad de personas es demasiado alta en comparación al resto y la mayor cantidad se encuentra en la zona de oficinas que se encuentra cercana al mar. Sobre todo, el sector que circunda a la municipalidad.

En la Figura 7.4. se puede observar los tiempos de evacuación de esta zona. En este caso, el escenario en que solo se evacua caminando y los dos que utilizan mil vehículos, tienen casi el mismo resultado. Sin embargo, utilizar 9,752 empeora drásticamente la evacuación. Esto era esperable ya que utilizar tantos vehículos en una zona con tantas personas, solo podría empeorar el resultado. Sin embargo, inesperado fue encontrar que el caso en donde la población vulnerable utiliza esa cantidad de vehículos provoca una evacuación más lenta y una mayor mortalidad que el caso en donde cualquiera puede utilizar los vehículos.



	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Muertos	1,663	1,663	1,657	2,785	2,988

Figura 7.4. Resultados Macrozona 2, Escenario Diurno

Fuente: Elaboración Propia

Para explicar este resultado se debe considerar la zona en que las personas se suben al vehículo. Si se suben en una zona lejana a los puntos de encuentro, los autos generaran más congestión debido a que se encuentran más tiempo en la red. Esto es justamente lo que sucede en este caso y se puede observar en la distribución de la Figura 7.5. En la imagen se muestra la cantidad de vehículos que parten de cada zona sobre cada una de estas. A la izquierda se encuentra el escenario en que cualquiera puede usar automóviles

y a la derecha el escenario en donde solo el grupo vulnerable y sus acompañantes lo pueden hacer.

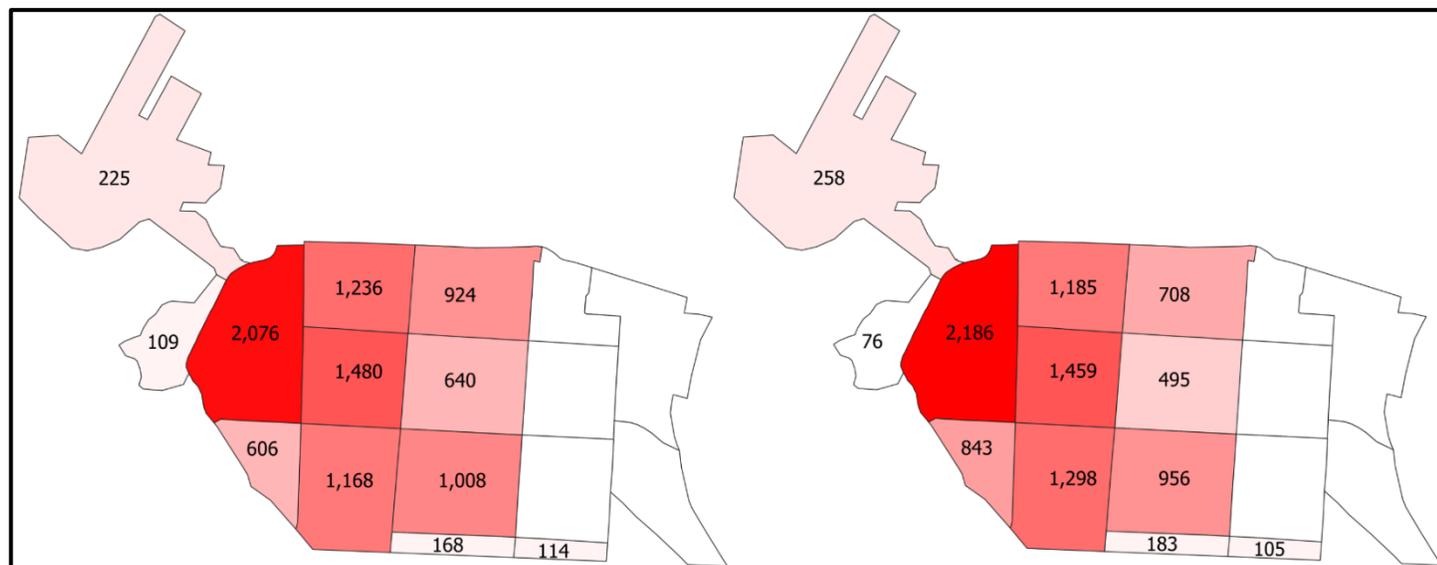


Figura 7.5. Zona Origen Vehículos utilizados para Escapar. A la izquierda escenario en donde todos pueden usar el auto, a la derecha, caso en donde solo el grupo vulnerable y su acompañante lo puede hacer.

Fuente: Elaboración Propia

De la imagen se desprende que, para el escenario de los vulnerables, el origen de los vehículos se encuentra más cerca del mar lo que explica el mayor tiempo y mortalidad de evacuación de este caso.

En tanto, la gran mortalidad de esta Macrozona se debe a que las personas que trabajan en el puerto no alcanzan a evacuar la zona antes de que esta se inunde completamente. En todos los escenarios, alrededor de 1,600 de las cerca de 1,800 personas que se encuentran en ella, mueren. Esta cantidad es estratosférica si se considera que, para el terremoto de Chile de 2010, de magnitud de 8.8 *Mw*, fallecieron 525 personas.

Con respecto a la utilización de las vías de evacuación, en la Figura 7.6. aparece la densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ de cada tramo de calle para el escenario 4 pasados 10 minutos desde el inicio de la evacuación. De todos los casos, este es el que presenta mayor congestión dado que no se encuentra una vía de evacuación que no supere una densidad de $0.4 \left[\frac{per}{m^2}\right]$ además de tener densidades cercanas al máximo en varias otras. Como es de esperar la peor congestión se encuentra ligeramente al norte de la ciudad dado que es la generada por las personas que evacuan de la zona con mayor cantidad de personas.



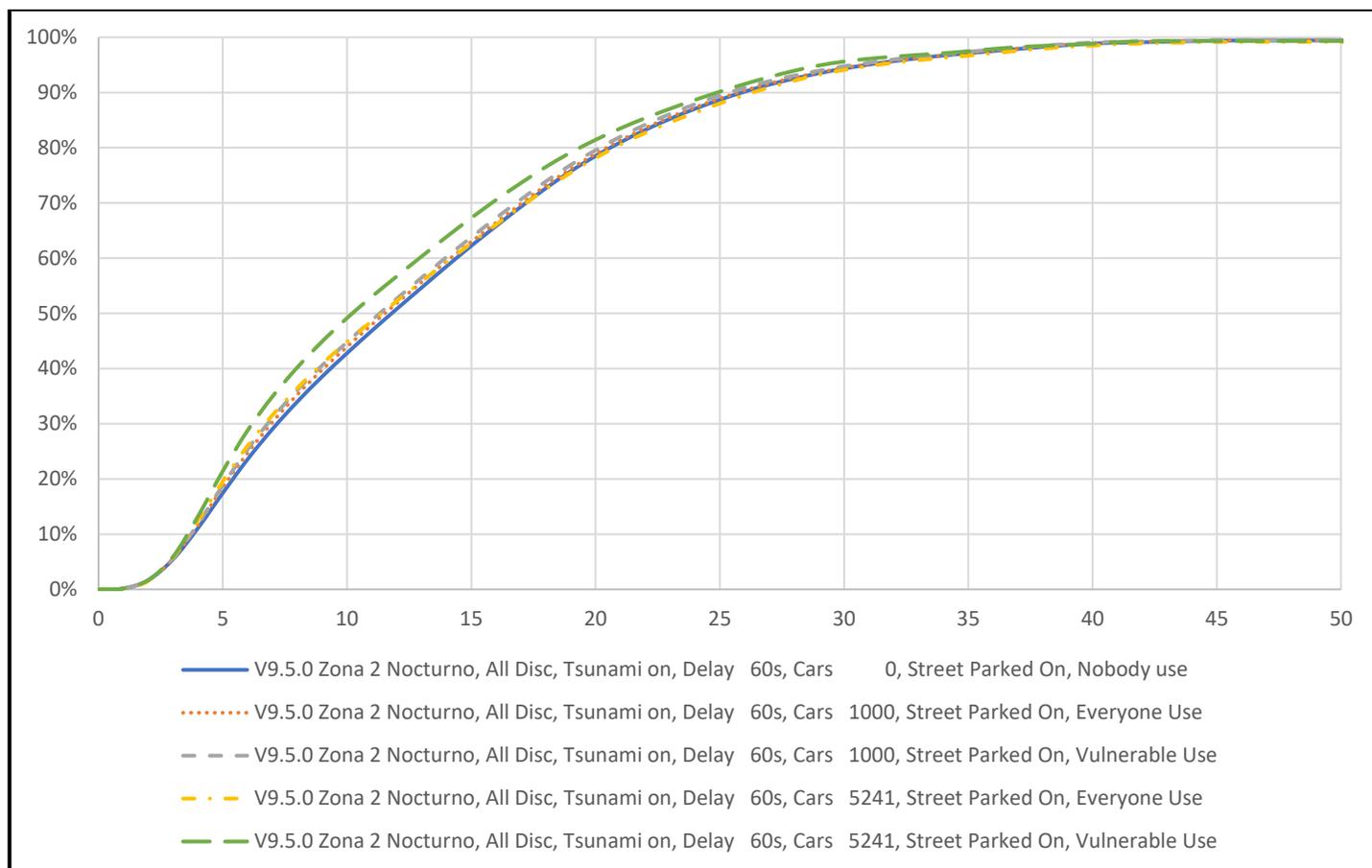
Figura 7.6. Densidad en $\left[\frac{per}{m^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 2 Diurno

Fuente: Elaboración Propia

7.2.2. Macrozona 2, Nocturno

En este escenario, se modelan 31,889 personas de las cuales 2,715 tienen algún nivel de dependencia y 5,241 tienen algún nivel de dependencia y/o alguna discapacidad. Además, se estimó un total de 9,386 vehículos disponibles para usar de los cuales 146 estarán estacionados en una pista de la calle y 146 en un estacionamiento en la calle.

Particularmente en este escenario, la evacuación con uso del grupo vulnerable de 5,241 vehículos es notoriamente más rápida que las otras, sin embargo, ocurren más muertes que en los tres primeros escenarios. El resto de los resultados se encuentran dentro de lo esperado: la mortalidad aumenta con el uso de más vehículos, la evacuación cuando cualquiera puede usar un auto es más lenta y con más fatalidades que cuando solo el grupo vulnerable lo puede utilizar.



	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Muertos	177	168	150	261	216

Figura 7.7. Resultados Macrozona 2, Escenario Nocturno

Fuente: Elaboración Propia

Para explicar la particularidad de este escenario es importante considerar que la red se encuentra prácticamente vacía. En comparación con el escenario diurno prácticamente no hay autos estacionados en las calles. Esto provoca que los autos que comienzan primero la evacuación se encuentran con mayor cantidad de pistas disponibles y por lo tanto pueden andar más rápido. A esto se debe sumar el hecho de que en el Escenario 5, los vehículos siempre llevan dos pasajeros, a diferencia del Escenario 4 que pueden llevar

uno o dos. Estos dos fenómenos se unen para generar una evacuación explosivamente rápida.

En tanto, para comprender el hecho la evacuación del Escenario 5 es la más rápida, aunque no es la que tiene menos fatalidades se debe utilizar el mapa de calor de la Figura 7.8.

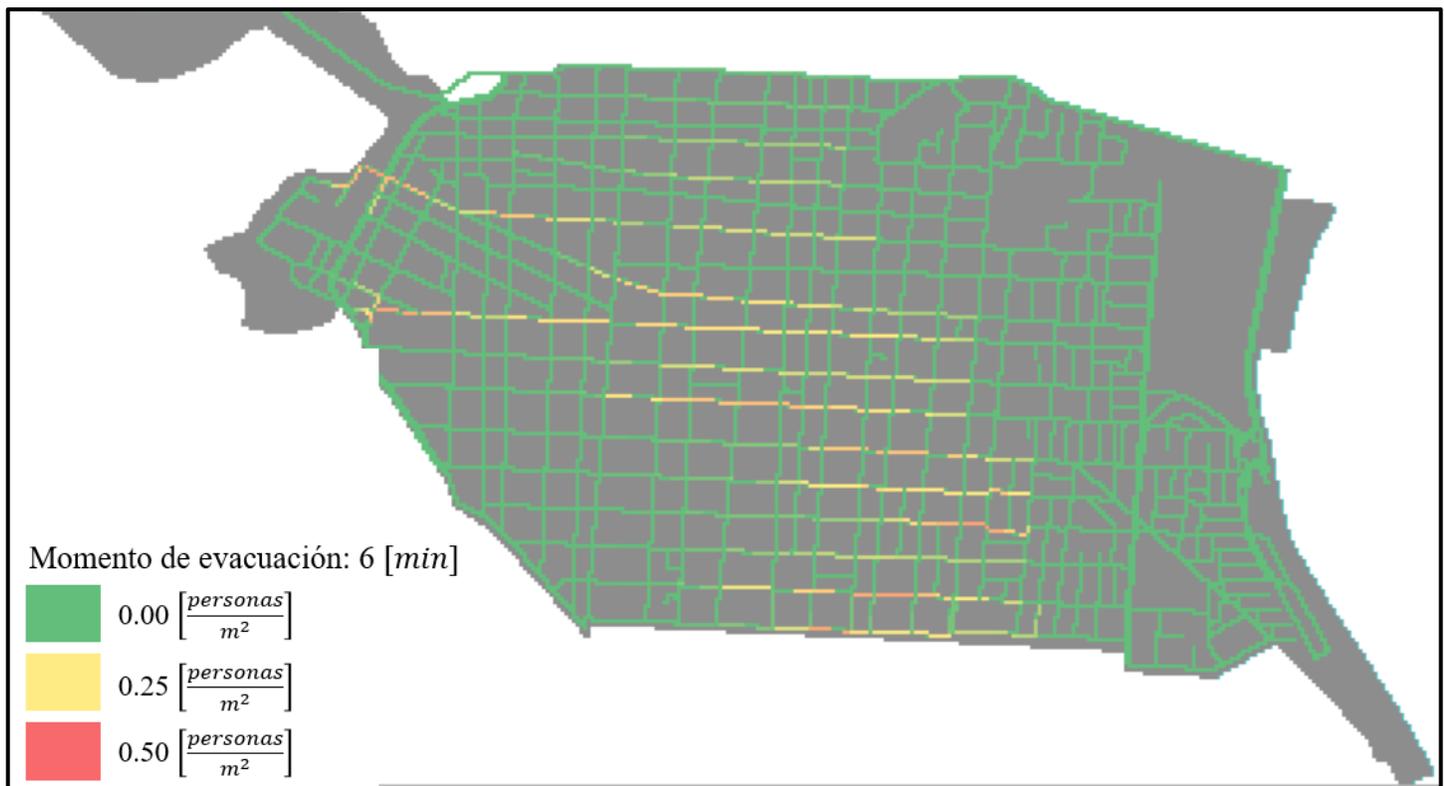


Figura 7.8. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 2 Nocturno

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en este, la mayoría de las vías de evacuación de la ciudad se encuentran despejadas o, a lo menos, la congestión aparece en la zona más cercana a los puntos de encuentro, a excepción son las dos que tienen congestión transversalmente.

Estas son Thomsom (la de más al norte) y Vicente Zegers (la de más al sur). Lo relevante de estas dos es que son las vías de evacuación que utilizan las personas que evacuan esa pequeña península a la que se hará referencia como Zona 8. Thomsom y Zegers también son las vías de evacuación que parte de las personas de la Zona 9 (la que se encuentra inmediatamente al este de la pequeña península).

Con esto definido, se debe considerar que los vehículos crean largas colas aguas arriba debido a que ocupan una longitud mayor en las calles y el modelo respeta su representación física. De esta forma, la mayor cantidad de vehículos en el Escenario 4 y 5 provoca una cola más larga en Thomson y en Zegers lo que hace más lento la evacuación de la Zona 8 lo que a su vez lleva a más muertes debido a que esta zona, la Zona 9 y el puerto son las más vulnerables. De hecho, en el Escenario 1 no ocurren muertes de personas que evacuan la Zona 9 pero en el Escenario 4 y 5 se estima que fallecen 25 y 23 respectivamente. De esta manera, se presenta el *trade-off* entre una evacuación más rápida, pero al mismo tiempo más mortífera.

Para finalizar, las muertes bajan de los miles a los centenares entre el escenario diurno y el nocturno debido a que, en el segundo, no hay personas en el puerto o por lo menos eso es lo que se puede estimar a partir de la EOD.

7.3. Resultados Macrozona 3

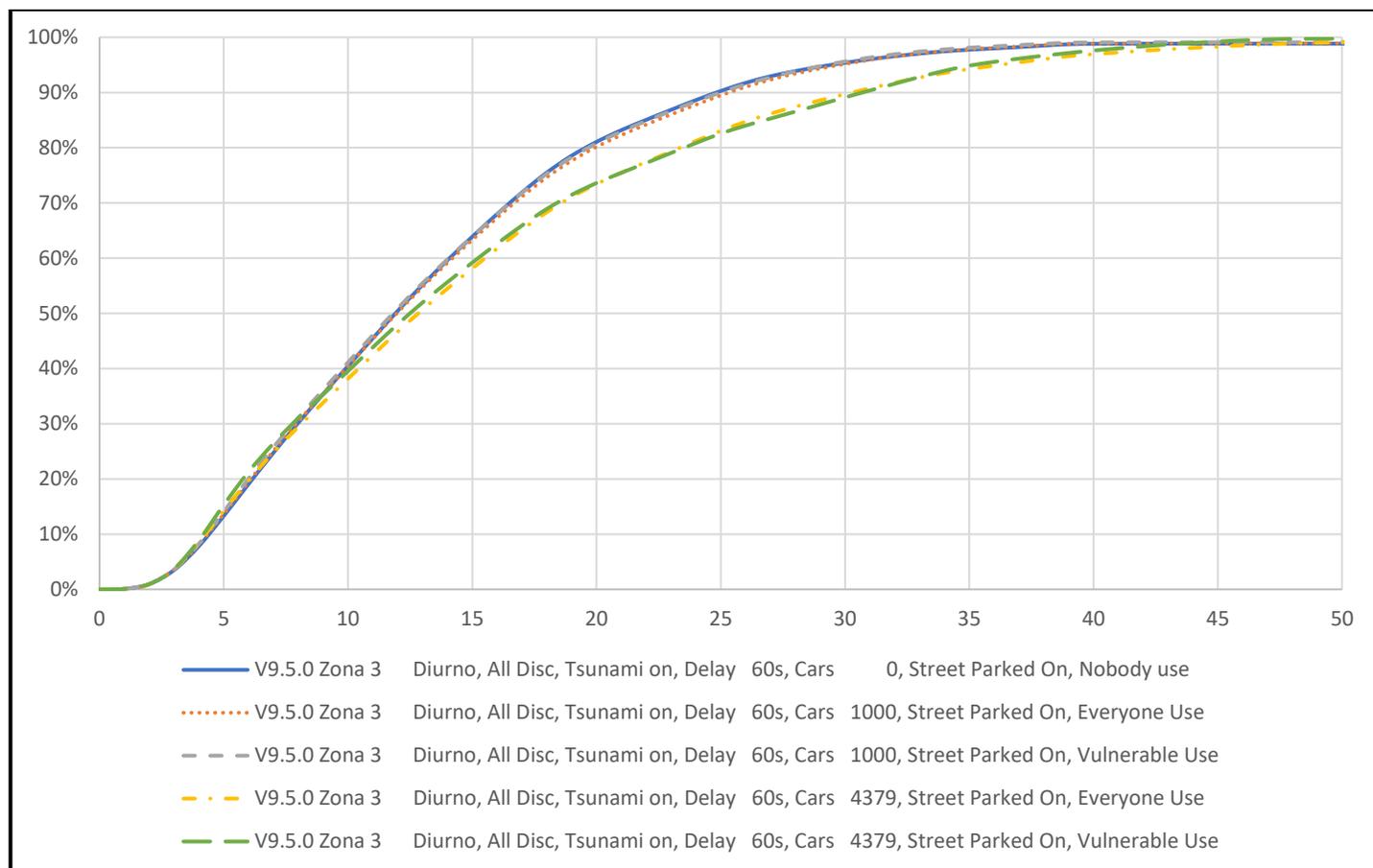
7.3.1. Macrozona 3, Diurno

En este escenario, se modelan 27,652 personas de las cuales 2,371 tienen algún nivel de dependencia y 4,379 tienen algún nivel de dependencia y/o alguna discapacidad. Además, se estimó un total de 21,813 vehículos disponibles para usar de los cuales se

contabilizaron 1,518 estacionados en una pista de la calle y 1,416 en un estacionamiento en la calle. La particularidad de esta zona, como ya se ha mencionado es que hay menos personas durante el día en comparación con la noche. Sin embargo, la tasa porcentual de evacuación es más lenta debido a que, proporcionalmente, hay más gente en zonas lejanas de los puntos de encuentro como se mencionó en la Sección 2.1.

A partir de la Figura 7.9. se puede observar que los resultados están dentro de lo esperable: la evacuación a pie es la mejor, seguida por el uso de pocos vehículos y, en tercer lugar, el uso de 4,379 vehículos. Así mismo, del tercer caso, la evacuación en donde cualquiera puede usar el automóvil es más lenta en la primera mitad de la evacuación y más rápida en la segunda cuando se compara con el uso de vehículos por el grupo vulnerable. Como ya se ha discutido, esto ocurre por el lugar desde donde los vehículos comienzan los viajes, el hecho de que en el escenario 4) los autos pueden llevar un pasajero mientras que en el 5) siempre irá una persona vulnerable y su acompañante.

En tanto, esta zona tiene una evacuación más lenta que la primera, pero más rápida que la segunda. En la marca de los 20 minutos, en los escenarios 1), 2) y 3) se ha evacuado alrededor del 81% de la población mientras que en el 4) y 5) solo lo ha hecho el 73% para el primero y el 74% para el segundo.



	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Muertos	324	316	302	245	66

Figura 7.9. Resultados Macrozona 3, Escenario Diurno

Fuente: Elaboración Propia

Particularmente en esta zona, los vehículos ayudan a salvar vidas por lo que se da un *trade-off* entre tiempos de evacuación y fatalidades. Esto ocurre porque todas las muertes ocurren en la Península Cavancha y se deben a que las personas no logran salir de ella a tiempo. Aunque esta situación es similar al puerto de la Macrozona 2 dada la distancia que deben recorrer los evacuados antes de comenzar a ascender, la diferencia es que en este caso los principales afectados son las personas con alguna dificultad y sus acompañantes. Esto se hace patente cuando se considera que de las 324 personas que

mueren en el Escenario 1, el 88% consiste en personas del grupo vulnerable o sus acompañantes y ninguna de las muertes que ocurren son por personas en vehículos alcanzados por el tsunami.

Es por esto por lo que en el Escenario 5 las muertes se reducen tanto. Al permitir evacuar rápidamente la península, los evacuados evitan ser alcanzados por el tsunami. La diferencia además se puede observar que, gracias a que el grupo vulnerable puede evacuar rápidamente, solo el 15% de las 66 fatalidades son de este grupo o de sus acompañantes.

Finalmente, con respecto a la congestión en las vías, una densidad equilibrada. En la Figura 7.10 se observa como la Avenida “Diego Portales” (cuarta vía congestionada desde arriba para abajo) y la calle “Las Rosas” (penúltima vía de arriba para abajo) son las más congestionadas. En la parte izquierda superior se puede observar una zona particularmente congestionada, pero esto se debe principalmente a la obstrucción que generan los autos estacionados.



Figura 7.10. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 3 Diurno

Fuente: Elaboración Propia

Como último comentario, entre las calles Diego Portales y Las Rosas, en la realidad, se debería esperar una mayor congestión debido a que éstas no son rectas en la dirección de la evacuación. En algunas esquinas se debe virar, la pendiente es pronunciada en algunos momentos y la señalización en algunas esquinas falta por lo que no es claro por dónde ir.

7.3.2. Macrozona 3, Nocturno

En este escenario, se modelan 35,338 personas de las cuales 3,020 tienen algún nivel de dependencia y 5,611 tienen algún nivel de dependencia y/o alguna discapacidad. Además, se estimó un total de 10,327 vehículos disponibles para usar de los cuales 316 estarán estacionados en una pista de la calle y 316 en un estacionamiento en la calle.

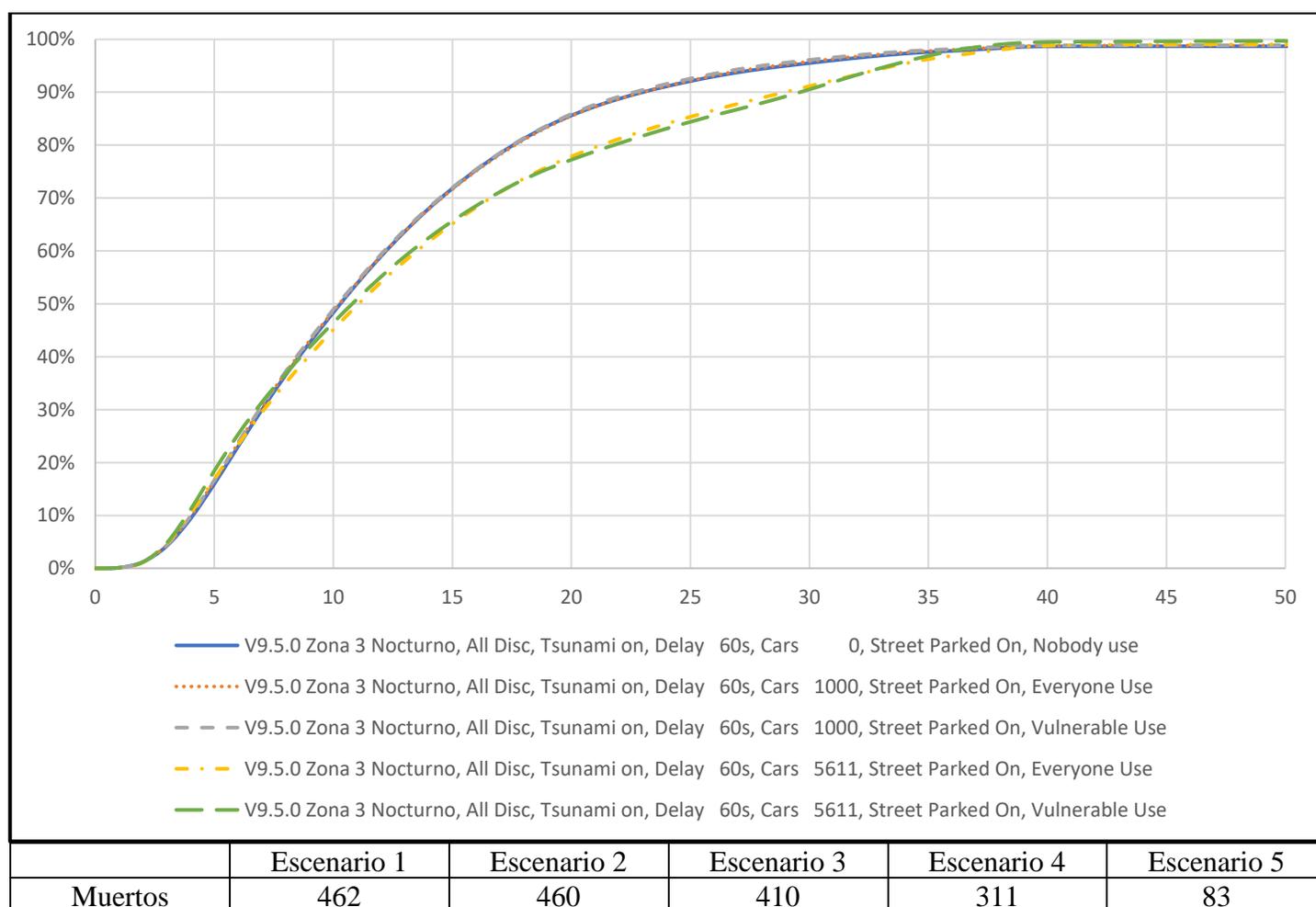


Figura 7.11. Resultados Macrozona 3, Escenario Nocturno

Fuente: Elaboración Propia

Similar al caso diurno, las maneras más eficientes de evacuar son a pie o permitiendo usar solamente mil vehículos. Sin embargo, esta evacuación es más rápida: en los tres

casos, la evacuación a los 20 minutos es casi la misma y es igual a un 86% de la población. En tanto, el escenario 4) y 5) son peores con un 78% y 77% ya evacuados, respectivamente. Esto se puede ver en la Figura 7.11.

Así mismo, el número de muertes también se concentra en su totalidad en la Península Canvancha con un sesgo hacia la población vulnerable. En el escenario en que todos evacuan caminando, el 82% de las muertes es alguien del grupo vulnerable o sus acompañantes mientras que en el Escenario 5 nadie de ese grupo muere. Esta mejora con respecto al caso diurno se debe a que hay más autos disponibles para ser utilizados.

Finalmente, al observar la congestión en las calles al minuto diez de haber iniciado la evacuación en el escenario 5 se aprecia que los puntos de mayor congestión se encuentran más cerca de los puntos de encuentro lo que es provocado debido a que los hogares se ubican lejos de la costa. Esto lo que permite que la evacuación sea más rápida que en el día.

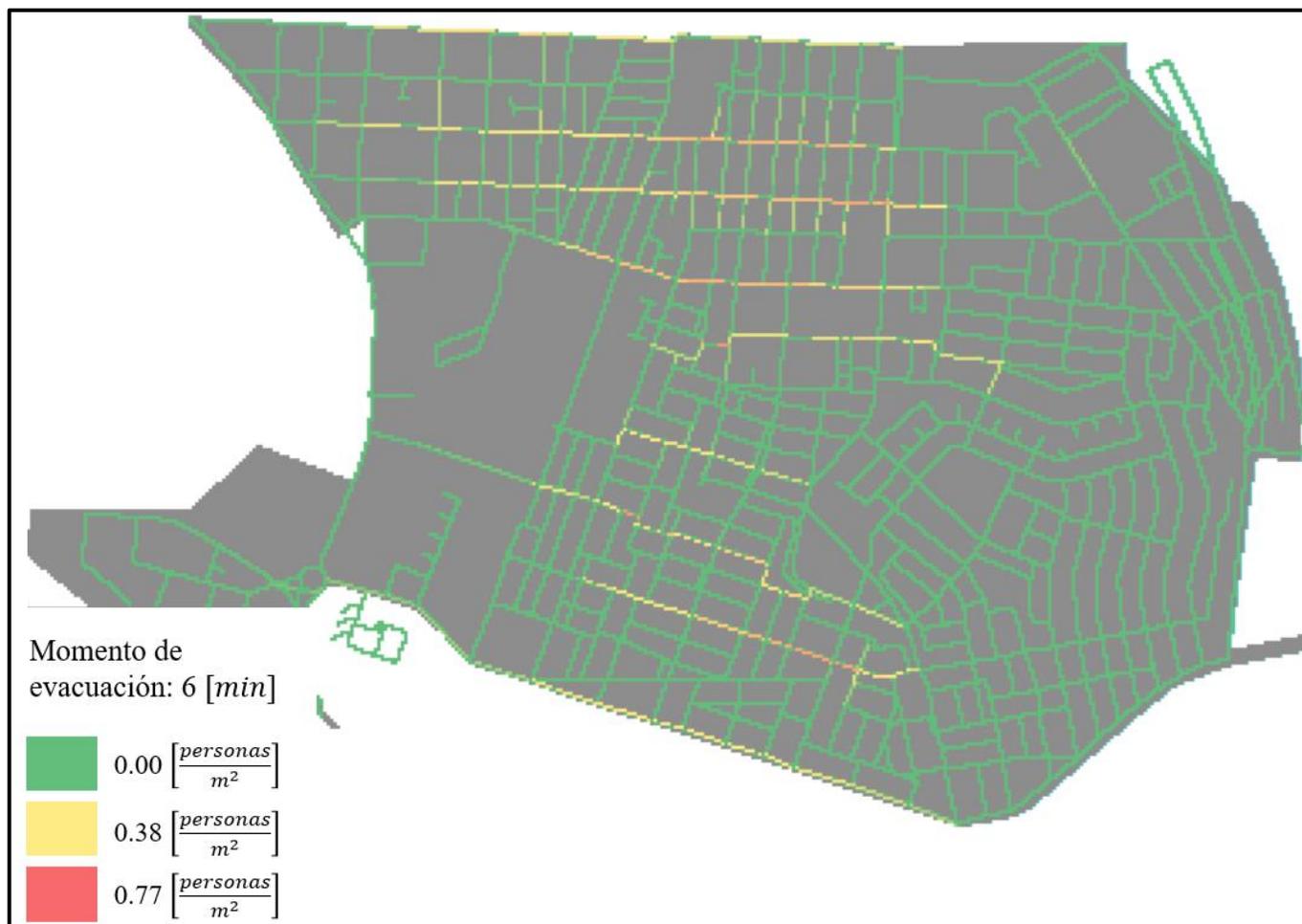


Figura 7.12. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra del Escenario 4 luego de diez Minutos de Evacuación, Macrozona 3 Nocturno

Fuente: Elaboración Propia

También es importante destacar que la escala cambió y el máximo de congestión aumenta con respecto al escenario diurno lo que habla de lo concentrada que se encuentra la población debido a que este escenario casi no tiene vehículos estacionados en las calles cuando se compara con las 10 am.

7.4. Resumen Resultados

Con el fin de exponer todos los resultados en una misma sección y así facilitar su comparación, a continuación, se muestran cuatro tablas. Las dos primeras muestran la cantidad de evacuados a los 20 minutos y en las otras dos se puede observar la cantidad de personas alcanzadas por el tsunami. Es importante mencionar que se continúa con la numeración de los escenarios presentada a comienzos de la Sección 7. Además, se elige el minuto 20 debido a que la ONEMI establece que la evacuación de la ciudad debe ser realizada en esa cantidad de tiempo.

La primera comparación que se debe realizar entre la Tabla 7.1 y la Tabla 7.2 es que en los escenarios diurnos hay 107,860 personas en las zonas modeladas y en los nocturnos hay 67,227. Esto, como ya se ha explicado, es provocado por la atracción que genera Iquique sobre Alto Hospicio y las zonas que no fueron modeladas son principalmente zonas dormitorio.

De esta manera, la siguiente tabla muestra la cantidad de evacuados y el porcentaje de la población total modelada que representa en paréntesis. Como ya se mencionó anteriormente, el no uso de vehículos presenta el mejor resultado, seguido por el uso de pocos vehículos (1.000 vehículos por zona) en donde es más beneficioso que estos sean utilizados por la población vulnerable. Finalmente, el peor caso es cuando hay suficientes vehículos para que la población vulnerable pueda evacuar, tanto si estos lo usan como si cualquiera lo puede hacer.

Tabla 7.1. Promedio de Personas en Zona Segura al Minuto 20 desde que Inicio la Evacuación, Casos Diurnos

	Población Modelada	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Macro Zona 1	19,060	16,315 (85.5%)	16,064 (84.2%)	16,290 (85.4%)	15,135 (79.4%)	15,551 (81.5%)
Macro Zona 2	61,158	39,858 (65.1%)	39,338 (64.3%)	39,311 (64.2%)	34,378 (56.2%)	33,937 (55.4%)
Macro Zona 3	27,642	22,406 (81.0%)	22,156 (80.1%)	22,332 (80.7%)	20,296 (73.4%)	20,346 (73.6%)
Total	107,860	78,579 (72.8%)	77,558 (71.9%)	77,933 (72.2%)	69,809 (64.7%)	69,834 (64.7%)

Fuente: Elaboración Propia

Si hay algo que se puede desprender como una generalidad es que a medida que aumenta la concentración de personas en la ciudad y la cantidad de vehículos en las calles, los tiempos de evacuación empeoran cuando se comparan con una evacuación totalmente a pie. Sin embargo, cuando la distribución de la población interactúa con las variables recién mencionadas, se pueden encontrar excepciones a esta regla.

El caso más destacable que surgió fue el mayor tiempo que tomaba el escenario 3 y 5 en comparación al 2 y 4 en la Macrozona 2 durante el día. Sin embargo, este mayor tiempo que demoraba cuando se realizaba una asignación de los vehículos a la población vulnerable era provocada porque los vehículos se utilizaban en zonas cercanas a la costa y los flujos de estos se concentraban en dos vías de evacuación (Thomson y Zegers).

Tabla 7.2. Promedio de Personas en Zona Segura al Minuto 20 Desde que Inicio la Evacuación, Escenarios Nocturnos

Evacuación	Población Modelada	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Macro Zona 2	25,030	25,030 (78.4%)	25,155 (78.8%)	25,370 (79.5%)	24,915 (78.1%)	25,966 (81.4%)
Macro Zona 3	30,253	30,253 (85.6%)	30,221 (85.5%)	30,354 (85.8%)	27,511 (77.8%)	27,292 (77.2%)
Total	55,283	55,283 (82.2%)	55,376 (82.3%)	55,724 (82.8%)	52,426 (77.9%)	53,258 (79.2%)

Fuente: Elaboración Propia

El caso opuesto se observó en la Macrozona 2 durante la noche (Tabla 7.2) en donde la población vulnerable podía escapar más rápido en vehículo desde las zonas cercanas a la costa ya que durante este periodo de tiempo se evacua menos de la mitad de las personas en comparación al caso diurno.

El otro indicador relevante que se estudió en esta sección es la cantidad de muertes por macrozona. Para esta medida de desempeño el factor relevante es la vulnerabilidad geográfica de ciertas partes de la ciudad como lo son la península del puerto y la de Cavancha ubicadas en la Macrozona 2 y 3 respectivamente.

Esto es patente en al observar Tabla 7.3 y la Tabla 7.4. Por un lado, las muertes se concentran en la Macrozona 2 durante el día y, por el otro, se concentran en la Macrozona 3 durante la noche.

Tabla 7.3. Promedio de Personas Alcanzadas por el Tsunami, Casos Diurnos

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Macro Zona 1	1 (0.0%)	1 (0.0%)	1 (0.0%)	19 (0.0%)	8 (0.0%)
Macro Zona 2	1,663 (2.7%)	1,663 (2.7%)	1,657 (2.7%)	2,785 (4.5%)	2,988 (4.8%)
Macro Zona 3	324 (1.1%)	316 (1.1%)	302 (1.0%)	245 (0.8%)	66 (0.2%)
Total	1,988 (1.8%)	1,980 (1.8%)	1,960 (1.8%)	3,049 (2.8%)	3,062 (2.8%)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7.4. Promedio de Personas Alcanzadas por el Tsunami, Casos Nocturnos

Muertos	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Macro Zona 2	177 (0.5%)	168 (0.5%)	150 (0.4%)	261 (0.8%)	216 (0.6%)
Macro Zona 3	462 (1.3%)	460 (1.3%)	410 (1.1%)	311 (0.8%)	83 (0.2%)
Total	639 (0.9%)	628 (0.9%)	560 (0.8%)	572 (0.8%)	299 (0.4%)

Fuente: Elaboración Propia

Con respecto a la mortalidad, el caso destacable es el de la MacroZona 3 durante la noche en donde asignar autos a los grupos vulnerables es sumamente positivo ya que se evitan entre 52 muertes en el caso con menos autos y 379 en el caso con más autos al compararlo en la evacuación a pie.

Finalmente, al comparar estos resultados con la mortalidad del trabajo de Ignacio Solís, la cantidad de muertes se encuentran en ordenes de magnitud diferentes como se muestra en la Figura 7.13.

Escenario	Modelo	Política de Evacuación	Número de Afectados	Porcentaje de la Población Simulada Afectada
Diurno	Zona 1	Horizontal	6.503	14,6%
		Mixta	6.147	13,8%
	Zona 2	Horizontal	2.289	6,3%
		Mixta	837	2,3%
Nocturno	Zona 1	Horizontal	1.468	11,9%
		Mixta	1.062	8,6%
	Zona 2	Horizontal	2.003	5,9%
		Mixta	898	2,6%

Fuente: Evaluación del Riesgo y la Política de Evacuación de Iquique en Caso de Tsunami Mediante Simulación Basada en Agentes (Solís, 2016)

Figura 7.13. Número de personas alcanzadas por el Tsunami, Modelo Ignacio Solís

La gran diferencia no se debe a discrepancias en las lógicas de las entidades ya que estas éstas mantienen las mismas entre modelos. Como se mencionó en la Sección 6.1, tampoco se deben a las grandes diferencias en las cantidades de personas modeladas por Ignacio y el presente trabajo ya que en algunas Macrozonas él modela más y en otras menos que este estudio. Por ejemplo, en los escenarios diurnos él estima 44,557 para la Macrozona 1 y 36,595 para la Macrozona 2.

La razón de la diferencia de las mortalidades es provocada por los datos del tsunami. Lo más probable es que él haya sobre estimado el efecto de la inundación considerando que para el terremoto del 2010 de Chile murieron 525 personas lo que se encuentra distante a los valores que él encuentra en su simulación.

8. CONCLUSIONES

Como se mencionó en la introducción, la motivación de este trabajo consistía en modelar con mayor fidelidad a diferentes grupos de población vulnerable y poder probar políticas que los pudieran ayudar. Para cumplir estos objetivos, en primer lugar, se distribuyó la población en la ciudad. Para lograrlo, por un lado, se utilizó la Encuesta Origen Destino 2010 de Iquique para distribuir los diferentes grupos etarios de la población en las diferentes zonas en diferentes periodos de tiempo. Por el otro lado, se utilizó El Segundo Estudio de la Discapacidad para estimar los porcentajes de los diferentes grupos vulnerables por grupo etario y la dependencia de ayuda de las personas.

Esta tarea representó el primer desafío del trabajo debido a que la información necesaria se encontraba en dos fuentes diferentes. Para salvar esta situación, se ocuparon las variables comunes entre ambos estudios: grupos etarios y ocupación de una persona (estudio, trabajo o nada). Con las diferentes proporciones de cada condición permanente desprendida del ENDisc, se distribuyeron casos aleatoriamente en cada grupo etario de la EOD. Posteriormente se utilizó la información de la EOD para ubicar a la población en las diferentes zonas de la ciudad.

Todo esto se tuvo que realizar debido a que el CENSO del 2012 tuvo problemas metodológicos. En este se realizaba la pregunta sobre condiciones permanentes mientras que en el abreviado del 2017 no se hizo debido a que este fue una medida paliativa a los problemas del primero. Este punto muestra la importancia de los organismos nacionales de levantamiento de información, nada de este trabajo hubiese sido posible sin estos y el

error cometido en uno de ellos tiene grandes implicancias en la evaluación de diferentes políticas públicas.

El siguiente punto para lograr los objetivos planteados es encontrar información que sea suficiente para caracterizar a la población vulnerable. Sin embargo, a pesar de la revisión bibliográfica que se realizó, se encontró información de población vulnerable mayoritariamente para evacuación de edificios lo que en general significaba detalle para movimientos como virajes cerrados en pasillos, atravesar cuellos de botellas como lo son las puertas o descender escaleras. No se halló algún estudio que describiera el movimiento de diferentes discapacidades o algo desde lo que se pueda desprender un algoritmo. Tampoco había información de cansancio en evacuaciones largas como lo pueden ser las distancias de ciudad. De esta manera se optó por caracterizar cada grupo, etario o condición permanente, según su velocidad.

Esto estaba lejos del ideal de que cada segmento de la población estuviera descrito con algún algoritmo propio, pero reveló un área de estudio no profundizada: existe un evidente vacío de investigación e información para el comportamiento de diferentes grupos vulnerables. Es tanto este problema que, por ejemplo, se logró encontrar información de evacuación de edificios en caso de incendio para personas que usan sillas de rueda, camillas o muletas, pero no se encontró cuando estos tipos de grupos intentan realizar una evacuación vertical, o sea subir un edificio en caso de desastre. Esta fue una de las razones que explican que esta simulación no incluya evacuación vertical.

En tercer lugar, el trabajo con un modelo basado en agentes fue facilitado por el avance previo de la tesis de Ignacio Solís. En su simulación los agentes evacuaban según la

estructura de cuatro etapas planteado por Mas et al. (2012), un tiempo de inicio de evacuación dado por una distribución Raleigh, la red vial modelada considerando vías de evacuación, e inclinación y congestión de estas.

Utilizando esto como inicio, se incluyeron vehículos en la ciudad que fueron ubicados según la información la EOD y conteos realizados en terreno de los autos estacionados en toda la ciudad. En tanto, los grupos vulnerables se modelaron con diferentes velocidades, Además, se incluyó la evacuación en grupo que se limitó, por decisión del modelador, a acompañantes que ayudaban a personas con dificultades en caso de que el agente tuviese necesidad de esto.

De esta forma, las entidades que representan personas fueron modeladas con una ampliación de las cuatro etapas que planteaba Mas et al. con dos pasos extra: decisión de evacuar en grupo, elección de vehículo, decisión de evacuar, elección de punto de encuentro, elección de ruta y desplazamiento. En tanto, los vehículos seguían un proceso similar: asignación, elección de ruta, cálculo de velocidad y desplazamiento. Estas etapas se desprenden de la combinación de Mas et al. y Goto et al. (2012), este último fue clave para la modelación de los vehículos.

En este punto es relevante destacar que los peatones calculan la velocidad según la densidad que tienen al frente y puede atravesar a otros peatones lo que es una manera más bien agregada de modelarlos si se compara con el trabajo de Álvarez (2017) dado que en su modelo las entidades evitaban colisiones y tenían aceleración, con lo cual calculan su velocidad y dirección.

Esta característica del modelo del presente estudio provocó que no existiera una diferencia significativa al comparar la evacuación en donde todos caminaban con la evacuación en donde todos caminaban, pero había autos estacionados en las calles. Lo cual conlleva a la conclusión de que el modelo de Ignacio Solís y por extensión este, no es capaz de incluir micro vulnerabilidades como hoyos, postes o puestos de vendedores en las calles a nivel de peatones ya que los peatones no son suficientemente sensibles a estos a las densidades que a estos se les asignan.

Diferente es el tratamiento que se les dio a los vehículos porque estos si tienen una aceleración y consideran a cada peatón o vehículo que tienen al frente. Esto no viene sin un sacrificio dado que el modelo se volvía considerablemente más lento cuando se incluían vehículos. Por ejemplo, al simular 50 réplicas de la Macrozona 2 en el escenario diurno (61,158 personas a evacuar) sin vehículos, el modelo tardaba 13.6 horas; al incluir 1,000 vehículos el modelo tardaba 19,3 horas; y al incluir 9,752 vehículos, se demoraba 28,2 horas.

Esto conlleva a que modelos con mayor agregación estén mejor adaptados para recrear el funcionamiento de toda una ciudad no detallada mientras que los modelos menos agregados pueden incluir más detalles con el *trade off* de estar limitados a zonas más pequeñas debido al tiempo de cómputo y la mayor cantidad de información recogida en terreno que este necesita. Sin embargo, con el avance de servicios de computación en línea como Google Cloud o Microsoft Azure esta barrera será cada vez menos relevante. De hecho, este trabajo no hubiese sido posible sin los servicios de estas dos empresas ya que

permitían tener múltiples máquinas virtuales funcionando al mismo tiempo sin ningún riesgo de cortes de servicio.

Con todo lo anterior, cuando se evalúa la política de utilizar vehículos para cierto grupos y se considera la hipótesis planteada: “el uso estratégico de vehículos – i.e. el uso exclusivo de automóviles por segmentos vulnerables de la población y sus acompañantes – provocará una evacuación más expedita en un nivel completo de la ciudad”, la respuesta en base a los resultados obtenidos es que el uso indiscriminado de vehículos empeora los tiempos de evacuación. Sin embargo, si la decisión reside entre que cualquiera pueda utilizar vehículos o que solo la población vulnerable lo haga, el segundo es preferible.

Además, hubo un descubrimiento inesperado al intentar responder a la hipótesis. Este es que el factor más relevante con respecto a la mortalidad viene dado por la geografía de la ciudad. Dependiendo de donde se originaban los vehículos y la población se podían observar cambios en la mortalidad, el caso extremo de esto es la en la Macrozona 3 durante la noche en que permitir que personas con dificultades pudieran usar vehículos provocaba una disminución drástica de la cantidad de muertos ya que justamente en la Península de Cavancha hay una concentración alta de población vulnerable si se compara con el resto de la ciudad.

De esta manera, más que enfocar la discusión solamente en la vulnerabilidad de grupos de personas por condiciones permanentes como son la discapacidad, el enfoque debe ser global. Se debe considerar una vulnerabilidad multifactorial en donde la vulnerabilidad geográfica juega un papel relevante. Al fin y al cabo, la vulnerabilidad viene dada por la interacción entre las capacidades de la población para evacuar y su entorno.

En particular, para disminuir la vulnerabilidad geográfica, medidas como evacuación vertical o defensas contra tsunamis pueden ser la respuesta para disminuir la mortalidad esperada.

Como corolario de lo anterior, el enfoque de la planificación de la evacuación debe apuntar a medidas sectorizadas debido a que la distribución de la población y los elementos de apoyo a la evacuación son diferentes dentro de las macrozonas, aún más a lo largo de toda una ciudad. Esto conlleva a que la congestión se produzca en diferentes calles, en diferentes momentos y que la exposición de la población al tsunami sea mayor o menor.

Un ejemplo es la Macrozona 2 durante la noche debido a que el escenario 5 (más vehículos, pero solamente los vulnerables los pueden usar) es el más rápido. Este incremento no se explica a partir de que la asignación de automóviles sea estratégica, en la validación se vio que tal mejora no genera tal nivel de incremento de velocidad. La razón se debe a que la población distribuye de manera diferente de la macrozona y eso provoca que los vehículos no sean utilizados en los mismos sectores. Lo que a su vez conlleva que la congestión se comporte de manera diferente.

Hay dos consideraciones finales. La primera es la importancia de incluir los vehículos en las simulaciones de evacuación ya que afectan incrementando los tiempos, la congestión y cambiando patrones de evacuación. Esto implica que al no considerarlos se sobreestime la capacidad de la población para evacuar e información imprecisa de la manera en que la población evacua, lo que puede llevar a políticas subóptimas.

La segunda es una discusión posible que se puede abrir. La pregunta es si la medida de desempeño más relevante para estimar el éxito de una evacuación es el tiempo que esta toma o la mortalidad esperada. Ciertamente en la realidad es difícil controlar la manera en que se mueve la población durante un desastre y en vista de esto, un menor tiempo de evacuación es un *proxi* de una menor mortalidad, pero no una relación directa. Volviendo a escenario 5 de la Macrozona 2 durante la noche, este fue más rápido que cualquiera de los otros cuatro, pero no era el con menor mortalidad.

Esto debería hacer tender que el objetivo sea minimizar la fatalidad. Sin embargo, esta solo se puede estimar cuando el modelo de simulación es detallado. Por ejemplo, si no se cuenta con la información del tsunami, este valor no se puede obtener. Así mismo, en un simulacro en la realidad no se puede tener la mortalidad esperada a menos que se utilicen recursos colocando personas que marquen a las que son alcanzadas por una ola ficticia.

De esta manera aparece este *trade off* entre tiempo de evacuación y mortalidad en donde el primero es más simple de obtener, pero es el segundo el que realmente importa.

BIBLIOGRAFÍA

Agar Corbinos, L. (2001). Transición demográfica y envejecimiento en América Latina y el Caribe: hechos y reflexiones sociobioéticas. *Acta bioethica*, 7(1), 27-41. Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/abioeth/v7n1/art03.pdf>

Álvarez, G. (2017). Simulación de Evacuación por Tsunami a Micro-escala Usando Modelo Basado en Agentes, Caso de Estudio, Iquique, Chile.

Boyce, K. E., Shields, T., & Silcock, G. W. (1999). Toward the characterization of building occupancies for fire safety engineering: capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline. *Fire technology*, 35(1), 51-67.

Cardona, D., & Paláez, E. (2012, mayo-agosto). Envejecimiento poblacional en el siglo XXI: oportunidades, retos y preocupaciones. *Salud Uninorte*, 28(2), 335-348.

Castro, S., Poulos, A., Herrera, J. C., LLera, d. l., & Carlos, J. (2019). Modeling the impact of earthquake induced debris on tsunami evacuation times of coastal cities. *Earthquake Spectra*, 35(1), 137-158.

Catálogo Arquitectura. (03 de 10 de 2018). Obtenido de catalogoarquitectura.cl: <https://www.catalogoarquitectura.cl/cl/blog/clasificacion-de-las-vias-lineas-oficiales-y-lineas-de-edificacion-segun-la-oguc>

Centro Microdatos. (2015). *Cuestionario Casen 2015*. Ministerio de Desarrollo Social. Obtenido de http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/docs/Cuestionario_CASEN_2015.pdf

Centro Microdatos. (2016). *Base de Datos de la Encuesta CASEN 2015 [data file]*. Ministerio de Desarrollo Social. Retrieved from <http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/basedatos.php>

Centro UC Encuestas y Estudios Longitudinales. (2017). *Cuestionario Casen 2017*. Ministerio de Desarrollo Social. Retrieved from http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/docs/Cuestionario_Casen2017.pdf

Centro UC Encuestas y Estudios Longitudinales. (2018). *Base de datos de la Encuesta CASEN 2017 [data file]*. Ministerio de Desarrollo Social. Retrieved from <http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/basedatos.php>

Christensen, K., & Sasaki, Y. (2008). Agent-based Emergency Evacuation Simulation with Individuals with Disabilities in the Population. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(3).

Cienfuegos, R., Suárez, L., Urrutia, A., Aránguiz, R., Gonzáles, G., Gozález, J., . . . Honda, K. (2014). Reassessment of Tsunami Hazard in the City of Iquique, Chile, After the Pisagua Earthquake of April 2014.

Ciper. (07 de Agosto de 2013). CENSO 2012: Comisión de expertos ratificó errores y recomendó rehacerlo el 2015. *Ciper Chile*.

datosmacro. (2019). *datosmacro.expansion.com/pib*. Retrieved from chile: <https://datosmacro.expansion.com/pib/chile>

Dawson, R., Peppe, R., & Wang, M. (2011). An Agent-based Model for Risk-based Flood Incident Management. *Nat Hazards*, 59(1), 167-189. doi:10.1007/s11069-011-9745-4

Dawson, R., Peppe, R., & Wang, M. (2011). An Agent-Based Model for Risk-Based Flood Incident Management. *Nat Hazards*, 167-189.

Dirección de Protección Civil y Emergencia, Dirección Regional de ONEMI Tarapacá. (2017). Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Sismo/Tsunami y Remoción en Masa. Retrieved from http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1847/P-PEEVR-PO-ARD-04_I_16.05.2018_2.pdf?sequence=3

Fahy, R. F., & Proulx, G. (2001). Toward Creating a Database on Delay Times to Start Evacuation and Walking Speeds for use in Evacuation Modeling. *2nd international symposium on human behaviour in fire*, 175-183.

Galiza, R., Ferreira, L., & Charles, P. (2011). Estimating the effects of older people in pedestrian flow: A micro-simulation approach. *In Transport Research Board TRB 90th Annual Meeting*, 1-13.

Georg, P., Hofmann, A., & Pulm, A. (2016). Evacuation dynamics under consideration of vulnerable pedestrian groups.

Georg, P., Polzin, R., Schumann, J., Holl, S., & Hofmann, A. (2018). Small-scale Studies on Evacuation Characteristics of Pedestrians with Physical, Mental or Age-Related Disabilities. *Journal of Physics: Conference Series*, 1107(7).

Georg, P., Schumann, J., Boltes, M., Holl, S., & Hofmann, A. (2018). The Influence of Physical and Mental Constraints to a Stream of People Through a Bottleneck. *Proceedings of the Ninth International Conference on pedestrian and Evacuation Dynamics*.

Goldberg, A., & Harrelson, C. (2004). *Computing the Shortest Path: A* Search Meets Graph Theory*. Microsoft Research.

Goto, Y., Affan, M., Agussabti, Nurdin, Y., Yuliana, D., & Ardiansyah, a. (2012). Tsunami Evacuation Simulation for Disaster Education and City Planning. *Journal of Disaster Research*, 7(1), 92-100.

Goto, Y., Mikami, T., & Nakabayashi, I. (2012). Fact-finding about the evacuation from the unexpectedly large tsunami of March 11, 2011 in East Japan.

Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.

Hashemi, M. (2018). Emergency Evacuation of People with Disabilities: A survey of Drills, Simulations, and Accessibility. *Cogent Engineering*, 5(1).

Hirokawa, N., & Osaragi, T. (2016). Earthquake Disaster Simulation System: Integration of Models for Building Collapse, Road Blockage, and Fire Spread. *Journal of Disaster Research*, 11(2), 175-187. doi:10.20965/jdr.2016.p0175

Hunt, A., Galea, E., & Lawrence, P. (2015). An Analysis and Numerical Simulation of the Performance of Trained Hospital Staff Using Movement Assist Devices to Evacuate People With Reduced Mobility. *Fire and Materials*, 407-429.

Instituto Nacional de Estadística Chile. (1993). Censo de Población y Vivienda 1992 [data file].
Obtenido de https://redatam-ine.ine.cl/redbin/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CENSO_1992&lang=esp

Instituto Nacional de Estadística Chile. (2019). *Estadísticas*. Retrieved from Permisos de circulación:
<https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2003a). Base de Datos Censo 2002 [data file].

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2012). CUESTIONARIO CENSAL CENSO 2012, Viviendas Particulares. Retrieved from https://www.waikato.ac.nz/__data/assets/pdf_file/0003/180516/Chile-2012-es.pdf

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2013). Base Datos Censo 2012 [data file].

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2017c). Cuestionario Censo 2017. Retrieved from <http://www.censo2017.cl/microdatos/descargas/microdatos/CUESTIONARIO-CENSO-2017-OF.pdf>

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2018a). Base de Datos Censo 2017 [data file].

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2018b). Cartografía Censo 2017 [data file].

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2018d). Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 total país [data file]. Retrieved from <http://www.censo2017.cl/descargas/proyecciones/estimaciones-y-proyecciones-chile-1992-2050-base-2017-poblacion-e-indicadores.xlsx>

Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2018e). Síntesis de las estimaciones y proyecciones de la población de Chile 1992-2050 total país. Retrieved from <http://www.censo2017.cl/descargas/proyecciones/sintesis-estimaciones-y-proyecciones-de-la-poblacion-chile-1992-2050.pdf>

Jiang, C. S., Zheng, S. Z., Yuan, F., Jia, H. J., Zhan, Z. N., & Wang, J. J. (2012). Experimental assessment on the moving capabilities of mobility-impaired disabled. *Safety science*, 50(4), 974-985.

Lämmel, G. (2010). Escaping the Tsunami: Evacuation Strategies for Large Urban Areas. Concepts and Implementation of a Multi-Agent Based Approach. doi:10.14279

Laxman, K., Rastogi, R., & Chandra, S. (2010). Pedestrian flow characteristics in mixed traffic conditions. *Journal of Urban Planning and Development*, 136(1), 23-33.

Mahdavian, F., Koyama, M., Platt, S., & Kiyono, J. (2015). Factors Affecting Survival in Tsunami Evacuation. *7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*.

Mas, E., Adriano, B., & Koshimura, S. (2013). An Integrated Simulation of Tsunami Hazard and Human Evacuation in La Punta, Peru. *Journal of Disaster Research*, 8(2), 285-295.

Mas, E., Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2012). Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 41-57.

MOP. (2013). *Manual de carreteras volumen no 3: Instrucciones y criterios de dise~no*.

Observatorio Social, Ministerio de Desarrollo Social. (2016a). Base de Datos Casen 2015. Retrieved from http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/docs/casen_2015_spss.rar

Observatorio Social, Ministerio de Desarrollo Social. (2016b). *Libro de códigos Base de Datos Casen 2015*. Retrieved from http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/docs/Libro_de_Codigos_Casen_2015.pdf

Oki, T., & Osaragi, T. (2018). Effects of Firefighting Activities Performed by Local Residents to Mitigate Fire Destruction Damage and Human Casualties in Large Earthquakes. *Journal of Disaster Research*, 13(2), 272-280. doi:10.20965/jdr.2018.p0272

Osaragi, T., & Hirokawa, N. (2017). Simulation Analysis of Fire Brigade Action Strategies During Multiple Simultaneous Fires. *Journal of Disaster Research*, 12(2), 311-319. doi:10.20965/jdr.2017.p0311

Rantakokko, M., Mänty, M., & Rantanen, T. (2013, Enero). Mobility Decline in Old Age. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 41(1), 19-28. doi:10.1097/JES.0b013e3182556f1e

Ren, X., Zhang, J., Song, W., & Cao, S. (2019). The Fundamental Diagrams of Elderly Pedestrian Flow in Straight Corridors Under Different Densities. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2019(2).

Servicio Nacional de la Discapacidad. (2016a). Base de Datos II Estudio Nacional de la Discapacidad [data file]. Retrieved from <https://www.senadis.gob.cl/descarga/i/3325>

Servicio Nacional de la Discapacidad. (2016c). Libro de Códigos II Estudio Nacional de la Discapacidad 2015. Retrieved from <https://www.senadis.gob.cl/descarga/i/3327>

Servicio Nacional de la Discapacidad. (2016d). Libro de Resultados II Estudio Nacional de la Discapacidad. Retrieved from <https://www.senadis.gob.cl/descarga/i/3959>

Servicio Nacional de la Discapacidad. (2016e). Resultados Regionales para la Población Adulta. In *II Estudio Nacional de la Discapacidad 2015*. Retrieved from <https://www.senadis.gob.cl/descarga/i/3323>

Servicio Nacional de la Discapacidad. (2016b). Cuestionario de la Encuesta del II Estudio Nacional de la Discapacidad. Retrieved from <https://www.senadis.gob.cl/descarga/i/3318>

Solís, I. (2016). Evaluación del Riesgo y la Política de Evacuación de Iquique en Caso de Tsunami Mediante Simulación Basada en Agentes.

Solís, I., & Gazmuri, P. (2017). Evaluation of the risk and the evacuation policy in the case of a tsunami in the city of Iquique, Chile. *Natural hazards*, 88(1), 503-532.

Spearpoint, M., & MacLennan, H. (2012). The Effect of an Ageing and Less Fit Population on the Ability of People to Egress Buildings. *Safety Science*, 1675-1684.

Tobler, W. (1993). Three presentations on geographical analysis and modeling: Non-isotropic geographic modeling speculations on the geometry of geography global spatial analysis. *National center for geographic information and analysis*, 124-129.

TRASA Ingeniería Ltda. (2012a). *Actualización diagnóstico del S.T.U. de la ciudad de Antofagasta. Encuesta origen destino de viajes: Antofagasta 2010. Base de Datos [Data File]*. Retrieved from http://www.sectra.gob.cl/descargas/encuestas_movilidad/Antofagasta/EODH_2010_Antofagasta.zip

TRASA Ingeniería Ltda. (2012b). *Actualización diagnóstico del S.T.U. de la ciudad de Antofagasta. Encuesta origen destino de viajes: Antofagasta 2010. Informe Final*. Secretaría de Planificación de Transporte. Retrieved from <http://www.sectra.gob.cl/biblioteca/detalle1.asp?mfn=3029>

TRASA Ingeniería Ltda. (2012c). *Actualización diagnóstico del S.T.U. de la ciudad de Antofagasta. Encuesta origen destino de viajes: Antofagasta 2010. Zonificación [Data File]*. Retrieved from http://www.sectra.gob.cl/descargas/encuestas_movilidad/Antofagasta/Zonificacion_EOD_2010_Antofagasta.zip

Van Den Berg, J., Guy, S., Lin, M., & Manocha, D. (2011). Reciprocal n-body Collision Avoidance. *Springer*, 3-19.

Walker Rousseau, J. M. (2012). INFORME TÉCNICO, Evaluación de Megasimulacro, Terremoto Región de Tarapacá, Realizado el 23 de agosto 2012.

Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L., Cox, D., & Park, H. (2016). An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. *Transportation Research Part C*, 86-100.

Web Gis. (n.d.). *srtm3*. Retrieved from Web Gis: <http://www.webgis.com/srtm3.html>

Weidmann, U. (1993). Transporttechnik des Fussgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs. *ETH*.

Yoshida, Y., Kimura, T., Minegishi, Y., & Sano, T. (2014). Tsunami Safe Town Planning with Evacuation Simulation. *Journal of Disaster Research*, 9(sp), 719-728.

ANEXOS

Anexo A. Zonas de Evacuación, Red Vial

En esta sección se muestra la red vial de todas las Macrozonas con el fin de tenerlas como complemento a los mapas de distribución de población y los de curvas de nivel.



Figura A.1. Red Vial Macrozona 1

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de Dirección de Protección Civil (2017) y TRASA (2012c)

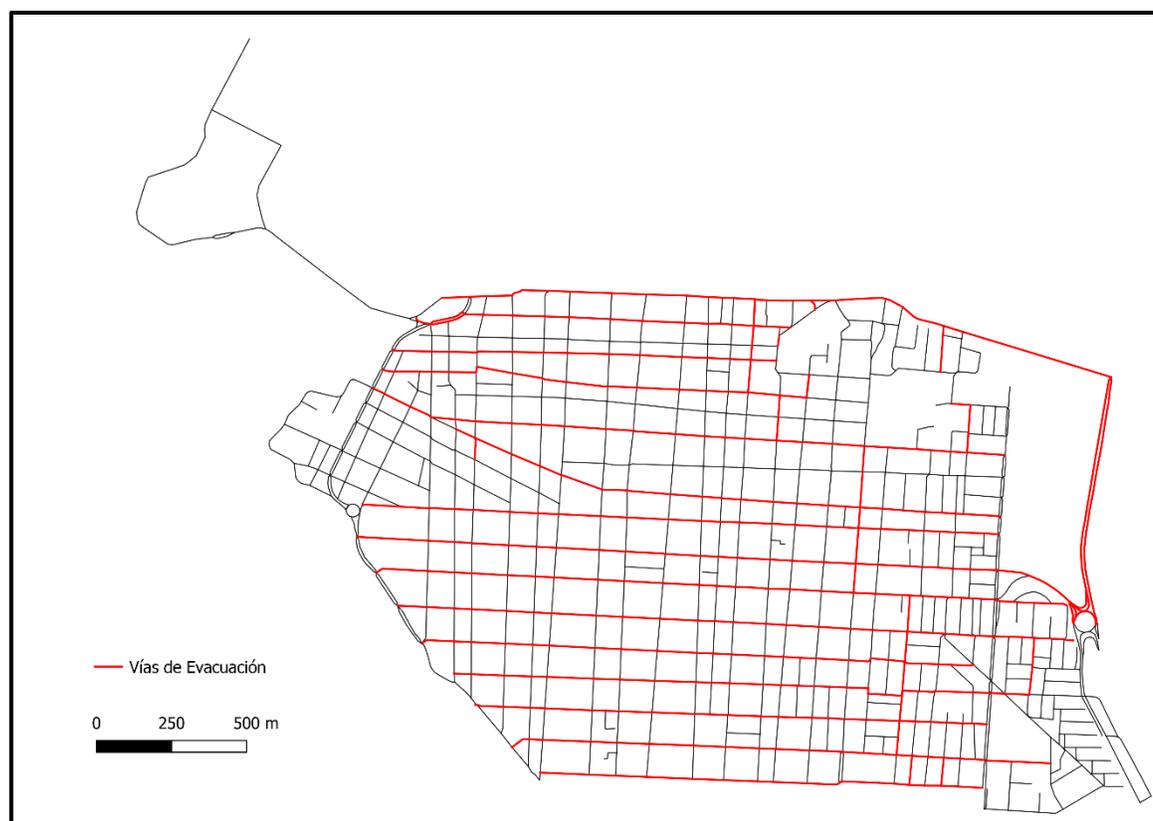


Figura A.2. Red Vial Macrozona 2

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de Dirección de Protección Civil (2017) y TRASA (2012c)

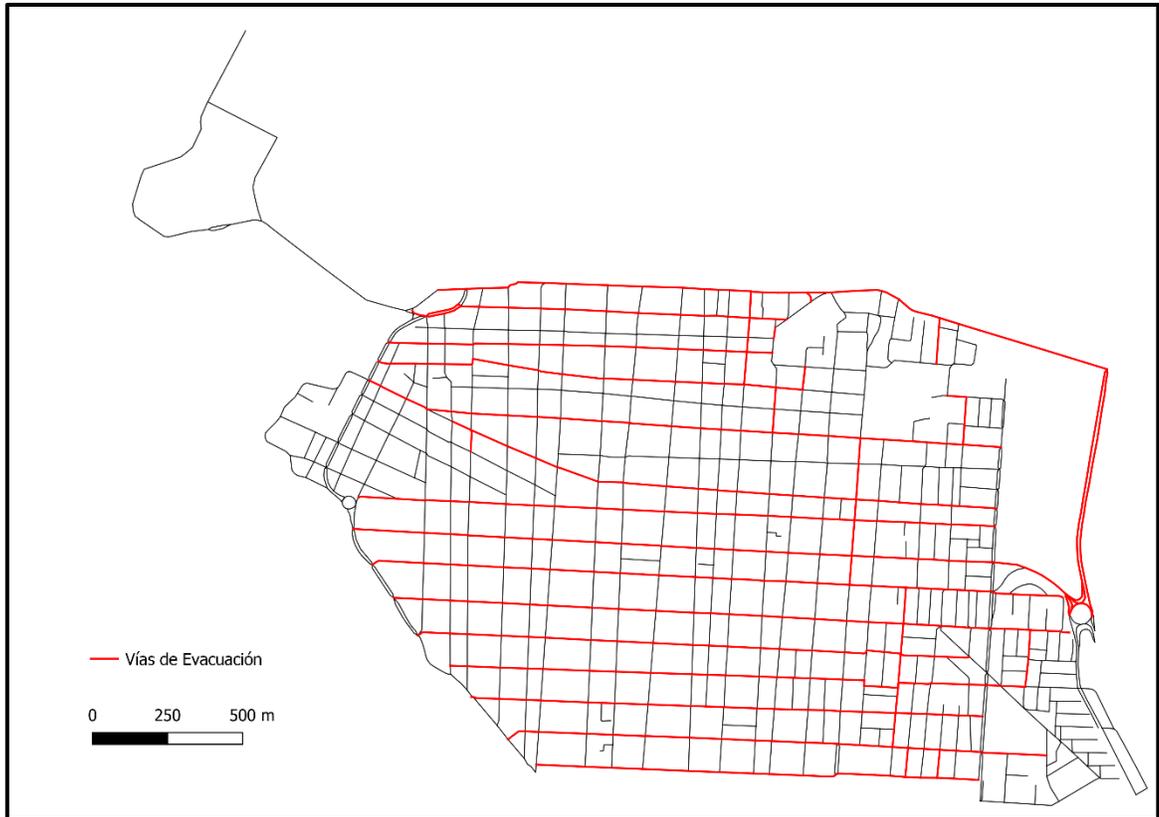


Figura A.3. Red Vial Macrozona 3

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de Dirección de Protección Civil (2017) y TRASA (2012c)



Figura A.4. Red Vial Macrozona 4

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de Dirección de Protección Civil (2017) y TRASA (2012c)

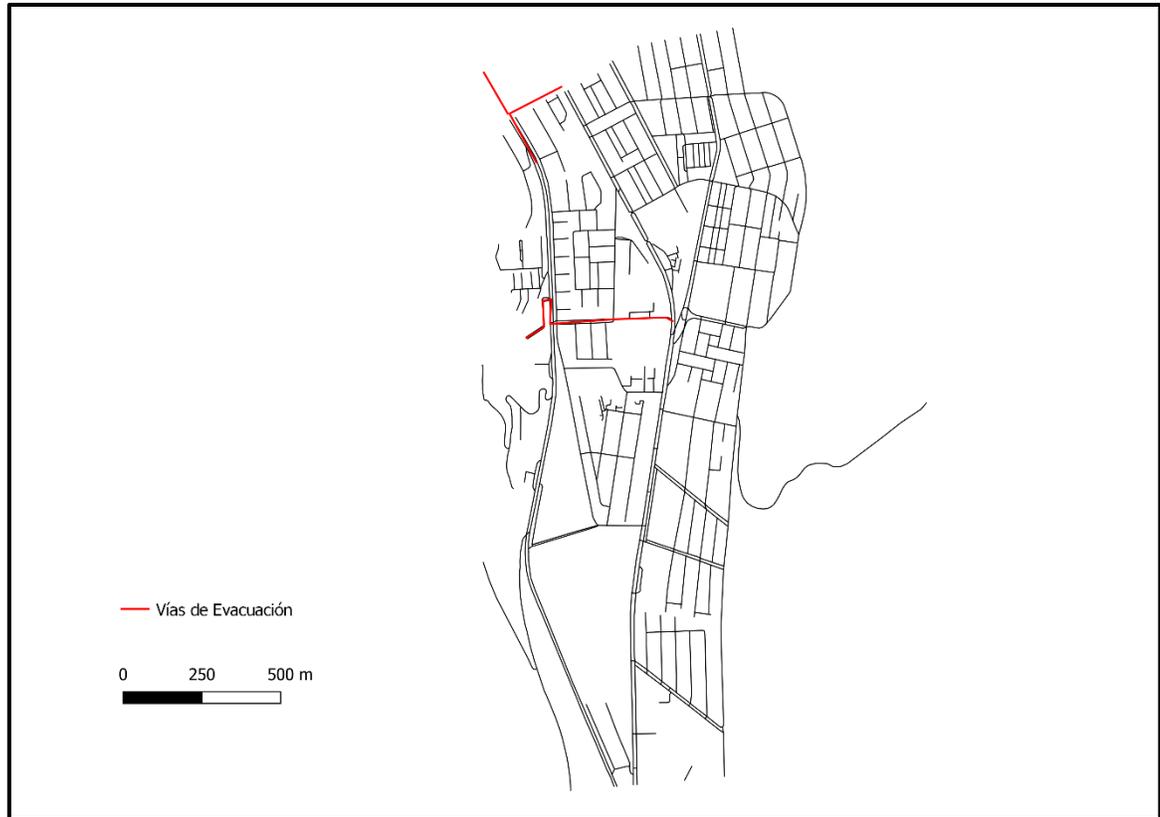


Figura A.5. Red Vial Macrozona 5

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de Dirección de Protección Civil (2017) y TRASA (2012c)

Anexo B. Conteo Vehículos

En el presente anexo se muestra el conteo de vehículos realizado entre los días 23 y 30 de agosto. Con el fin de que estos sean válidos para replicar un día hábil de la ciudad de Iquique a las 10 am, estos se realizaron entre las 9:30 y la 13:00 horas de los días hábiles.

Antes de mostrar el conteo, se debe presentar la Figura B.11. En ella aparece la numeración que utiliza la EOD 2010. Las zonas que no aparecen o no tienen un número se debe a que no fueron modeladas ya que estaban por sobre los puntos de encuentro y modelarlas era innecesario debido a que ya son zonas seguras.

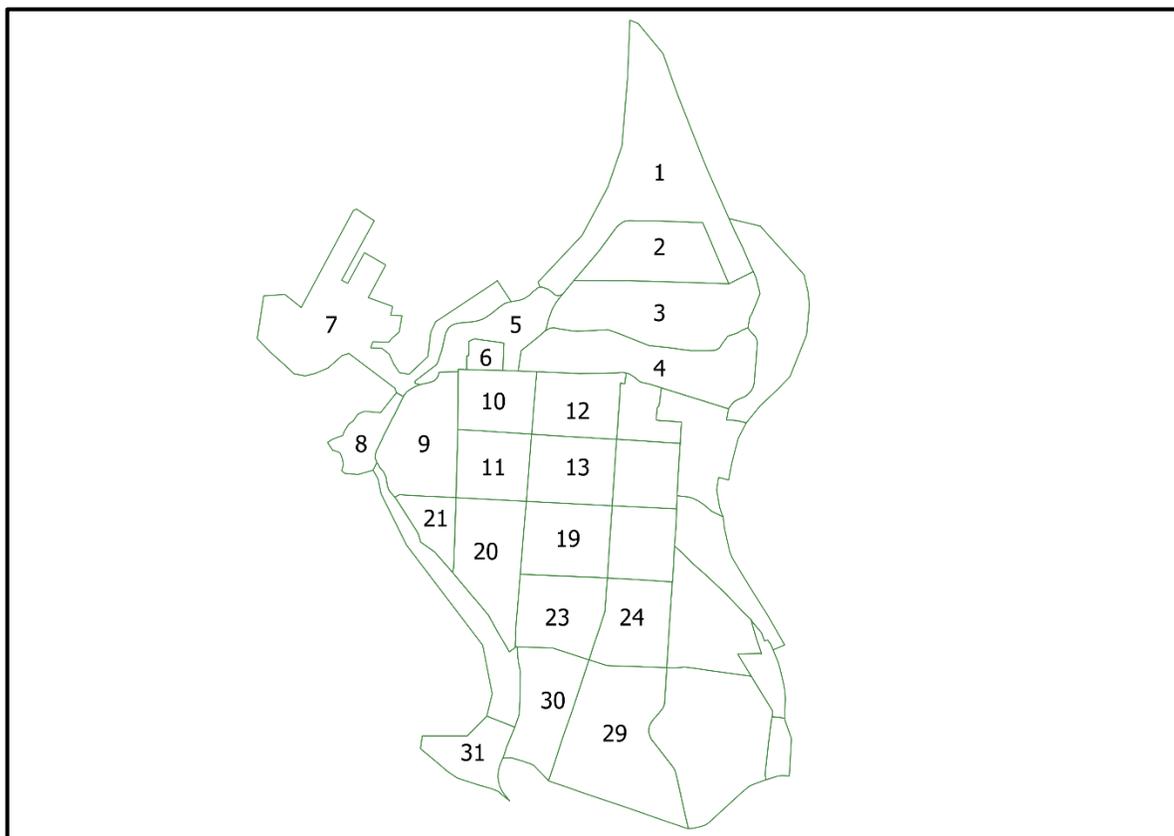


Figura B.1. Numeración Zonas EOD

Fuente: Elaboración Propia

De esta forma, en la Tabla E.1 se muestran los vehículos contabilizados. El concepto “Estacionado en pista” se refiere a autos que ocupaban una pista de la calle para hacerlo lo que puede ser legal o ilegal, dependiendo de la calle. En tanto, “Estacionamiento calle” se refiere a automóviles estacionados en la calle pero que no usan una pista, por ejemplo, un auto en un parquímetro o estacionado en la veredera.

Tabla B.1. Conteo Autos Estacionados

Zona	Estacionados en pista	Estacionamiento calle
1	474	103
2	460	40
3	48	0
4	119	80
5	187	50
6	33	25
7	0	0
8	0	0
9	482	188
10	579	301
11	448	719
12	427	353
13	248	638
19	248	638
20	493	737
21	180	102
23	196	250
24	350	88
29	360	299
30	88	18
31	31	24

Fuente: Elaboración Propia

En las zonas 1, 2 y 3 se observaron camiones, estos fueron contabilizados como 3 vehículos.

La zona 3 subestima el total de vehículos debido a que en ella está la zona amurallada y no se obtuvo acceso a ella. Además, los autos que estaban estacionados en el centro comercial Zofri no se contaron. Así mismo, no se obtuvo acceso a la zona del puerto (zona 7) por lo que no hay conteos. También la zona 8 no tiene conteos debido a un error la planificación.

Anexo C. Distribución de población con dificultades, 2002 y 2012

Tabla C.1. Distribución Etaria de la Población con Condición Permanente, 2002, Censo 2002

Grupo Etario	Lisiado	Mudez	Demencia Mental	Sordera	Ceguera	Discapacidad	No discapacidad	Total
0-4	2,431	277	3,179	540	346	6,300	1,144,776	1,151,076
5-9	3,481	616	5,388	1,196	702	10,582	1,306,016	1,316,598
10-14	3,932	670	8,795	1,842	1,030	15,304	1,407,148	1,422,452
15-19	4,282	831	10,474	1,914	1,189	17,592	1,519,402	1,536,994
20-24	2,728	515	6,497	1,003	620	10,717	933,804	944,521
25-29	3,847	781	7,528	1,477	954	13,731	1,178,993	1,192,724
30-34	4,987	839	8,665	1,848	1,142	16,549	1,183,642	1,200,191
35-39	6,499	814	8,606	2,131	1,534	18,726	1,216,274	1,235,000
40-44	8,023	845	7,453	2,528	1,789	19,812	1,111,946	1,131,758
45-49	10,446	758	6,373	3,012	2,583	22,356	1,043,416	1,065,772
50-54	8,198	512	3,448	2,601	2,438	16,562	581,335	597,897
55-59	10,720	615	3,346	3,783	3,307	20,918	583,056	603,974
60-64	12,171	728	2,856	4,854	3,835	23,331	476,571	499,902
65-69	11,780	518	2,469	5,727	3,929	23,328	375,959	399,287
70-74	13,231	565	2,909	7,356	4,497	27,102	321,016	348,118
75-79	10,919	449	3,033	7,506	4,154	24,456	194,875	219,331
80ymás	17,714	757	7,130	17,206	8,882	47,011	203,829	250,840
Total	135,389	11,090	98,149	66,524	42,931	334,377	14,782,058	15,116,435

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2003a)

Tabla C.2. Distribución Etaria de la Población con Deficiencias, Chile 2012, Censo 2012

Grupo Etario	Dificultad física y/o de movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Dificultad psiquiátrica o mental	Sordera o dificultad para oír aun usando audífonos	Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	Dificultad física y/o de movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Total
0-4	15,478	20,645	6,822	3,074	4,314	40,342	1,164,502	1,204,844
5-9	16,073	22,324	21,106	9,042	18,297	67,705	1,074,552	1,142,257
10-14	20,522	13,730	27,514	9,501	29,945	78,937	1,162,685	1,241,622
15-19	22,876	11,626	25,338	8,507	33,699	80,103	1,290,211	1,370,314
20-24	21,255	11,165	21,813	9,023	35,496	78,224	1,376,081	1,454,305
25-29	19,744	8,808	18,312	8,646	31,339	69,687	1,154,530	1,224,217
30-34	23,958	8,571	19,372	10,058	31,765	75,723	1,096,721	1,172,444
35-39	32,531	8,907	21,200	13,707	35,417	90,942	1,076,715	1,167,657
40-44	45,785	10,380	25,138	18,747	45,908	117,845	1,046,812	1,164,657
45-49	64,703	11,477	27,932	25,873	74,326	161,590	1,000,566	1,162,156
50-54	82,292	11,605	27,451	32,063	93,374	189,584	883,523	1,073,107
55-59	88,318	10,271	22,359	33,663	85,528	178,914	668,797	847,711
60-64	98,875	10,448	18,642	39,844	80,836	179,109	510,442	689,551
65-69	98,843	10,889	16,364	47,237	76,113	174,286	395,875	570,161
70-74	92,701	10,945	15,283	51,433	66,860	158,185	271,749	429,934
75-79	83,362	10,699	15,599	52,462	55,058	137,550	169,906	307,456
80 y más	155,825	25,198	43,300	115,631	92,294	240,590	171,620	412,210
Total	983,141	217,688	373,545	488,511	890,569	2,119,316	14,515,287	16,634,603

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de INE (2013)

Anexo D. Encuestados II ENDisc

Tabla D.1. Distribución Etaria del Muestreo, Chile 2015, II ENDisc

Grupo Etario	Dificultad física y/o movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Dificultad psiquiátrica	Dificultad mental o intelectual	Sordera o dificultad para oír aun usando audífono	Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	Tiene alguna condición de larga duración	No tiene ninguna condición de larga duración	Sin Dato	Total
0-4	16	41	1	3	1	-	62	2,400	3	2,462
5-9	28	43	5	20	6	-	102	2,570	4	2,672
10-14	31	20	11	35	5	-	102	2,607	1	2,709
15-19	40	16	16	19	3	4	98	2,966	2	3,064
20-24	20	6	6	11	2	10	55	3,290	-	3,345
25-29	28	3	7	7	1	18	64	2,749	-	2,813
30-34	26	3	11	7	2	23	72	2,290	-	2,362
35-39	32	3	9	6	4	16	70	2,177	-	2,247
40-44	46	4	8	7	6	12	83	2,343	-	2,426
45-49	80	3	16	3	4	22	128	2,566	-	2,694
50-54	135	6	9	10	6	42	208	2,918	1	3,126
55-59	140	6	11	3	13	38	211	2,347	-	2,558
60-64	122	1	7	5	18	38	191	1,872	-	2,063
65-69	146	3	9	6	23	41	228	1,521	-	1,749
70-74	125	5	2	7	17	25	181	1,147	-	1,328
75-79	125	1	4	1	18	28	177	793	-	970
80 y más	238	1	5	14	53	21	332	913	-	1,245
Total	1,378	165	137	164	182	338	2,364	37,469	11	39,833

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de SENADIS (2016a)

Tabla D.2. Distribución Etaria del Muestreo, Región de Tarapaca 2015, II ENDisc

Grupo Etario	Dificultad física y/o movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Dificultad psiquiátrica	Dificultad mental o intelectual	Sordera o dificultad para oír aun usando audífono	Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	Tiene alguna condición de larga duración	No tiene ninguna condición de larga duración	Sin Dato	Total
0-4	-	2	-	-	-	-	2	7-	-	72
5-9	1	1	-	-	1	-	3	72	-	75
10-14	-	1	2	-	-	-	3	63	-	66
15-19	1	-	-	-	-	-	1	58	-	59
20-24	-	-	-	-	-	-	-	78	-	78
25-29	-	-	-	-	-	-	-	75	-	75
30-34	-	-	-	-	-	2	2	52	-	54
35-39	2	1	-	-	-	-	3	53	-	56
40-44	2	-	1	1	1	-	5	55	-	6-
45-49	1	1	-	-	-	-	2	59	-	61
50-54	2	1	-	-	-	1	4	69	-	73
55-59	2	-	-	-	-	1	3	4-	-	43
60-64	-	-	-	-	2	-	2	51	-	53
65-69	2	-	-	-	-	2	4	28	-	32
70-74	4	-	-	-	-	-	4	23	-	27
75-79	2	-	1	1	1	-	5	14	-	19
80 y más	1	-	-	-	1	-	2	17	-	19
Total	2-	7	4	2	6	6	45	877	-	922

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de SENADIS (2016a)

Tabla D.3. Distribución Etaria Del Muestreo, Chile 2015, II ENDisc

Grupo Etario	Dificultad física y/o movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Dificultad psiquiátrica	Dificultad mental o intelectual	Sordera o dificultad para oír aun usando audífono	Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	Tiene alguna condición de larga duración	No tiene ninguna condición de larga duración	Sin Dato	Total
2 a 17	108	117	30	74	14	-	343	9,311	10	9,654
18 a 29	55	12	16	21	4	32	140	7,271	-	7,411
30 a 44	104	10	28	20	12	51	225	6,810	-	7,035
45 a 59	355	15	36	16	23	102	547	7,831	1	8,378
60 y más	756	11	27	33	129	153	1,109	6,246	-	7,355
Total	1,378	165	137	164	182	338	2,364	37,469	11	39,833

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de SENADIS (2016a)

Tabla D.4. Distribución Etaria Del Muestreo, Región de Tarapacá 2015, II ENDisc

Grupo Etario	Dificultad física y/o movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Dificultad psiquiátrica	Dificultad mental o intelectual	Sordera o dificultad para oír aun usando audífono	Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	Tiene alguna condición de larga duración	No tiene ninguna condición de larga duración	Sin Dato	Total
2 a 17	2	4	2	-	1	-	9	231	-	240
18 a 29	-	-	-	-	-	-	-	185	-	185
30 a 44	4	1	1	1	1	2	10	160	-	170
45 a 59	5	2	-	-	-	2	9	168	-	177
60 y más	9	-	1	1	4	2	17	133	-	150
Total	20	7	4	2	6	6	45	877	-	922

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de SENADIS (2016a)

Tabla D.5. Distribución Etaria Del Muestreo, Región de Tarapacá Urbano 2015, II ENDisc

Grupo Etario	Dificultad física y/o movilidad	Mudez o dificultad en el habla	Dificultad psiquiátrica	Dificultad mental o intelectual	Sordera o dificultad para oír aun usando audífono	Ceguera o dificultad para ver aun usando lentes	Tiene alguna condición de larga duración	No tiene ninguna condición de larga duración	Sin Dato	Total
2 a 17	2	3	2	-	1	-	8	227	-	235
18 a 29	-	-	-	-	-	-	-	179	-	179
30 a 44	4	1	1	1	1	2	10	154	-	164
45 a 59	4	2	-	-	-	2	8	161	-	169
60 y más	8	-	1	1	3	2	15	124	-	139
Total	18	6	4	2	5	6	41	845	-	886

Fuente: Elaboración Propia en Base a Datos de SENADIS (2016a)

Anexo E. Encuesta Origen Destino, Vehículos

En esta sección se encuentran los identificadores utilizados por la Encuesta Origen Destino 2010 de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio.

Tabla E.1. Opciones Vehículos Transporte EOD

ID Vehículo Transporte	Vehículo Transporte
-1	Sin Información
1	Auto
2	Motocicleta
3	Camionetas y Sport Utility Vehicle
4	Furgón, Van o Miniván
5	Camión
6	Otros Vehículos en Hogar (Triciclo, Carreta, etc.)
7	Bicicleta
8	Microbús
9	Bus Particular
10	Taxibus Urbano
11	Bus Interprovincial
12	Minibús
13	Taxi Colectivo
14	Taxi Básico o Radio Taxi
15	Metrotrén
16	A pie
17	Otros
18	Minibús Particular
19	Taxibus Rural
20	En coche, en Brazos
21	Furgón escolar

Fuente: TRASA (2012b)

Tabla E.2. Opciones Tipo Estacionamiento EOD

ID Tipo Estacionamiento	Tipo Estacionamiento
-1	Sin Información - No Corresponde
1	Lugar a donde fue
2	Estacionamiento de otro lugar
3	Edificio, playa o subterráneo
4	Calle
5	No fue Estacionado
6	No sabe

Fuente: TRASA (2012b)

Anexo F. Inputs Modelo Netlogo

En la misma carpeta en que se encuentra el archivo ejecutable “.nlogo”, se deben encontrar dos carpetas con los siguientes nombres “SpatialDB” y “Variables”.

En la carpeta “SpatialDB” se deben encontrar los siguientes archivos:

- (i) Calles.
- (ii) Zonas.
- (iii) Edificio de Evacuación.
- (iv) Punto de Encuentro.
- (v) Pendiente.
- (vi) Vías de Evacuación

Para todos estos archivos, se deben encontrar las terminaciones .dbf, .prj, .qix, .qpj, .shp y .shx.

Adicionalmente debe haber un archivo llamado “zonas.prj” que sea la unión de todas las zonas de (ii).

En tanto, en la carpeta “Variables” están todos los archivos de texto que indican qué archivos cargar, variables y caracterización de la población. Los archivos de texto deben tener los siguientes nombres y contener la siguiente información en el orden que aparece:

(i) “1_zone shape.txt”

Este documento indica los archivos GIS que deben ser cargados

“Nombre archivo de pendientes”.shp

“Nombre archivo de calles”.shp

“Nombre archivo puntos de encuentro”.shp

“Nombre archivo edificios de evacuación”.shp

“Nombre archivo vías de evacuación”.shp

“Nombre archivo de zona 1”.shp

“Nombre archivo de zona 2”.shp

⋮

“Nombre archivo de zona n”.shp

(ii) “2_zone envelope.txt”

Este documento debe tener la lista de zonas o archivos .shp que delimiten el mapa de la interfaz de Netlogo. Una forma de estar seguro de que no se deja nada fuera, utilizar la lista de “1_zone shape.txt”.

(iii) “3_zone colors.txt”

Indica el color de las zonas y del resto de los accidentes geográficos. Los colores vienen dados por la nomenclatura de Netlogo. Se recomienda usar los siguientes colores: 9, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 79, 89, 99.

Línea en blanco
Línea en blanco
Línea en blanco
Línea en blanco
Color vías de evacuación
Color de zona 1
Color de zona 2
⋮
Color de zona n

(iv) “5_input shelters.txt”

Valores que tomaran las variables relativas a edificios de evacuación vertical indicadas en la lista.

Tamaño del refugio en el mapa (int)
Cantidad inicial de personas en el edificio (int)
Capacidad de cada piso (int)
Cantidad de primeros pisos que podrían inundarse (int)

(v) “6_input evacuee general.txt”

Angulo de visión de los evacuados
Tamaño de los evacuados (variable no utilizada)

(vi) “7_input evacuee group.txt”

Archivo de cantidad y caracterización de la población. En este, las zonas que no carguen población, utilizar un número negativo. No importa cuál por lo que las zonas, si están numeradas, se puede usar el negativo de ese valor para mantener el orden. Los archivos de pendiente, calles, puntos de encuentro, edificios de evacuación y vías de evacuación no cargan población,

En este caso, se ejemplificará para evitar confusiones. En paréntesis se encuentra una aclaración, esto no debe ir en el archivo de texto.

-1
(Línea en blanco)

7 (zona)

1 (grupo etario)

0 (int, discapacidad)

0 (¿necesita ayuda? 0 no, 1 si)

1.5 (velocidad máxima [m/s])

1000 (cantidad)

(Línea en blanco)

⋮ Se puede continuar repitiendo el bloque de vehículos
(destacado en naranja)

(vii) “8_input displacement.txt”

Relación entre segundos y *ticks* [s/tick]

(Cantidad de tiempo que transcurre

Density Check Time [s].

antes de que la densidad en frente de la persona vuelva a ser calculada)

Cono de visión [grados]

Densidad para evitar detención total

Check Node Available [s]

(No se utiliza)

(viii) “input car.txt”

Archivo de cantidad y caracterización de los vehículos. En este, las zonas que no carguen población, utilizar un número negativo. No importa cuál por lo que las zonas, si están numeradas, se puede usar el negativo de ese valor para mantener el orden. Los archivos de pendiente, calles, puntos de encuentro, edificios de evacuación y vías de evacuación no cargan población,

En este caso, se ejemplificará para evitar confusiones. En paréntesis se encuentra una aclaración, esto no debe ir en el archivo de texto.

-1	(Línea en blanco)
7	(zona)
1	(id, en caso de más de un tipo de auto)
1	(tipo estacionamiento: 0 para estacionamiento calle, 1 estacionado en una pista, 2 para el resto)
5	(capacidad del auto, no se utiliza)
5.7	(largo del auto, no se utiliza)
1.7	(ancho del auto, no se utiliza)
11.1	(velocidad máxima del auto [m/s])
10	(equivalencia a personas del auto [per/veh])
167	(cantidad)
	(Línea en blanco)
:	Se puede continuar repitiendo el bloque de vehículos (destacado en naranja)

Además, en la interfaz del modelo se pueden modificar las siguientes variables:

Variable	Descripción
replicas	Número de réplicas que se realizaran en la ejecución
evacuation_policy	Horizontal o vertical
max_distance_to_building	máxima distancia que las personas se pueden encontrar para evacuar verticalmente
load_cars	<ul style="list-style-type: none"> - No load: no cargar autos - No park on streets: cargar autos, pero sin estacionar en las calles - Park on streets: cargar autos y permitir que estacionen en las calles
help_policy	<ul style="list-style-type: none"> - No help: todos evacuan por su cuenta - In need of help: la población que tenga algún nivel de dependencia funcional será ayudada - All disc: la población que tenga algún nivel de dependencia o alguna condición permanente será ayudada
car_policy	<ul style="list-style-type: none"> - No use: nadie usa los vehículos - Vulnerable use: el grupo seleccionado en “help_policy” podrá usar los vehículos - Everyone use: cualquiera puede usar vehículos mientras haya suficientes

Variable	Descripción
delay_car	Tiempo de retraso entre que la entidad llega el auto y empieza a evacuar en este
in_cdct	Car Density Check Time: cantidad de ticks que pasan entre cálculo de densidad para el auto
in_chlct	Car Change Line Check Time: cantidad de ticks que pasan entre oportunidades que el vehículo tiene para cambiarse de pista
in_group_sr	Group Search Range: rango de búsqueda para el evacuado buscador para formar el grupo
in_car_sr	Car Search Range: rango de búsqueda de un evacuado para encontrar un vehículo no ocupado
in_eclct	Eva Change Lane Check Time: cantidad de ticks que pasan entre oportunidades que el evacuado tiene para cambiarse de pista
dca	Densidad Cambio Auto: densidad desde la que los vehículos comienzan a considerar a los evacuados como un obstáculo

Anexo G. Análisis y comparación Álvarez (2017)

Álvarez en su tesis de magíster (2017) analiza el efecto de las micro-vulnerabilidades de la ciudad. Estas son todos los accidentes geográficos que hay en las calles tales como autos estacionados, postes, desniveles, cambios en el terreno, puestos comerciales, etc. Para cuantificar el efecto utiliza un factor de fricción definido como:

$$i[\%] = \frac{\sum_j S_{m_j} \cdot \alpha_j}{S_r} \quad (G.1)$$

$$\alpha_j = 1 - SCV_j \quad (G.2)$$

Donde:

S_m : Superficie de micro-vulnerabilidad asociada a una vía de evacuación.

S_r : Superficie de la vía de evacuación analizada.

α : Factor de reducción de velocidad asociado a cada micro-vulnerabilidad.

SCV: Factor de Conservación de Velocidad (por sus siglas en inglés)

Con lo anterior y realizando una toma de muestra en terreno, determina que en las vías de evacuación de la Macrozona 2, el 70% de la fricción viene dada por los autos estacionados en las calles. Por esta razón, en el presente trabajo se optó por contar los autos estacionados.

Sin embargo, al analizar los resultados de Álvarez, la diferencia cuando la distribución Rayleigh tiene media tres minutos (al igual que en el presente trabajo), el retraso máximo que se produce es a lo más de un minuto en el caso diurno y de dos y medio en el caso

nocturno. Esto implica que, en los momentos de mayor diferencia han escapado 230 personas menos para el caso diurno y 170 para el nocturno. Esto se puede observar en la Figura G.1.

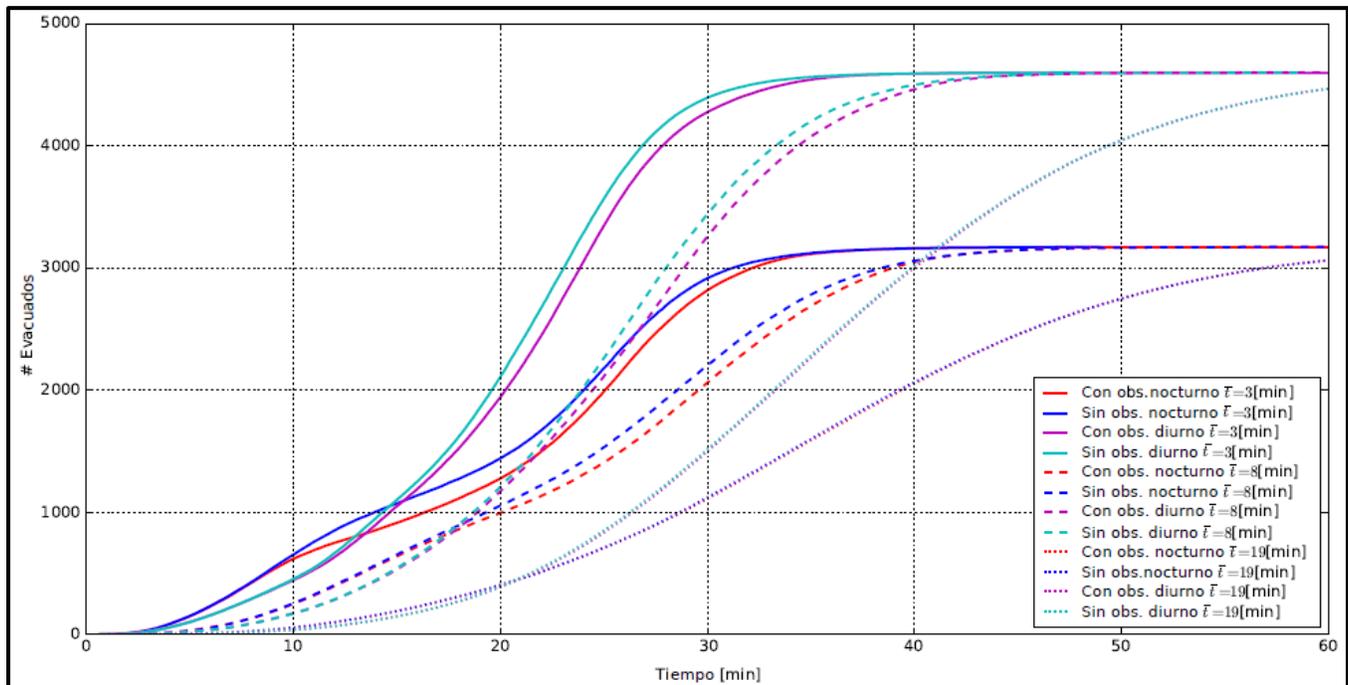


Figura G.1. Curva de Evacuación Considerando Presencia (Con obs.) y Ausencia (Sin obs.) de obstáculos con inicio de evacuación dada por distribución Rayleigh con media t

Fuente: (Álvarez, 2017)

Esto muestra que el modelo de simulación del presente trabajo no es capaz de replicar las micro-vulnerabilidades ya que cuando se comparó el caso de evacuación solo a pie sin y con autos estacionados en las calles, no hay una diferencia notable. Esto se puede explicar en parte a que el modelo utilizado en el presente trabajo utiliza densidades para ajustar la velocidad de las personas mientras que el de Álvarez cada entidad intenta evadir colisiones. Básicamente es el trade-off de un modelo mesoscópico y uno microscópico.

A pesar de lo anterior hay dos salvedades. La primera es que las diferencias obtenidas por Álvarez son menores a las que producen los vehículos en el presente estudio por lo que

los resultados no se ven invalidados. La segunda consiste en el impacto de las micro-vulnerabilidades cuando la congestión varía.

Como se observa en la Figura G.1, en la medida que la población, y por lo tanto la congestión, aumenta, el efecto de las micro-vulnerabilidades disminuye. De esta manera, los resultados del presente trabajo se verán menos afectados porque la población modelada es mayor que en el caso de Álvarez debido a que él modela con el corte temporal 2010 y 2012. Además, él no considera la presencia de autos los que conllevan a una mayor congestión.

Anexo H. Mapas de calor, Macrozona 1, escenario diurno

En las siguientes figuras aparece la densidad en las calles. Esta se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\text{Número de personas} + 10 * \text{Número de vehículos}}{W * L} \quad (\text{H.1})$$

En donde W es el ancho de una calle y L es el largo de una cuadra. De esta manera se obtiene la densidad de cada calle dividido por cada cuadra. En las siguientes imágenes se muestra la sucesión del estado de la evacuación a los 10, 20 y 30 minutos en la Macrozona 1, escenario diurno con uso de 2,611 vehículos por cualquier persona.

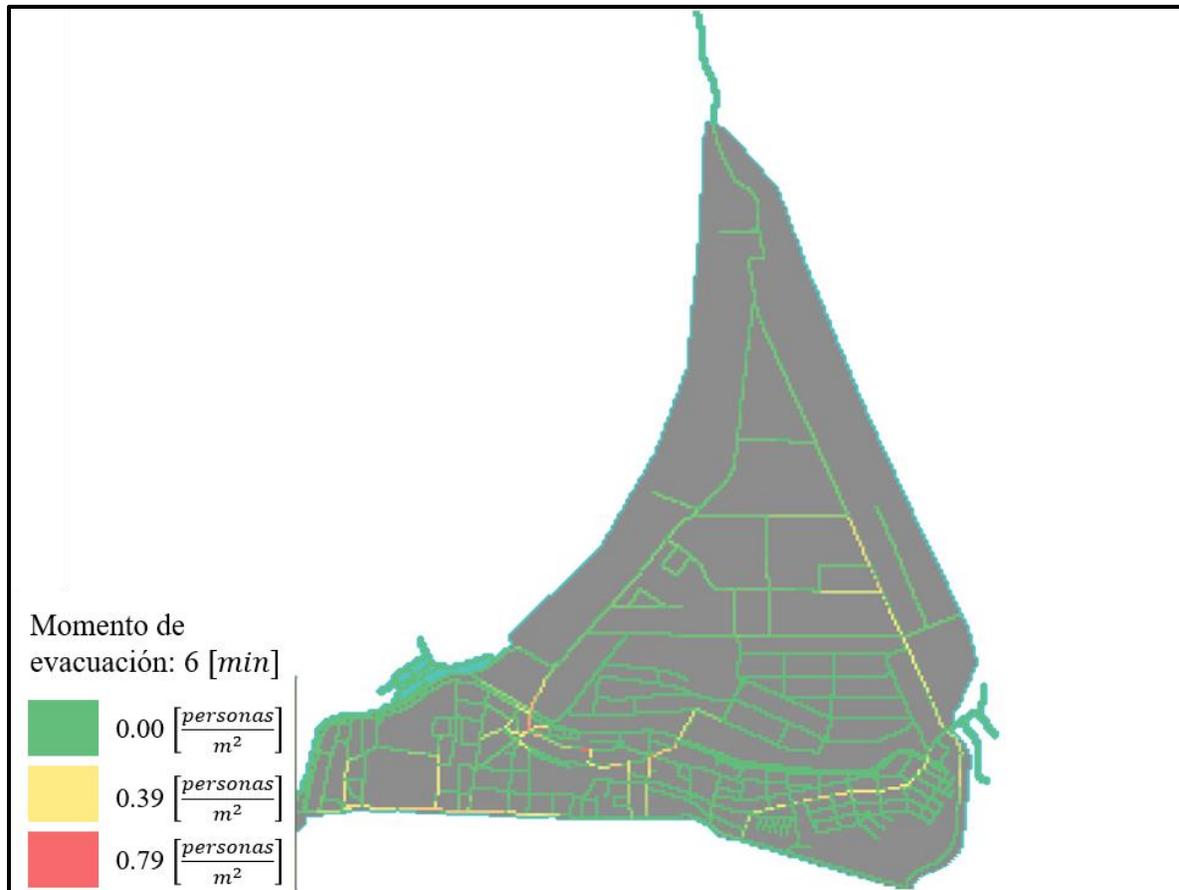


Figura H.1. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra con uso de 2,611 Vehículos por Cualquier Persona Luego de 10 Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno

Fuente: Elaboración Propia

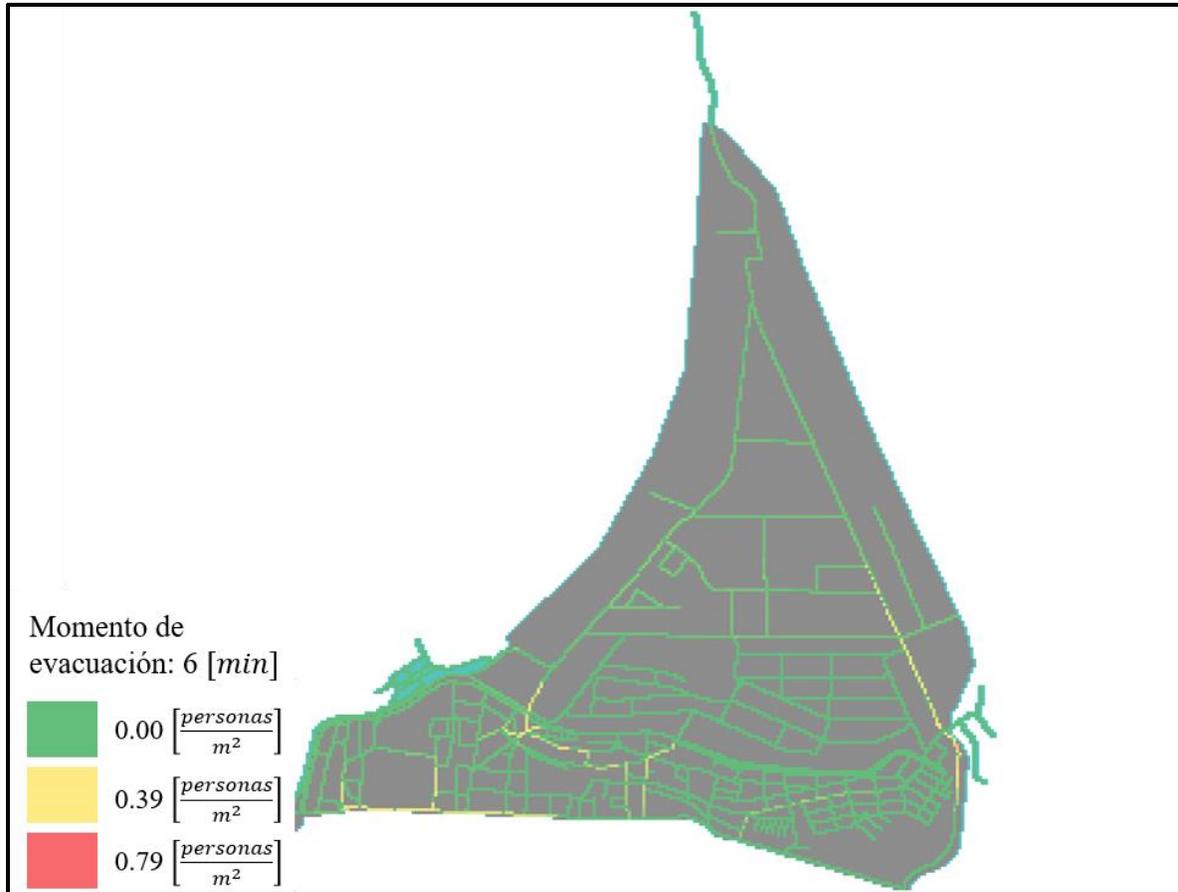


Figura H.2. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra con uso de 2,611 Vehículos por Cualquier Persona Luego de 20 Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno

Fuente: Elaboración Propia

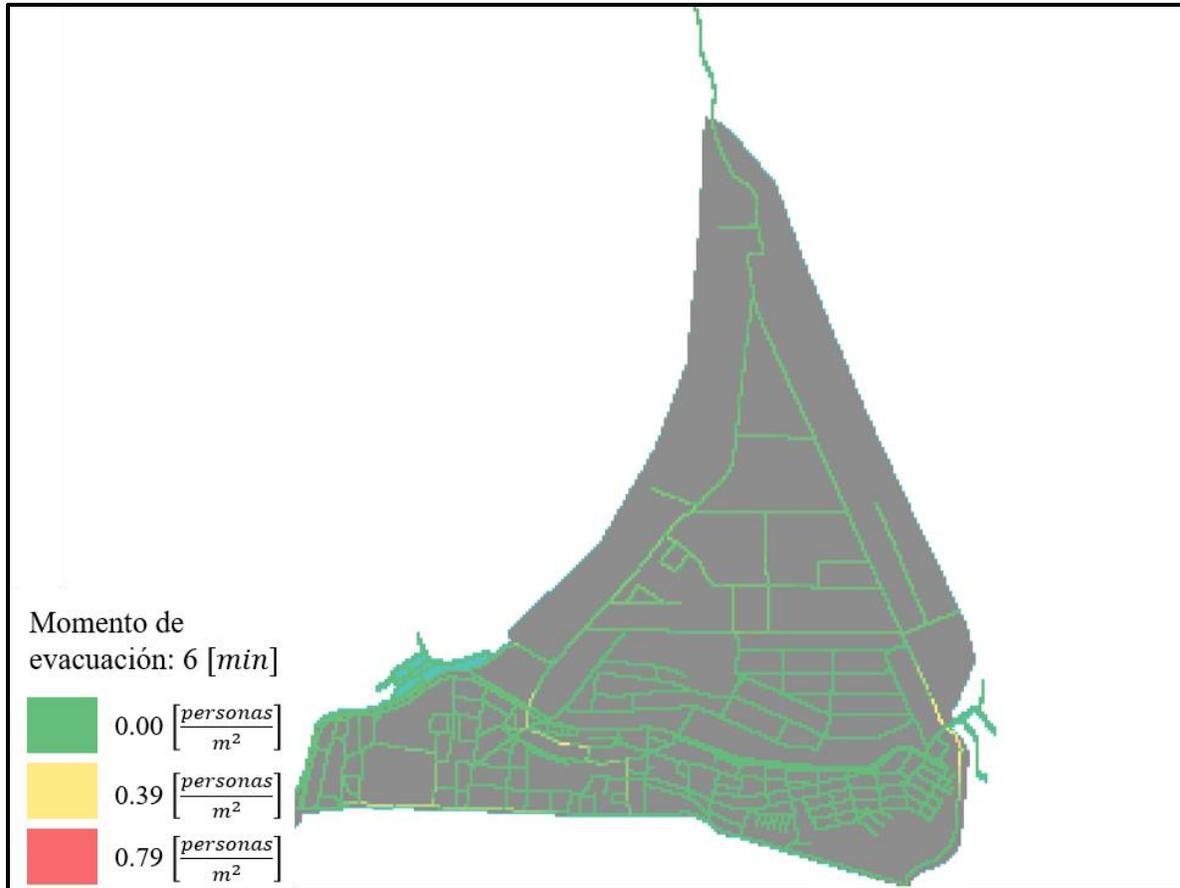


Figura H.3. Densidad en $\left[\frac{\text{per}}{\text{m}^2}\right]$ por Cuadra con uso de 2,611 Vehículos por Cualquier Persona Luego de 30 Minutos de Evacuación, Macrozona 1 Diurno

Fuente: Elaboración Propia