

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



**MODELO DE SIMULACION PARA LA EVACUACION DE TALCAHUANO.
APLICACIÓN EN TSUNAMI.**

FRANCO ALEXANDER KRÖLL YÁÑEZ

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

Profesor Guía: María Teresa Bull Torres, Ph. D.

Profesor Informante: Rafael Enrique Aránguiz Muñoz, Ph. D.

Concepción, Mayo de 2016.

Resumen.

El presente informe tiene por objetivo generar un modelo de simulación para el análisis de la evacuación de los habitantes de Talcahuano ante la ocurrencia de un tsunami.

El estudio específico en el centro de Talcahuano, radica en el gran riesgo de tsunami que posee esta ciudad, que es afectada por este fenómeno natural. Además, tiene una gran vulnerabilidad en cuanto al asentamiento de la comunidad cerca del borde costero, hecho que da cuenta de una deficiente planificación en función al fenómeno.

Se analizaron las variables que influyen en la evacuación de personas. Luego, se determinaron los tiempos de evacuación según las variables analizadas. Y finalmente, se logró implementar el modelo de simulación utilizando la plataforma Netlogo.

Para comenzar, se investigaron los aspectos que mayor influencia tienen en un proceso de evacuación. Una vez definidos, fue necesario tomar una encuesta en el sitio estudiado para determinar la proporción de población a la cual afectan las mencionadas variables.

Los procesos de evacuación varían de acuerdo al origen del terremoto. Si el sismo ocurre en un lugar cercano, el 20% de la población que evacúa, no considera nada antes de evacuar, mientras que un 80% realiza una serie de acciones previas. Entre ellas, un 32% se preocupa de recopilar implementos básicos como alimento y agua; un 21% espera a todo el grupo familiar para evacuar y un 20% se ocupa de cerrar puertas y ventanas para evitar posibles robos.

Por otro lado, cuando los terremotos son de origen lejano, un tercio de la población no evacúa por diferentes motivos. Un 65% de la población, por experiencia dice saber que no llegarán grandes ondas al borde costero, un 12% al

observar el mar en calma desiste de evacuar y un 10% no evacúa por temor al robo al dejar su vivienda desprotegida.

Con los datos obtenidos, se programó el proceso de evacuación utilizando la plataforma Netlogo. Se propusieron dos escenarios. El primero simula una evacuación en la que cada persona tiene la opción de utilizar la vía que sea más conveniente para llegar a la zona de seguridad. Mientras que en el segundo caso las personas deben elegir, entre cuatro rutas cuál es la más adecuada. En ambos casos la velocidad peatonal máxima es de 1,4 m/s. Además, se consideró que una proporción del total de sujetos evacuarán con un tiempo de retraso de 5 minutos, mientras que el resto evacuará desde el minuto inicial.

Los resultados arrojados por el modelo, previamente validados, indican que la evacuación del primer escenario es más rápida que en el segundo ya que al encontrarse las vías más expeditas, las personas no se detienen y alcanzan velocidades peatonales mayores.

Abstract.

This report aims to generate a simulation model for the analysis of the evacuation of the inhabitants of Talcahuano upon the occurrence of a tsunami.

The specific study in the center of Talcahuano, lies at great risk of tsunami that this city has, which is affected by this natural phenomenon. It also has a great vulnerability in terms of community settlement near the coastline, a fact that accounts for poor planning according to the phenomenon.

The variables that influence the evacuation of people were analyzed. Then, evacuation times were determined according to the variables analyzed. And finally, it was possible to implement the simulation model using the Netlogo platform.

To begin with, the aspects that have the greatest influence on evacuation process were investigated. Once defined, it was necessary to take a survey at the site studied to determine the proportion of population that affect these variables.

Evacuation procedures vary according to the origin of the earthquake. If the earthquake occurs in a nearby place, 20% of the population that evacuates, do not consider anything before evacuating, while 80% make a series of previous actions. Among them, 32% worry to collect basic tools as food and water; 21% wait for the whole family to evacuate and 20% takes care to close doors and windows to prevent theft.

On the other hand, when earthquakes are of distant origin, one third of the population do not evacuate for different reasons. 65% of the population, by experience tells know that will not be big waves at coastline, 12% observe the calm sea and gives up to evacuate and 10% do not evacuate for fear of theft by leaving their home unprotected.

With the data obtained, the evacuation process was programmed using the platform Netlogo. Two scenarios were proposed. The first simulates an evacuation in which each person has the option of using the path that is convenient to reach the safety zone. While in the second case people must choose between four routes, which is the most appropriate. In both cases the maximum pedestrian speed is 1.4 m/s. In addition, it was considered that a proportion of the total subjects evacuated with a time delay of 5 minutes, while the rest evacuated from the first minute.

Results from the model previously validated, indicate evacuation of the first stage is faster than the second because to find the most expeditious way, people do not stop and pedestrian reach higher speeds.

Dedicatoria y agradecimientos.

Primeramente agradezco a Dios por darme salud y una familia increíble.

Este proyecto está dedicado a cada una de las personas que creyeron en mí.

A mi profesor guía, Dra. María Teresa Bull por su dedicación y constante ayuda.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanos, por darme la motivación de seguir adelante en momentos difíciles y sobre todo por su amor incondicional.

A Claudia, pilar fundamental en mi vida, por su amistad, confianza e infinito amor.

Gracias totales.

Tabla de contenido

Resumen.	ii
Abstract.....	iv
Dedicatoria y agradecimientos.....	vi
CAPITULO I: Introducción	6
1.1 Introducción general.	6
1.2 Justificación.	7
1.3 Objetivo general.....	9
1.4 Objetivos específicos.....	9
1.5 Delimitación de la propuesta.....	10
1.6 Metodología.	10
1.7 Descripción de capítulos.....	14
CAPITULO II: Revisión bibliográfica.	15
2.1 Tsunami, desastre natural en Chile.....	15
2.2 Gestión de emergencias en Chile.	17
2.3 Evacuación en Chile.....	19
2.4 Variables que afectan la decisión de evacuación.....	20
2.5 Simulación.....	23
2.6 Simulación de evacuaciones.	24
2.7 Simulación basada en agentes.	28
2.7.1 Plataformas orientadas a la simulación de agentes.....	28
2.8 Simulaciones de tsunamis.....	31
CAPITULO III: Diseño del modelo conceptual.	33
3.1 Área de estudio.	33

3.1.1 Sector El Centro.	34
3.2 Formulación del problema.	39
3.3 Diseño del modelo conceptual.	40
3.4 Colección y tratamiento de datos.	44
3.4.1 Encuesta y resultados.....	45
CAPITULO IV: Construcción del modelo.	57
4.1 Construcción del modelo.	57
4.1.1 Programación de la lógica del modelo.	57
4.1.2 Diseño de la animación del modelo.	64
4.2 Verificación.....	67
4.2.1 Reuniones con responsables del proceso.	67
4.2.2 Animación y programación.	67
4.2.3 Reportes de simulación.	68
4.3 Validación.....	68
CAPITULO V: Análisis, experimentación y resultados.....	71
5.1 Primer escenario.	72
5.2 Segundo escenario.	74
CAPITULO IV: Conclusiones y recomendaciones.	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	85
Anexo A. Desarrollo.	85
Anexo B. Encuesta.....	88
Anexo C. Programación de Netlogo.	100
Anexo D. Análisis y experimentación.	109

Índice de tablas.

Tabla 1: Registros de tsunamis en la bahía de Concepción.	35
Tabla 2: Tránsito de la variable al ítem.	47
Tabla 3: Tiempos de evacuación.	69
Tabla 4: Proyección de la población de Talcahuano.....	86
Tabla 5: Sexo de la población de Talcahuano	86
Tabla 6: Cantidad de viviendas en Talcahuano.	87
Tabla 7: Tiempos que tardan las familias en salir de sus hogares.....	109

Índice de figuras.

Figura 1: Propagación de ondas del terremoto de 1960.	16
Figura 2: Tipos de mandos en Chile.	18
Figura 3: Mapa de Talcahuano.	33
Figura 4: Tiempos de evacuación en Talcahuano.	37
Figura 5: Distancias recorridas en la evacuación de Talcahuano.	38
Figura 6: Destinos de la evacuación en Talcahuano.	38
Figura 7: Diagrama de flujo del proceso de evacuación.	43
Figura 8: Proceso para construir la encuesta.....	46
Figura 9. Sector Centro de Talcahuano.	52
Figura 10: Razones para no realizar el proceso de evacuación.	54
Figura 11: Acciones previas a evacuar.	55
Figura 12: Medios de alerta de evacuación.	56
Figura 13: Sub-modelos de simulación.....	58
Figura 14: Botones iniciales.....	64
Figura 15: Deslizador número de personas.	65
Figura 16: Deslizador límite de velocidad.	65
Figura 17: Deslizador número de calles.....	65
Figura 18: Vista del mundo virtual.....	66
Figura 19: Tiempos que tardan las familias en salir de sus hogares.	71
Figura 20: Representación del primer escenario.	72
Figura 21: Velocidad media de las personas, escenario 1.....	73
Figura 22: Personas detenidas, escenario 1.....	74
Figura 23: Representación del segundo escenario.....	75
Figura 24:Velocidad media de las personas, escenario 2.....	75
Figura 25: Personas detenidas, escenario 2.....	76
Figura 26: Carta de inundación de Talcahuano.	85
Figura 27: Charlas: Terremotos y tsunamis.	86
Figura 28: Formato de la encuesta.	90

Figura 29: Número de encuestados por manzana.	95
Figura 30: Género de los encuestados.	96
Figura 31: Rango etario de encuestados.	96
Figura 32: Conocimiento de zonas seguras de Talcahuano.	97
Figura 33: Evacuación en Talcahuano tras terremoto de Coquimbo.	97
Figura 34: Localización de la población, terremoto 2010.	98
Figura 35: Destinos de evacuación.	98
Figura 36: Medios de transporte utilizados para evacuar.	99
Figura 37: Código de rutas aleatorias de evacuación.	100
Figura 38: Código de rutas establecidas de evacuación.	103
Figura 39: Gráfico del modelo, velocidad media.	107
Figura 40: Gráfico del modelo, personas detenidas.	108

CAPITULO I: Introducción

1.1 Introducción general.

Chile es un país propenso a los desastres naturales, de los cuales destacan terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, aludes, entre otros.

Últimamente en el país se han desencadenado diversos fenómenos naturales como: la erupción del volcán Calbuco, el alud en el norte de Chile, terremotos y tsunamis en Constitución, Iquique y Coquimbo los años 2010, 2014 y 2015 respectivamente, e incendios en Valparaíso y más recientemente en Laraquete. Los desastres traen nefastas consecuencias como la pérdida de vidas humanas, y alteraciones de las condiciones sociales, económicas, ambientales, psicológicas y culturales a nivel nacional (Cisternas, 2011).

Talcahuano, comuna de la Provincia de Concepción, es uno de los puertos más importantes del país que en el año 2010, entre otras ciudades, fue azotada por un tsunami que causó la muerte de 21 habitantes (Romero *et al.*, 2011). Mencionado fenómeno no es desconocido entre los habitantes de Talcahuano, el año 2015 la comuna fue alertada de un posible tsunami tras ocurrido el terremoto de Coquimbo, en el norte de Chile. Tras esto, un gran número de personas tomó la decisión de no evacuar.

Los hechos anteriores dan cuenta de una falta de medidas que disminuyan el riesgo de muertes, lo cual se puede alcanzar teniendo un conocimiento más acabado del comportamiento de la sociedad específicamente frente a una alerta de tsunami. Ante este hecho surge la importancia de la simulación, porque es un instrumento que permite el estudio de las vías de evacuación y el comportamiento de la población, apoyando la disminución del riesgo de tsunami y en general, de cualquier amenaza.

La simulación, herramienta utilizada en el presente estudio, permite tener un conocimiento más real del comportamiento de personas en una evacuación de

Talcahuano y a través de esta se pueden obtener propuestas de mejora que sirvan como apoyo a las entidades pertinentes. Chile posee oficinas de respuestas ante riesgos entendiendo el gran historial de amenazas naturales que este país posee.

La Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) es el organismo que tiene por misión “planificar, impulsar, articular y ejecutar acciones de prevención, respuesta y rehabilitación frente a situaciones de riesgo colectivo, emergencias, desastres y catástrofes de origen natural o provocados por la acción humana” (ONEMI, 2015). Por otra parte, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) es el organismo oficial del Estado en temas de hidrografía, oceanografía y cartografía náutica.

1.2 Justificación.

En nuestro país, el riesgo de tsunami toma importancia al momento de considerar el continuo crecimiento demográfico de localidades cercanas al borde costero, donde la tendencia a urbanizar zonas muy próximas al mar se caracteriza por su escasa planificación en función de tal amenaza (Lagos, 2000).

Talcahuano, comuna de la Provincia de Concepción y área de estudio del proyecto, fue víctima de un tsunami asociado a un sismo de magnitud 8,8 Mw¹ el pasado 27 de febrero del 2010, el cual es considerado como el segundo más grande en la historia del país (Servicio Sismológico de Chile, 2010). Según indica el Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial y el Sistema Integrado de Información Territorial, el terremoto y tsunami causaron conjuntamente en Talcahuano, la muerte de 30 habitantes, dejó alrededor de 106.000 damnificados y 64.541 viviendas dañadas (Romero *et al.*, 2011). La oficina del Ministerio Público de Chile (2011), citado por León y March (2014),

¹ Mw: Escala sismológica de magnitud de momento, es una escala logarítmica usada para medir y comparar terremotos.

señaló que 21 fueron las víctimas fatales en Talcahuano causadas por el tsunami, dejando en evidencia la gran peligrosidad de este fenómeno.

El terremoto del 2010 en territorio chileno delató una serie de deficiencias en la institucionalidad pública de respuesta ante riesgos naturales, en un país que pese a tener un gran historial de desastres, no tuvo la capacidad de gestionarlos de forma adecuada. La tardanza en la respuesta para fijar una alerta de tsunami, que tuvo por consecuencia la pérdida de vidas humanas en la zona de desastre, evidenció la falta de coordinación a nivel de las instituciones públicas, las falencias en la línea de mando para la toma de decisiones, la dependencia política de las instituciones técnicas y la limitada infraestructura de respuesta ante un desastre (Guajardo, 2011).

Frente a los problemas mencionados, surge la necesidad de investigar las variables que influyen en la evacuación de los habitantes de Talcahuano frente a un tsunami. Analizar cómo sería la respuesta de la población frente al evento natural de modo tal de propiciar una herramienta de apoyo en la toma de decisiones. Para poder realizar esto, es necesario desarrollar una simulación de evacuación, lo que permitirá obtener conocimiento del sistema real para así generar propuestas de mejora, es decir medidas anticipadas para reducir daños y riesgos que puedan afectar a la población.

La ejecución de simulacros de emergencia representa un mecanismo para investigar el actuar de la población frente a estos eventos. De ellos se obtienen datos relevantes sobre tiempos, rutas de evacuación y zonas de seguridad (Pantoja y Moscoso, 2012). Si bien los simulacros tratan de asemejarse a la realidad, no abarcan de modo completo las situaciones que ocurrirían en circunstancias reales, como por ejemplo el tiempo de reacción y las distintas fases que conlleva asimilar el hecho ocurrido (Páez, Arroyo y Fernández, 1995). Este factor tiene repercusión directa en el tiempo de evacuación y el descontrol de la población.

Los simulacros si bien otorgan algunos datos importantes como observaciones de los evaluadores (letreros poco visibles, rutas de evacuación en mal estado, zonas de seguridad no delimitadas, etc.), la participación del público no siempre es la más adecuada y por ende desvirtúa la representación de la realidad. En consecuencia, es indispensable que un país como Chile que cada día está expuesto a múltiples amenazas naturales, se encuentre preparado para enfrentar tal emergencia con herramientas adecuadas y acorde a los avances internacionales (Staub y Bähr, 2014).

Para enfrentar este desafío se hace necesaria la creación de estrategias y planes de acción que permitan integrar a la sociedad, para poder disminuir los efectos que pueda causar un tsunami. Una técnica que permite enfrentar mencionado desafío, es la simulación de la evacuación de Talcahuano.

El proyecto propuesto aportará significativamente a determinar las variables que influyen en el comportamiento de las personas al momento en que son alertadas a evacuar, además a identificar mediante la simulación datos que permitan estimar de forma aproximada, como sería el desarrollo de una evacuación de tsunami en el sector Centro de Talcahuano bajo determinadas condiciones.

1.3 Objetivo general.

Generar un modelo de simulación de agentes para el análisis de la evacuación en habitantes de Talcahuano ante un tsunami.

1.4 Objetivos específicos.

- 1.- Analizar las variables que impactan en la evacuación de personas.
- 2.- Determinar los tiempos de evacuación según las variables analizadas.
- 3.- Implementar el modelo de simulación.

1.5 Delimitación de la propuesta.

El proyecto posee las siguientes delimitaciones:

Delimitación Geográfica: El proyecto centró su interés en la zona inundable de Talcahuano, es decir el sector centro.

Delimitación Demográfica: El proyecto evaluó las variables que impactan en la evacuación sólo de las personas que se localicen en el sector bajo estudio.

Delimitación Temporal: El proyecto fue realizado en 40 horas semanales durante 4 meses.

Delimitación Temática: El proyecto se basó en la técnica de simulación de agente utilizando la plataforma Netlogo.

1.6 Metodología.

La metodología utilizada está basada en el método propuesto por Guash (2005) citado por Medina, Medina y González (2010). A continuación, se describen los pasos desarrollados:

a) Formulación del problema.

El objetivo general del proyecto se basó en generar un modelo de simulación para la evacuación de habitantes de Talcahuano ante un tsunami. Hoy en Chile, las herramientas de gestión de desastres son muy ambiguas y no permiten anticipar riesgos y daños ante un evento de tal peligrosidad. Tampoco se tiene un conocimiento del comportamiento real de la ciudadanía frente a un fenómeno natural, y por ende se desconoce el tiempo que tardan en realizar una evacuación dependiendo de las variables que afectan a la población.

b) Diseño conceptual.

Segunda etapa en la cual se desarrolló un diagrama de flujo en donde se detallaron las fases del proceso de evacuación desde la alerta de tsunami hasta el punto en que los habitantes de Talcahuano se encuentran en zonas de seguridad.

c) Colección y tratamiento de los datos.

c.1) Identificar información requerida.

Mediante los objetivos específicos propuestos desde un comienzo, se debe tener claridad de cual información es necesaria para el presente informe y así descartar aquella que es irrelevante. Además, para realizar el modelo de simulación se requirieron datos como: tiempos de reacción frente a una alerta de tsunami, algunas características sociodemográficas, las variables que afectan a cierta parte de la población en un proceso de evacuación, las vías establecidas para evacuar la zona de estudio, entre otras.

c.2) Colección de información.

De los datos requeridos, se investigaron cuáles de ellos se encontraban disponibles en la bibliografía y cuáles de ellos se debían obtener por muestreo directamente en el sector de estudio.

Se realizó una encuesta, previamente validada, en el sector centro de Talcahuano. La estructura de la encuesta fue desarrollada para analizar las experiencias en evacuación de tsunami de los habitantes de esa zona y las lecciones aprendidas tras esos eventos. Un grupo de 8 personas, liderados en terreno por la profesora María Teresa Bull, tomó 344 encuestas durante 2 días.

c.3) Preparación de datos en Excel.

Los datos recolectados se introdujeron en una planilla Excel en donde fueron tabulados y preparados para su posterior análisis.

d) Construcción del modelo.

La construcción del modelo se dividió en la programación de la lógica y el diseño de la animación. La descripción de cada uno de los puntos se presenta a continuación.

d.1) Programación de la lógica del modelo.

La programación de la lógica del modelo se desarrolló en la plataforma Netlogo, que está escrito lenguaje Logo y se ejecuta en la máquina virtual de *Java*. Se realizaron sub modelos que representan el proceso de evacuación desde la alerta del tsunami hasta que los agentes llegan a las zonas de seguridad establecidas.

d.2) Diseño de la animación del modelo.

La animación de la lógica del modelo contempló el diseño de los agentes reaccionando frente a una alerta de tsunami en el sector céntrico de Talcahuano. Los aspectos destacados de la animación permitieron ver el desplazamiento de las personas a través de las rutas de evacuación hacia las zonas de seguridad.

e) Verificación.

Etapa que consistió en revisar que el modelo se comporte como el programador espera, mediante los parámetros establecidos previamente.

e.1) Reuniones con responsables del proceso.

Las reuniones se efectuaron para contraponer ideas con el objetivo de coincidir con la perspectiva del experto en: desastres naturales y evacuación de personas.

e.2) Animación y programación.

La animación es una herramienta de verificación tanto para el programador como para los responsables del proceso, ya que permitió visualizar que el comportamiento de los agentes sea el que represente de mejor forma al sistema real. Además, se observó en paralelo la programación para analizar la secuencia del proceso de evacuación y así corregir ciertos errores.

e.3) Reportes de simulación.

Los reportes de simulación fueron consultados constantemente y comparados con los datos muestreados para verificar la relación entre ambos.

f) Validación.

La validación se refiere a asegurarse que el modelo se comporte como el sistema real (Kelton, 2004) citado por Medina *et al.* (2010). En este punto se compararon los resultados obtenidos del modelo con los del sistema real (datos de la encuesta). Tras esto se concluyó que los resultados arrojados por el modelo de simulación eran aceptables.

g) Análisis y experimentación.

En este capítulo se propusieron dos escenarios y se analizaron los resultados obtenidos de la simulación. Finalmente, tras estudiar los resultados se propusieron mejoras del proceso.

1.7 Descripción de capítulos.

El presente informe desarrolla un “Modelo de simulación para la evacuación de Talcahuano. Aplicación en Tsunami”. A continuación se describen brevemente los capítulos del informe.

En el capítulo I se presenta la introducción y justificación del tema a desarrollar, junto con el objetivo general y los específicos. Además, se entrega la delimitación de la propuesta y la descripción de la metodología utilizada.

En el capítulo II se exponen los antecedentes de las amenazas naturales y gestión de emergencias en Chile. Además de evacuaciones de tsunami en Chile y los protocolos que se deben seguir. También se introduce el tema de simulación y todo lo que respecta con algunos trabajos destacados en el área de estudio.

En el capítulo III se realiza la caracterización y formulación del problema, pasos previos para desarrollar el diseño del modelo conceptual. Además, se presentan los datos colectados que servirán para la construcción del modelo.

En el capítulo IV se continúa con la metodología propuesta en donde se aborda la construcción del modelo, la verificación y validación del mismo.

En el capítulo V se presenta el análisis, la experimentación y los resultados que el modelo de simulación trae consigo.

Finalmente, el capítulo VI enseña las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPITULO II: Revisión bibliográfica.

2.1 Tsunami, desastre natural en Chile.

Chile es un país propenso a amenazas, en donde se encuentran casi todas las amenazas naturales que provocan desastres, a excepción de los huracanes y tornados que son típicos de las zonas tropicales (Espinoza, 1990).

Por una parte, existen desastres de origen natural: los terremotos, las erupciones volcánicas, los aludes, inundaciones, y por otra parte, desastres provocados por intervención humana como: los accidentes aéreos, los accidentes de carretera o naufragios, los accidentes industriales, los incendios, explosiones, entre los más destacados (Páez *et al.*, 1995).

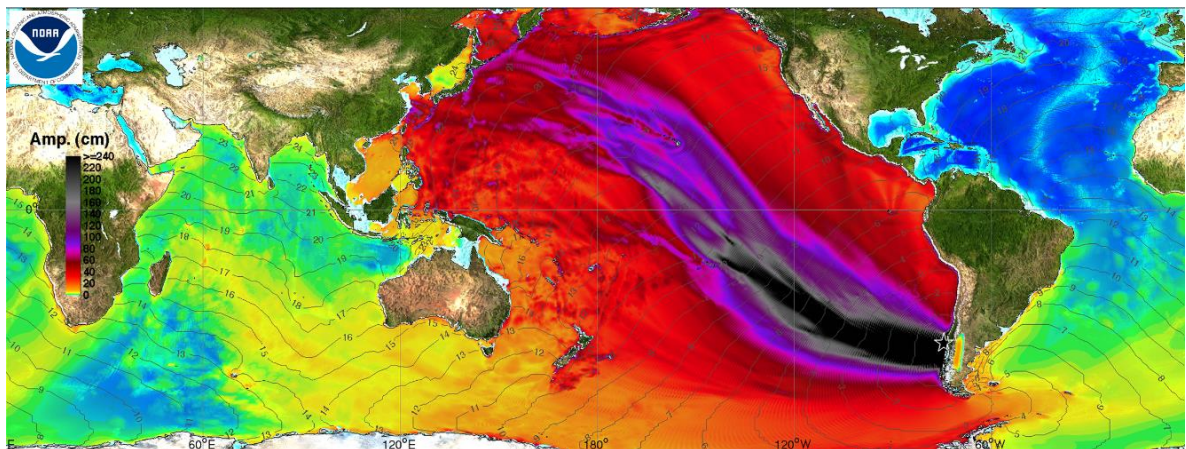
En este contexto, una de las amenazas naturales de mayor impacto son los tsunamis², los cuales son fenómenos naturales que se desarrollan en el océano y afectan las zonas costeras mediante diferentes manifestaciones, tales como: inundación, modificaciones geomorfológicas de la costa y del lecho marino (Cardona, Toro, Vélez y Otero, 2005). El SHOA (2014) define tsunami como “un fenómeno físico que se origina por sismos que ocurren bajo o cerca del fondo oceánico, remociones en masa, derrumbes submarinos y erupciones volcánicas y se manifiesta en la costa como una gran masa de agua que puede inundar y causar destrucción en las zonas costeras”. Los tsunamis provocados por sismos cercanos a la costa, pueden arribar en pocos minutos y sus efectos continuar por varias horas después de ocurrido el sismo (National Disaster Education Coalition, 2004). Por otra parte, también existen tsunamis causados por terremotos originados a más de 1.000 kilómetros de distancia y pueden hacerse presente en las costas horas después (SHOA, 2014).

² Literalmente significa, tsu: puerto y nami: ola. Corresponde a una palabra japonesa para designar las olas que llegan a los puertos y playas. En 1963 comenzó a utilizarse esta palabra universalmente (Campos, 2006).

Según Campos (2006) los tsunamis se deben, en su mayor parte, a sismos con epicentros localizados en fosas oceánicas cercanas a la costa, donde las placas de la litosfera chocan frontalmente de modo que una de ellas es empujada bajo la otra originando una superposición de placas y denominadas zonas de subducción. Este fenómeno se da con mayor frecuencia en Alaska, Japón y en las costas de Chile y Perú en el Océano Pacífico, en donde se contabilizan el 80% de la totalidad de tsunamis registrados en el mundo.

Este fenómeno presenta una gran ocurrencia en el país. Desde el año 1500 a la fecha se han identificado al menos 70 tsunamis en las costas chilenas (SHOA, 2014). Entre los terremotos que ocasionaron los mayores tsunamis en la historia chilena y mundial, se encuentran el terremoto de Valdivia en 1960 con una magnitud de 9,5 Mw, Cobquecura en 2010 con una magnitud de 8,8 Mw y Coquimbo en el año 2015 con una magnitud de 8,4 Mw (Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile, 2015). En la figura 1 se puede observar las máximas amplitudes de onda causadas por el terremoto de Valdivia, considerado por los expertos como un megaterremoto.

Figura 1: Propagación de ondas del terremoto de 1960.



Fuente: http://nctr.pmel.noaa.gov/chile20100227/T1960_1-annotated.png

La figura 1 muestra la amplitud de las ondas generadas por el terremoto. Denotadas con negro se encuentran aquellas que sobrepasaron los 2,4 metros

(240 centímetros) de altura, de color gris las que alcanzaron los 2 metros de altura, de color morado las ondas que bordearon una altura de 1,4 metros, hasta llegar al color verde en donde se registraron alteraciones mínimas en el océano. Las ondas de 2,4 metros de altura, registradas en mar abierto, alcanzaron una altura aproximada de 15 metros al llegar al borde costero.

2.2 Gestión de emergencias en Chile.

La continua amenaza de tsunami sobre las costas del territorio nacional, se sustenta por la localización geográfica de Chile frente a una zona de subducción cortical, proceso que involucra la generación de sismos (Lagos, 2000). Por ende Chile, un país con una larga extensión costera y con una gran cantidad de habitantes en estas zonas, debe encontrarse preparado para enfrentar ésta amenaza natural, instaurando directrices que garanticen la seguridad de cada ciudadano. Para esto, es necesario una planificación estructurada en situaciones de riesgo, otorgando la facultad a los organismos pertinentes para que informen oportunamente a la ciudadanía las acciones que deben seguir. La respuesta frente a estas situaciones debe ser rápida, clara y oportuna, con el fin de prevenir o disminuir el número de víctimas fatales en el proceso de evacuación.

La gestión de la emergencia debe ser un proceso planificado, estipulado, participativo e integral de reducción de las acciones de riesgo de desastres (Chuquisengo y Gamarra, 2001). Por ello es necesario establecer canales eficientes de comunicación entre los investigadores, las autoridades competentes, los técnicos dedicados a la determinación del riesgo y los vecinos afectados por los mismos, de tal modo que las propuestas de todos los sectores sean consensuadas e incorporadas en la planificación para un desarrollo local sostenible (Ferradas, 2004).

Actualmente, las políticas nacionales dan principal énfasis a las actividades de respuestas a emergencias como se puede observar en el artículo

“Recomendaciones para la preparación y respuesta ante tsunami” emitido por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) en el 2014. El Banco Interamericano de Desarrollo (2005) señala que el énfasis a las actividades de respuestas se debe a diversas razones enumeradas a continuación:

- “Limitaciones en el conocimiento técnico-científico que permita la gestación de soluciones social y financieramente eficientes para la reducción del riesgo”.
- “Problemas de información que dificultan el consenso en el quehacer”.
- “La tradición de la visibilidad política y publica mayor de la respuesta a desastres que de su prevención”.
- “Las estructuras institucionales que han enfatizado la respuesta”.
- “El tema del riesgo no ha sido incluido dentro de las políticas de gestión ambiental”.
- “La posibilidad de obtener recursos y ayuda post-desastre para la reconstrucción, provenientes de fuentes externas, ha actuado como un desincentivo para la inversión en la reducción del riesgo”.

Tras el paso del tiempo y con el objetivo de contrarrestar el efecto de las amenazas naturales, puntualmente los causados por tsunamis, se han creado instituciones u organismos que tienen por finalidad informar a la población sobre una eventual catástrofe (Lagos, 2000). Entre estos se encuentran los indicados en la figura 2.

Figura 2: Tipos de mandos en Chile.



Fuente: Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (2001) citado por Montenegro y Peña (2010).

En aquel marco, se establece que el único organismo técnico encargado de entregar información acerca de un posible tsunami en el borde costero nacional es el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), institución que tiene la obligación, después de confirmada la emergencia con el International Tsunami Information Center (ITIC), de informar a la ONEMI del peligro real que representa este evento en las costas del país, el cual dará información a los diversos mandos de coordinación para la activación de los planes de contingencia y alerta a la población (SHOA, 2014).

Montenegro *et al.* (2010) señala que “en Chile, la gestión de la emergencia en caso de desastres se inicia con la activación de un mando conjunto a través del cual se adoptan las decisiones para que cada una de las autoridades cumpla con su rol, los diversos actores son divididos de acuerdo a la función estipulada en el plan de contingencia y respuesta”.

2.3 Evacuación en Chile.

Los tsunamis, conocidos fenómenos naturales en Chile, presentan signos que anticipan su impacto en las costas. Estos están determinados cuando se está en presencia de un sismo que dificulta a la persona mantenerse en pie, así como también cuando el sismo posee una duración mayor o igual a 30 segundos (SHOA, 2014).

Todo lugar en la costa que se encuentre bajo la línea de seguridad, ubicada aproximadamente 30 metros sobre el nivel del mar, es considerado zona de peligro de tsunami (SHOA, 2014).

Tras el terremoto del 27 de febrero del 2010, en Chile se han realizado diversos simulacros y entre los últimos se encuentran los de la Región de Valparaíso, del

Bio Bío, de Tarapacá, Provincia de Cauquenes, Arica, Parinacota y Tacna (ONEMI, 2015).

En Chile se recomienda realizar las evacuaciones preferentemente caminando. En zonas urbanas o densamente pobladas, cualquier medio de transporte no es recomendable debido a que puede generar accidentes, congestionar las vías y entorpecer la evacuación general. Sin embargo, si una zona de seguridad ante tsunami está alejada varios kilómetros se aconseja consultar en el municipio respectivo a cerca del Plan de Evacuación y la existencia de vías especialmente habilitadas para vehículos (SHOA, 2014).

Existen dos tipos de evacuaciones, la vertical y horizontal. En la primera se puede evaluar la posibilidad de ser llevada a cabo en edificios que posean más de 8 pisos, realizando la evacuación hacia los pisos superiores (SHOA, 2014). El tiempo en estos casos se convierte en la principal variable y se busca evacuar a la población a las zonas o edificios de seguridad antes que arribe el tren de ondas. Este proceso se define como evacuación vertical (FEMA, 2009). La evacuación horizontal es aquella que es realizada comúnmente, en donde las personas se desplazan hacia las zonas de seguridad. Estas zonas son lugares que se encuentran fuera del área de riesgo de inundación y deben ser espacios físicos amplios, que permitan recibir a toda la población evacuada.

En las vías de evacuación de sectores urbanos, de alta densidad de habitantes, no deben circular por ningún motivo vehículos. En tiempos de normalidad es recomendable que estas calles tengan flujo permanente en dirección a las zonas de seguridad y no hacía la línea de la costa (SHOA, 2014).

2.4 Variables que afectan la decisión de evacuación.

Para comprender en detalle el proceso de evacuación en Talcahuano, es necesario investigar las variables que hacen que la población tarde en evacuar o simplemente desista de hacerlo.

Dash y Gladwin (2007) señalan que la población toma la decisión de evacuar, independientemente de una alerta, según la percepción que tengan del riesgo, si no lo perciben abortan el proceso. Se entiende que el riesgo corresponde a “la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Tales como muertes, lesiones, propiedad, medios de vida, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental, como resultado de interacciones entre las amenazas naturales o antropogénicas³ y las condiciones de vulnerabilidad” (FAO, 2009).

Siegrist y Heins (2006) citado por Montenegro *et al.* (2010) señalan que la percepción del riesgo es mayor en personas que ya han vivido experiencias directas con amenazas naturales, en cambio aquellos sujetos que nunca han estado expuestas a tales eventos perciben menor riesgo. Si se habla de experiencias previas al terremoto y tsunami del 2010, hay que remontarse al año 1960 en donde la provincia de Llanquihue fue el epicentro de un terremoto de magnitud 9,5 Mw, lo que provocó un tsunami que se hizo presente en el borde costero de Chile, Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda, entre otros.

En Chile el tsunami de 1960 se presentó con mayor violencia desde Talcahuano por el norte hasta Puerto Aguirre por el sur e Isla de Pascua por el oeste. En la zona costera de Talcahuano se registraron ondas de altura mayor a tres metros (Sievers, 2000).

Considerando lo anterior, y trasladándose al terremoto y tsunami del 2010, Cisternas (2011) señala que los habitantes de mayor edad que habían vivido la experiencia del tsunami de 1960 sabían que tenían sólo minutos para tomar resguardo en las zonas altas y por ende no esperaron por una comunicación oficial, que por lo demás nunca llegó. Por lo tanto, gracias a esta acción, se evitó que la cifra de fallecidos fuera mayor considerando la extensión de la costa afectada por el tsunami.

³ Término que se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas.

Por otra parte, Gladwin y Peacock (1997) citado por Dash y Gladwin (2007) indican que los hogares deben recibir una alerta que contenga información precisa para así procesarla más rápidamente y tomar la decisión de evacuar en un menor tiempo. Siguiendo en la misma línea, Cisternas (2011) indica que los mensajes de alerta de tsunami deberían transmitir información muy simple, y en vez de dar detalles de las amplitudes de las ondas, el mensaje debería acotarse y decir si se esperan inundaciones y si la gente debe evacuar o no, al tiempo de insistir que la población debe mantenerse distante de la costa al menos durante 6 horas, debido a que los tiempos de llegada son variables y a menudo las personas se generan una falsa sensación de seguridad cuando pasa una o dos horas sin ondas notorias. Este hecho también se observó en el terremoto del 2011 en Japón, en donde algunos habitantes de Rikuzentakata⁴ no evacuaron al no observar ondas de gran altura (Shibayama *et al.*, 2012).

Finalmente, otra variable que afecta en el proceso de evacuación es el temor a robos. Paul (2014) señala que uno de los factores más importante que impide el cumplimiento de evacuar, es el temor de la población a que roben sus pertenencias al quedar su hogar desprotegido. Además, en el contexto de un seminario realizado por la ONEMI de Tarapacá: “Evacuación de Tsunami” que tenía como objetivo dar a conocer información sobre el estudio realizado por SATREPS-Chile-Japón, referente a las evacuaciones que se realizaron a partir del terremoto y tsunami del 1 y 2 de Abril del 2014 en la ciudad de Iquique⁵, Taro Arikawa, investigador del PARI (Port and Airport Research Institute) señala lo siguiente: “hemos realizado encuestas referente a la forma de evacuación de la comunidad y el 80% logró estar a salvo antes de los 10 minutos de ocurrido el terremoto, pero un porcentaje significativo no evacuó pensando en que no llegaría un tsunami en la ciudad y por otra parte, la gente tenía temor en dejar sus viviendas por miedo a que robaran sus pertenencias” (ONEMI, 2015).

⁴ Ciudad situada en la prefectura de Iwate, Japón.

⁵ El terremoto tuvo una magnitud de 8,2 Mw y una duración de tres minutos.

Este último hecho depende directamente de las cifras de delincuencia que existe en esa zona, en donde los delitos contra la propiedad en el año 2014 fueron de 2.324⁶ (INE, 2014). Por otra parte, en estudios realizados por Castillo *et al.* (2013) señalan que en el proceso de evacuación de Tirúa, en el año 2010, nadie se preocupó de salvar sus pertenencias; este hecho se entiende debido a que las cifras de delincuencia son bajas, en el año 2014 sólo se registraron 24 delitos⁷ contra la propiedad que en su mayoría se deben al conflicto mapuche.

2.5 Simulación.

En la actualidad la Ingeniería busca resolver problemas mediante procedimientos más adecuados y que optimicen los recursos disponibles, como tiempo y costos, en relación a todas las alternativas posibles. Se debe considerar el estado del arte, este permite comparar si lo que se va a realizar tiene un beneficio superior a lo realizado anteriormente.

Kelton y Law (2000), considerados los padres de la simulación, aseguran que esta técnica se basa en una evaluación numérica del modelo a través de un computador, durante un periodo determinado de tiempo, tomando medidas y experiencias durante este tiempo para hacer posible la descripción de su comportamiento. Lo anterior permite plantear suposiciones del sistema bajo estudio en cualquiera de sus etapas, para así evaluar distintos escenarios, encontrar respuestas a preguntas como “qué pasará si” (*What-if questions*) y así entender o mejorar el sistema.

Para Naylor (1977) citado por Bu (1996) la simulación “es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo”.

⁶ Cifra que afectó al 1,25% de la población de Iquique.

⁷ Cifra que afectó al 0,22% de la población de Tirúa.

Más específicamente, Maisel y Gnugnoli (1972) citado por Bu (1996) definen simulación como “una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo”.

En conclusión, la simulación representa una técnica mediante la cual se puede realizar un estudio del comportamiento de un sistema en particular, a través de la experimentación con el modelo del determinado sistema y la implementación de este modelo en algún lenguaje de simulación mediante el uso de una computadora, con el fin de generar resultados artificiales con los cuales tomar decisiones que conlleven realizar o no modificaciones en el sistema.

2.6 Simulación de evacuaciones.

La simulación del movimiento de personas representa un gran reto para la modelación matemática por su gran complejidad. En este punto se deben considerar aspectos como las influencias psicológicas que mueven a las personas. “Ante situaciones imprevistas, la colectividad entera se moviliza, apareciendo en los primeros momentos conductas de pánicos caracterizados por el miedo, las limitaciones de las vías de evacuación, que inducen a la huida del lugar de manera desorganizada” (Páez *et al.*, 1995).

Según Janoff-Bullman (1992) citado por Páez *et al.* (1995) “las catástrofes producen una serie de efectos psicológicos traumáticos que se definen por su carácter negativo, extremo, inusual y porque se asocian a amenazas a la vida de las personas”. Las situaciones calificadas como traumáticas de origen humano o natural y que pueden afectar a colectividades son: inundaciones, explosión, galernas, temblor de tierra, descarrilamiento, incendio, accidente aéreo, entre otras, y generan síntomas de ansiedad y depresiones, además de un conjunto

específico de síntomas que caracterizan el llamado Síndrome de Estrés Post-Traumático (Páez *et al.*, 1995).

Como se detalla con anterioridad, los diversos factores psicológicos de las personas pueden resultar muy complejos para desarrollar la simulación, es por esto que surge la necesidad de buscar nuevas alternativas que permitan representar de la mejor manera posible el comportamiento humano.

Existen diversas simulaciones de evacuación, de las cuales se pueden destacar las siguientes:

Modelado y simulación computacional de evacuación en edificios singulares:

Capote *et al.* analizan el proceso de la evacuación de los sitios comunes de una estación de ferrocarriles de pasajeros, compuesto por tres niveles: planta alta, planta baja y el estacionamiento subterráneo, mediante el modelo de simulación STEPS⁸ de evacuación. Se evaluaron 6 tipos de escenario en donde los resultados obtenidos permitieron determinar el impacto de las diferentes condiciones de la edificación y de las características físicas y conductuales de los ocupantes en el cálculo del proceso de la evacuación y su incidencia en los tiempos requeridos por los ocupantes para acceder a un espacio seguro ante una situación de emergencia.

Simulación del movimiento de personas. Aplicación a la evacuación de buques:

La simulación del movimiento de personas es una técnica compleja, no solo por su modelamiento matemático, sino también por las influencias psicológicas que deben formalizarse en el modelo. Una de las aplicaciones de estos modelos es su uso en la evacuación de buques. Las características del movimiento fueron implementadas en una aplicación informática Sifbup-S, utilizando como lenguaje

⁸ STEPS (Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian movements), es un modelo de simulación computacional que tiene como propósito simular a personas en una situación normal o de emergencia dentro de diferentes tipos de edificios.

de programación Visual-Basic. Posterior a ello mediante la aplicación Sifbup-3D se produce la simulación en 3D (Pérez *et al.*, 2005).

Simulación de emergencia en entornos 3D:

El objetivo del proyecto fue la representación de las simulaciones de evacuación en situaciones de emergencia en un entorno tridimensional. Específicamente, simula incendios en el edificio de la Facultad Informática de la Universidad Complutense de Madrid. En este trabajo se simula el fuego mediante una aplicación llamada CFAST, además tiene como objetivo mostrar una simulación de una evacuación en caso de incendio en un entorno 3D realista basándose en los ficheros del sistema multiagente [NuGo11]⁹ (Martínez Del Camino, 2012).

Modelación de rutas de evacuación ante amenaza de tsunamis basado en algoritmos ACO:

La tesis desarrolla y valida un modelo de simulación para rutas de evacuación de tsunamis. Dicho modelo es parte de la familia de algoritmos de optimización discreta ACO (*Ant Colony Optimization*). Estos algoritmos están inspirados en la capacidad que poseen las hormigas, gracias a las feromonas, para establecer el camino más corto desde su nido hasta la fuente de alimento y viceversa. Los resultados obtenidos demostraron que el actuar de la ciudadanía en una evacuación, generalmente no coincide con los estándares de seguridad establecidos para este tipo de eventos, aumentando los tiempos de evacuación, factor fundamental en estas situaciones. Por lo tanto, el algoritmo ACO desarrollado no solo toma en cuenta las rutas más cortas, sino que también las características físicas del terreno, otorgándole a la población rutas que privilegiaron el tiempo y la seguridad al momento de evacuar (Pantoja *et al.*, 2012).

⁹ NuGo11 corresponde a una aplicación para simular el actuar de tres tipos de personas, según su carácter, en la evacuación de un edificio. Cuenta con personas líderes; otros individuos dependientes que siguen las órdenes de los líderes; e individuos independientes que siguen sus propios impulsos para encontrar la salida.

Modelado y simulación mediante sistemas multiagente de la evacuación de personas de edificaciones de varios pisos en presencia de obstáculos:

Molina (2010) muestra el desarrollo de un modelo multiagente que simula un proceso de evacuación de personas en presencia de obstáculos como mesas, puertas cerradas, paredes y paredes caídas. La forma del movimiento y la conexión entre los distintos pisos del edificio fue modelada, en donde se consideraron variados aspectos importantes como: la creación de ambientes, la generación de situaciones de emergencia, la determinación de las variables que caracterizan a los agentes del sistema, así como también el estudio de plataformas que permiten desarrollarlo. Se estudiaron 4 escenarios de prueba con los cuales se determina, en primer lugar, que la metodología de sistemas multiagente está muy bien orientada al modelado y simulación de la evacuación de edificaciones y, en segundo lugar, que en el ejemplo de aplicación los resultados del estudio muestran que los tiempos mínimos de evacuación en un edificio de tales dimensiones y características no puede ser menor a cinco minutos. Para la implementación del modelo fue utilizada como plataforma de desarrollo Galatea y su librería gSpaces¹⁰.

Morfología urbana como herramienta para apoyar la rápida capacidad de recuperación frente a un tsunami: estudio del caso de Talcahuano:

En el trabajo desarrollado por León y March (2014) se da hincapié a la importancia que tiene la morfología urbana frente a una evacuación en Talcahuano, lo cual quiere decir que a medida que se modifique el diseño urbano tanto topológica (cambios en la configuración de las calles, ampliaciones o extensiones) como cuantitativamente (obras adicionales como iluminación con energía solar, veredas inclusivas, materiales antideslizantes, entre otras), la evacuación de un tsunami puede desarrollarse en un menor tiempo tanto de día como de noche, en comparación con el escenario actual.

¹⁰ Es una librería que permite desarrollar modelos que simulan, entre otras cosas, el desalojo de espacios arquitectónicos o urbanos.

2.7 Simulación basada en agentes.

En las últimas dos décadas la simulación basada en agentes¹¹ ha cobrado suma importancia. Esta herramienta, cada vez más utilizada, representa un mecanismo para el estudio de sistemas complejos en distintos ámbitos de las ciencias sociales y como apoyo para la toma de decisiones. Los individuos o entidades de los sistemas sociales pueden ser representados por agentes autónomos que se relacionan entre sí en un determinado entorno.

Medina (2011) indica que la simulación basada en agentes es un nuevo método de investigación que posibilita tratar de modo sencillo factores como la complejidad, la emergencia y la no-linealidad típica de diversos fenómenos sociales. Mediante esta herramienta se puede reconocer claramente que los sistemas complejos, y en específico los sociales, son resultado de comportamientos individuales y de sus interacciones (Izquierdo *et al.*, 2008).

Los sistemas basados en agentes se caracterizan por comprender muchos agentes, los cuales reúnen las características de ser autónomos, heterogéneos y que por lo general son capaces de interactuar entre sí y con su entorno tal como lo señala Torsun (1995) citado por Izquierdo (2008). Es por lo anterior que este método es adecuado para representar el actuar de una población, comunidad o conjunto de personas frente a una situación determinada.

2.7.1 Plataformas orientadas a la simulación de agentes.

Las plataformas permiten el diseño, la implementación y la ejecución de los agentes, así como la organización de estos. A continuación, se detallan las principales plataformas utilizadas en la actualidad en los distintos campos de la investigación.

¹¹Wooldridge y Jennings (1995) citado por Molina (2010) señalan que es un sistema situado en un determinado entorno, capaz de actuar de forma autónoma y razonada en dicho entorno. Según Weiss (1999) citado por Molina (2010) es un sistema computacional con la capacidad de tomar acciones autónomas en un medio, para así cumplir sus objetivos.

- a) JACK: Provee de un entorno de desarrollo orientado a agentes construido sobre *java* y completamente integrado en este lenguaje de programación. Esta plataforma utiliza una arquitectura base denominada BDI¹², la cual soporta cualquier tipo de agentes. También incluye las componentes de desarrollo de *java* y extensiones para implementar el comportamiento de agentes (Marchetti y García, 2003).

- b) MADKit: Al igual que JACK soporta cualquier tipo de agentes y varios lenguajes para la implementación de estos como: *java*, *jess*, *Scheme*, *BeanShell* y *python*. Es una plataforma multiagente para desarrollar y ejecutar aplicaciones fundadas en un prototipo orientado a la organización. Permite a sus usuarios implementar sus propias arquitecturas por no estar asociada, en específico, a ninguna (Marchetti *et al.*, 2003).

- c) ZEUS: Es una herramienta y metodología que permite construir aplicaciones multiagente soportados por un entorno visual para capturar las especificaciones de los agentes. Su uso no es trivial y presenta diversas posibilidades de desarrollo para personas con alto conocimiento en agentes. Posee arquitectura base BDI y su lenguaje de implementación de agentes es *java* (Marchetti *et al.*, 2003; Sanz, 2003).

- d) JADE (*Java Agent Development Framework*): Es una plataforma que da solución parcial al modelado de comportamiento y coordinación de agentes. Esta puede ser distribuida en varias máquinas (las cuales no necesitan compartir el mismo sistema operativo), y proporciona servicios básicos como: gestión de agentes, librerías de algoritmos, localización de agentes o movilidad. Soporta cualquier tipo de agentes, los cuales son implementados utilizando el lenguaje *java* (Marchetti *et al.*, 2003).

¹² Beliefs-Desire-Intention: tipo de agente racional cuyo comportamiento es dirigido por creencias, deseos e intenciones.

- e) NETLOGO: Herramienta que facilita la construcción de sistemas multiagente (SMA) con un elevado número de agentes y todos pueden estar en ejecución al mismo tiempo. Esta plataforma posee un fácil uso, con un lenguaje de programación muy sencillo, aunque menos potente que Repast o Mason. Incluye una recopilación de modelos de ejemplo muy amplia para experimentación y aprendizaje (Miguel y Hassan, 2012).

- f) JAFMAS (*Java Framework for Multi-agent Systems*): Provee una metodología genérica para desarrollar SMA asentados en los actos del habla junto con un grupo de clases para apoyar la implementación de estos agentes en *java*. El *framework*¹³ tiene la intención de asistir a desarrolladores principiantes y expertos a constituir sus ideas en aplicaciones de agentes concretas (Marchetti *et al.*, 2003).

- g) MIMOSA: Plataforma de modelado conceptual y realización de simulaciones, en la que se construyen modelos usando la ontología¹⁴ (categorías, atributos y relaciones). Permite programación en *java*, *Scheme*, *jess*, *python*, *prolog* y *Smalltalk* (Miguel *et al.*, 2012)

- h) IODA PROJECT: Su enfoque no se basa en los agentes sino más bien en sus interacciones. El modelado se basa en la especificación visual de las interacciones del sistema, creándose de forma automática los agentes y el código que programación que modela las reglas (Miguel *et al.*, 2012).

¹³ Estructura software compuesta de componentes personalizables e intercambiables para el desarrollo de una aplicación.

¹⁴ Significa “el estudio del ser”. Es una parte o rama de la filosofía que estudia la naturaleza del ser, la existencia, y la realidad, tratando de determinar las categorías fundamentales y las relaciones del “ser en cuanto ser”.

- i) MODELLING4ALL: Es una herramienta de meta-modelado basada en tecnologías libres Web 2.0. No necesita instalación en el computador, ya que se ejecuta en su página web. Está orientada a no programadores, permitiendo la construcción del modelo mediante módulos prefabricados, teniendo como resultado un modelo en lenguaje Netlogo, pero sin necesidad de programar (Miguel *et al.*, 2012).

- j) REPAST SIMPHONY: Es una herramienta que permite el modelado y simulación de agentes, posee un código abierto y la opción de adaptarse a archivos CAD lo que permite que los agentes puedan desplazarse en espacios que tengan las características de la zona de estudio. Esta plataforma incluye funciones avanzadas para el almacenamiento del agente, su visualización y la activación del comportamiento. Permite la programación en *java* y *python* (North, Howe, Collier y Vos, 2005).

2.8 Simulaciones de tsunami.

Adicionalmente es de suma importancia investigar simulaciones de tsunamis y sus derivados, ya que tiene repercusión directa con el trabajo que se realiza. Entre estas simulaciones se destacan las siguientes:

2.8.1 Simulación del tsunami de 1960 en un estuario del centro-sur de Chile:

Se modela el tsunami de 1960 en un estuario del centro-sur de Chile, específicamente en el río Maullín, X Región. Para modelar el proceso de generación, propagación e inundación de tsunami fue utilizado la metodología de simulación numérica basada en el modelo no lineal denominado TSUNAMI-N2¹⁵. Los resultados de la simulación del tsunami fueron validados con antecedentes y evidencias existentes del evento real (Lagos y Gutiérrez, 2005).

¹⁵ Modelo creado por la Universidad de Tohoku, Japón, como parte del proyecto TIME (Tsunami Inundation Modeling Exchange).

2.8.2 Modelación de tsunamis en la costa pacífica colombiana. Caso Bahía de Tumaco:

Cardona *et al.* (2005) presenta una metodología y aplica un modelo matemático para la simulación de ondas de tsunami que tiene por escenario la Bahía de Tumaco, Colombia. Se evalúan distintos puntos en donde se genera el terremoto, con distintas magnitudes de momento, y luego se obtienen datos de importancia, como por ejemplo tiempo de arribo de las ondas, amplitud de ondas, entre otros.

2.8.3 Análisis de la propagación de tsunami en zonas costeras:

Artículo en el cual se analiza el comportamiento de tsunamis en zonas costeras de Chile y mejora la comprensión de las principales variables que afectan tanto la propagación de tsunamis como la inundación. Mediante el estudio de tsunamis pasados que se propagaron a la Región del Biobío, se realizaron simulaciones numéricas utilizando el código NEOWAVE. También se incluyen análisis de la variación de la superficie libre y de las alturas máximas de inundación en la Bahía de Concepción y en el Golfo de Arauco. Además, este estudio construyó el primer modelo de pronóstico de inundación por tsunami en Talcahuano usando eventos pre-modelados. El modelo utiliza la magnitud del terremoto, la profundidad focal y el nivel de marea para determinar la máxima inundación en Talcahuano (Aránguiz, 2014).

CAPITULO III: Diseño del modelo conceptual.

3.1 Área de estudio.

Tal como se indicó, el modelo de simulación representará el comportamiento que tienen los habitantes de Talcahuano en un proceso de evacuación de tsunami. Esta comuna, perteneciente a la Provincia de Concepción, limita al sur con Hualpén, al sudeste con Concepción y Penco, y al noreste con el Océano Pacífico como se observa en la figura 3.

Figura 3: Mapa de Talcahuano.



Fuente: Google Maps.

En Talcahuano existen seis sectores, los cuales son: Medio Camino, Las Salinas, Higueras, Tumbes, Los Cerros y El Centro. Este último corresponde a la zona de estudio y es caracterizado a continuación.

3.1.1 Sector El Centro.

Este territorio es el de mayor importancia para Talcahuano por albergar los principales sectores productivos y de servicios como: el mercado, terminal de buses y trenes, compañías de bomberos, la municipalidad, entre otros. Además, en este sector se encuentra el puerto comercial, la aduana, la Base Naval y las caletas de pescadores El Morro y El Infiernillo.

El sector cuenta con una población que supera las 28.000 personas y se compone de las siguientes áreas: Cerro David Fuentes, Remodelación Simons, San Vicente, Libertad, Gaete, entre otras.

En el año 2012 el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo citado por Pozo (2014), indica que en todos los sectores de Talcahuano hay falta de conocimiento y equipamiento para enfrentar fenómenos naturales por parte de la población y, por otra parte, una falta de coordinación y conocimiento de gobiernos locales, regionales y nacionales para enfrentar dichos fenómenos.

El sector ha sido afectado continuamente por fenómenos naturales y al tener una bahía de gran amplitud por lo general alberga la llegada de tsunamis. En la tabla 1 se presentan los últimos registros de este fenómeno en la zona estudiada.

Tabla 1: Registros de tsunamis en la bahía de Concepción.

Fecha	Características	Descripción
20 de febrero, 1835	Epicentro: latitud 36,8° S; longitud 73,0° W	La ciudad de Concepción fue impactada por un gran terremoto que generó un tsunami. Se registraron víctimas fatales en la mencionada ciudad, así como también en Talcahuano, Chillán, Cauquenes, Constitución y Talca. El tsunami se inició con una gran retirada del mar, que dejó seca la bahía de Talcahuano 30 minutos después de haber ocurrido el terremoto. Las primeras ondas alcanzaron alturas mayores a los 9 metros sobre el nivel del mar, inundando completamente a Talcahuano.
	Magnitud estimada: 8-8,2 Richter	
22 de mayo, 1960	Epicentro: latitud 38,5° S; longitud 74,5° W	A las 15:10 horas comenzó el terremoto de Valdivia, causando graves daños en las provincias comprendidas entre Concepción y Chiloé. El tsunami generado se propagó por toda la cuenca del océano pacífico.
	Magnitud calculada: 9,5 Richter	
27 de febrero, 2010	Epicentro: 35°54'32"S 72°43'59"O	El terremoto se originó a las 3:34 am, y provocó un gran tsunami. Talcahuano fue azotado por ondas de 3 hasta 5 metros de altura, ocasionando la muerte de personas y graves daños de infraestructura.
	Magnitud: 8,8 Mw	

Fuente: SHOA, (2005); León *et al.*, (2014).

La bahía de Concepción también fue afectada por tsunamis de origen cercano los años 1570, 1657 y 1751. Tras este último evento, el consejo de Concepción decidió mudarse de su ubicación en la costa, lo que significó la primera medida de mitigación en torno al fenómeno natural (Aránguiz *et al.*, 2011). Por otra parte, la bahía también ha sido afectada por tsunamis de origen lejano. Los registros corresponden a los años 1730 tras el terremoto de Valparaíso, 1868 luego del

terremoto al sur de Perú, en 1877 ocurrido un terremoto en el norte de Chile, y finalmente en 2011 luego del evento en Japón (Aránguiz *et al.*, 2014).

Actualmente, Talcahuano posee una carta de inundación como se aprecia en la figura 26 (ir a anexo A). Esta carta fue elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) a partir de datos históricos. La información entregada es de gran ayuda para la población, ya que permite saber qué sectores serán alcanzados por un tsunami con mayor probabilidad.

Focalizando el interés en el último gran tsunami registrado en Talcahuano se pueden describir variados datos recopilados de la charla: “Resultados de la investigación sobre la evacuación urbana en las ciudades de Talcahuano y Dichato durante el tsunami del 2010, proyecto SATREP/JICA. Lecciones y aprendizajes”, realizada en la Universidad de Concepción por el arquitecto Leonel Ramos Santibáñez (ver figura 27, anexo A).

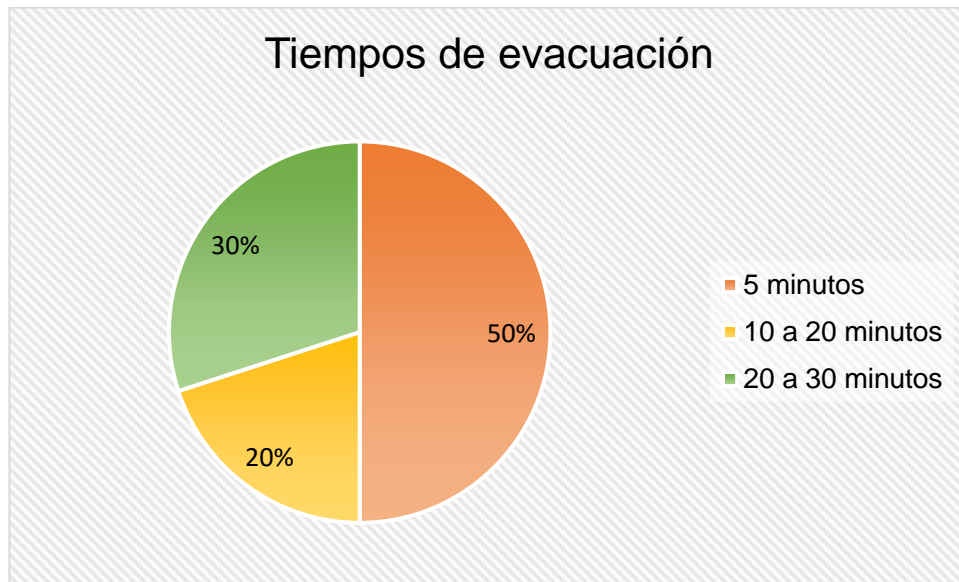
El profesional que actualmente se desempeña como docente y jefe de carrera de arquitectura en mencionada casa de estudios, dio principal énfasis en su investigación a 3 sectores de Talcahuano: El Centro, El Morro y Las Salinas, obteniéndose la siguiente información a base de encuestas.

Uno de los primeros tópicos de importancia era saber cómo los habitantes de las zonas indicadas se habían enterado de la alerta de tsunami tras los múltiples errores técnicos y administrativos entre el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) y los organismos asociados, SHOA y ONEMI, los que no lograron advertir de forma oportuna a la ciudadanía, tal como lo indican Carvajal y Soler (2012), Cavallo (2013), Ramírez y Aliaga (2012), Romero *et al.* (2010) citado por León *et al.* (2014). Por ende, y tal como lo indica la encuesta, la mayoría de la población se enteró del tsunami mediante avisos de familiares y vecinos.

Después de ocurrido el terremoto, y al no existir una alarma oficial de tsunami, los tiempos de evacuación dependieron en gran medida por las alertas de personas cercanas y de la percepción de riesgo. Estos tiempos se pueden apreciar en la

figura 4. El gráfico indica que el 50% de los habitantes de Talcahuano evacuó inmediatamente después de ocurrido el terremoto, con 5 minutos de tardanza aproximadamente. El 20% de la población realizó la evacuación luego de 10 a 20 minutos tras haber finalizado el terremoto, y el 30% restante evacuó después de 20 a 30 minutos.

Figura 4: Tiempos de evacuación en Talcahuano.



Tras salir de sus viviendas, los habitantes de los sectores mencionados (El Centro, El Morro y Las Salinas) tuvieron que recorrer distancias considerables rumbo a zonas seguras tras la amenaza de tsunami, dicha información se puede observar en la figura 5. Esta muestra que la mitad de la población recorrió en promedio 500 metros en el proceso de evacuación. Un 20% de los habitantes de Talcahuano hizo un recorrido entre 500 y 1000 metros. Otro 20% llegó a una zona segura tras haberse desplazado entre 1000 y 2000 metros. Por último, el porcentaje restante recorrió entre 2000 y 5000 metros, distancia demasiado grande para realizar una evacuación.

Por otra parte, una vez conocidos los recorridos que la ciudadanía realizó, basta conocer los destinos que la evacuación trajo consigo, ver figura 6. Tal como se aprecia en la figura 6, el 65% de la población evacuó hacia cerros. El 15% evacuó

hacia las calles. También se destaca que el 10% de las personas evacuó hacia las casas de familiares. Finalmente, porcentajes más pequeños indican que algunas personas evacuaron hacia parques y otras realizaron una evacuación vertical, es decir hacia los pisos superiores de edificios.

Figura 5: Distancias recorridas en la evacuación de Talcahuano.

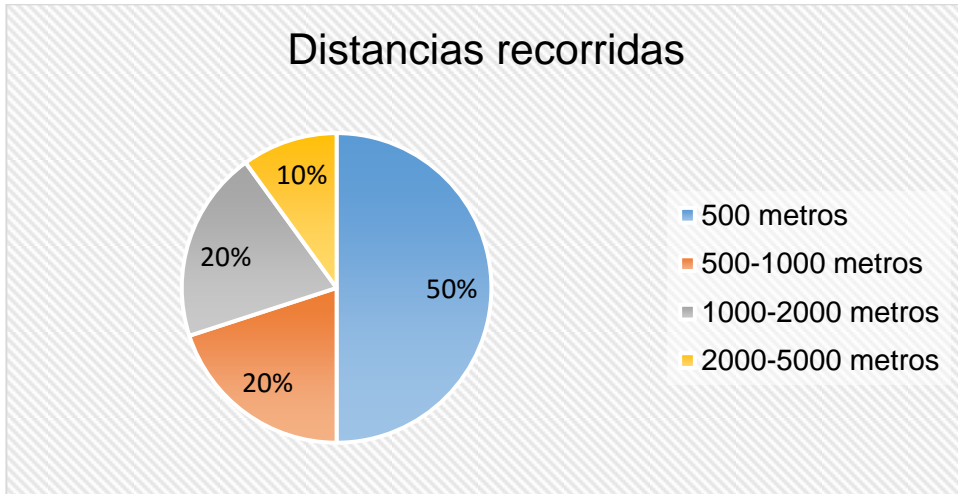
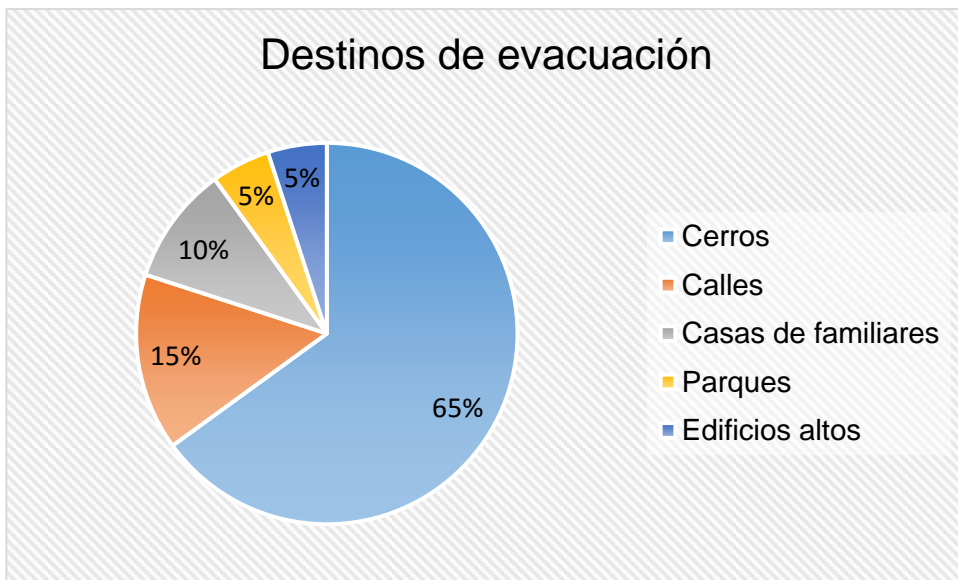


Figura 6: Destinos de la evacuación en Talcahuano.



Teniendo claro los destinos de evacuación, es necesario conocer los medios de transporte que se utilizaron para evacuar. El 60% de los encuestados señaló que la evacuación la desarrollaron caminando, un 32% evacuó en vehículo, ya sea manejando o como copiloto, y un porcentaje menor indicó que evacuaron en bicicleta o motocicleta.

Finalmente, otro aspecto importante frente a una amenaza de tsunami es que las vías de evacuación se encuentren en óptimas condiciones para que el tránsito de las personas sea más fluido y por ende se realice una evacuación en el menor tiempo posible. En el caso del último tsunami vivido en Talcahuano el 2010, el 78% de la población consideró que la calidad de las rutas no era muy buena, y tan solo un 22% indicó lo contrario.

3.2 Formulación del problema.

Los datos recabados en la charla del arquitecto Leonel Ramos, muestran claramente que existieron deficiencias en el actuar de la ciudadanía que se deben principalmente al escaso conocimiento que tenían de un tsunami y las consecuencias que este fenómeno podría traer consigo.

Una de las primeras deficiencias detectadas en los resultados de la investigación fueron los altos tiempos que le llevó a la ciudadanía evacuar. El 50% de los habitantes de Talcahuano tardó entre 10 y 30 minutos en salir de sus casas, siendo que existen tsunamis que pueden arribar a las costas entre 15 a 30 minutos tras ocurrido un terremoto tal como lo indica Figueras (2005) citado por Pantoja y Moscoso (2012). Este hecho da cuenta de las nefastas consecuencias que hubiera traído consigo un terremoto con características desfavorables en cuanto a la zona de ruptura y profundidad del fondo oceánico.

Además, hay que añadir que un 30% de la población recorrió entre 1 a 5 kilómetros para llegar a su destino, que en algunos casos no eran las zonas de seguridad más cercanas, sino hogares de familiares. Este hecho está asociado a

un mayor tiempo de evacuación y explica el poco conocimiento, por parte de los habitantes de Talcahuano, de las zonas seguras y de las rutas de evacuación establecidas más cercanas.

Otra problemática detectada en la evacuación de Talcahuano el 27 de febrero del 2010 es que tan solo 6 de cada 10 personas evacuó caminando y el 32% de la población evacuó manejando o como copiloto de un vehículo, situación que no es recomendable, ya que entorpece el proceso de evacuación.

En consideración a lo anterior, se llegó a la conclusión que los tiempos de evacuación se pueden disminuir considerablemente con una alerta oportuna por parte de las autoridades, y también con una ciudadanía más informada a cerca de cuáles son los protocolos y rutas a seguir frente a una amenaza natural.

3.3 Diseño del modelo conceptual.

Se sabe de antemano que en Talcahuano existen diversas amenazas, entendiendo que estas son fenómenos peligrosos que pueden provocar muertes, lesiones, agravios en los estados de salud, así como también daños en la infraestructura, servicios básicos, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (FAO, 2009).

Las amenazas poseen dos claras clasificaciones, como lo indica Cordero (2014), la primera corresponde a amenazas de tipo antrópicas y sociales, donde la energía destructiva posee un origen humano y social. La otra clasificación comprende a las amenazas naturales, en donde se encuentran los tsunamis. Se destaca que estos corresponden a la subcategoría de amenazas tectónicas o geológicas, relativas a las fuerzas internas de la tierra.

Como se ha dicho en los capítulos anteriores, los tsunamis poseen un poder altamente destructivo sobre el borde costero, poniendo en peligro la vida e integridad de las personas. Es por tal motivo que la ciudadanía debe estar alerta, informada y preparada en caso de enfrentar esa amenaza natural.

Para salvaguardar la vida e integridad de los habitantes de un sector costero perteneciente a la comuna de Talcahuano es necesario que las principales organizaciones, SNAM (Sistema Nacional de Alarma de Maremoto), SHOA y ONEMI, tengan una óptima comunicación, y cumplan la función de alertar a la ciudadanía oportunamente para que puedan evacuar lo antes posible.

Se debe considerar que el tiempo que disponen las personas para evacuar es limitado y dependerá del epicentro del terremoto. Estos tiempos varían entre los 15 minutos (cuando el epicentro del terremoto es cercano), hasta 6 horas (cuando el epicentro del terremoto es lejano).

Considerando lo anterior, es posible explicar las fases que involucra el proceso de evacuación, estas son detalladas a continuación.

Inicio: la primera fase del proceso de evacuación comienza tras acontecer el terremoto y haberse activado la alerta de tsunami. La reacción de la comunidad perteneciente al borde costero es el de movilizarse a los sectores más altos. Las diferencias en los tiempos de evacuación se deben a las variadas formas de pensar y actuar por parte de las personas. Algunas evacúan de inmediato mientras que otras deciden esperar a todo el grupo familiar para salir de sus hogares, otras personas se preocupan de las mascotas, de dejar las viviendas cerradas para evitar posibles robos de sus pertenencias, otras personas entran en pánico (factor que impide pensar claramente), entre los más destacados.

Desarrollo: etapa en la cual los habitantes de Talcahuano escapan de sus viviendas hacia las zonas de seguridad. Se entiende por estas, aquellos sectores que se ubican fuera del área de riesgo de inundación, de altura superior a los 30 metros sobre el nivel del mar, que le permiten a la población evacuar y tener acceso a los servicios básicos de atención (Staub *et al.*, 2014).

Una vez que las personas se alejan de sus hogares existen diversos escenarios que pueden entorpecer la evacuación como el mal estado de las calles, fachadas colapsadas, alta aglomeración y/o congestión vehicular, entre otras. Para efectos

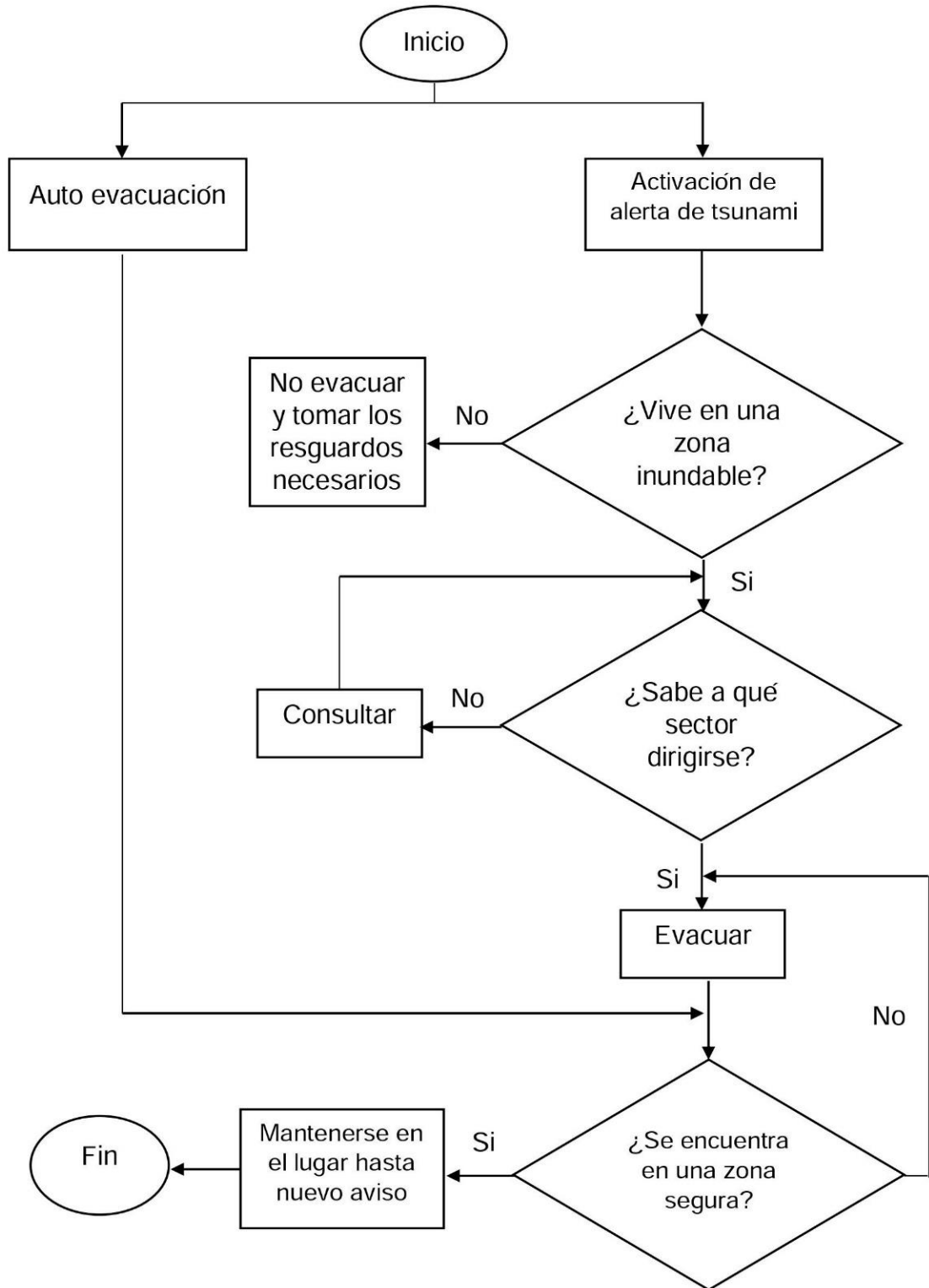
de estudio se dará por entendido que las calles se encuentran en condiciones óptimas para realizar una evacuación fluida.

Según León *et al.* (2014), las personas generalmente evacúan por caminos conocidos hacia las zonas de seguridad en vez de seguir las rutas de evacuación preestablecidas. En este estudio se fijarán dos escenarios, el primero simula a las personas evacuando por las rutas más cercanas y el segundo muestra a las personas evacuando por las rutas establecidas para ejecutar tal proceso.

Final: corresponde al momento en que los habitantes llegan a las diferentes zonas de seguridad que se encargan de acoger por horas e incluso días a las personas evacuadas. Talcahuano actualmente cuenta con 12 zonas de seguridad, las cuales no cuentan con elementos de primera necesidad.

La figura 7 presenta un resumen de lo dicho con respecto al proceso de evacuación en Talcahuano. En el diagrama se puede encontrar un proceso que es considerado crítico dentro de una evacuación. Este corresponde a la situación en que alguna persona no sepa a qué sector dirigirse, teniendo en cuenta que no todos reaccionan de la misma manera y en algunos casos un evento de tal naturaleza puede alterar negativamente la forma de pensar de una persona. Es en este punto en que las personas tienden a seguir a la multitud y también consultar a otros sujetos las rutas de evacuación.

Figura 7: Diagrama de flujo del proceso de evacuación.



3.4 Colección y tratamiento de datos.

Para poder realizar la programación del modelo, es necesario recopilar datos de los habitantes de Talcahuano para representar lo que ocurriría en un proceso de evacuación actualmente. Basados en los últimos indicadores demográficos realizados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) correspondientes al año 2012¹⁶, se obtuvo la cantidad de habitantes en Talcahuano. Los datos indican que Talcahuano se compone de 171.463 habitantes, de los cuales el 50,5% son mujeres y el 49,5% son hombres (ver anexo).

Por otra parte, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2008) señala que en el año 2012 el número de hogares en Talcahuano corresponde a 52.135 (ver anexo). Por lo tanto, según la última información, se puede concluir que, por cada vivienda en Talcahuano, habitan aproximadamente 3 personas.

El estudio, se centra principalmente en la evacuación de los habitantes del sector El Centro hacia las zonas de seguridad, que en su mayor parte se encuentran en el sector Los Cerros debido a que posee una gran altura sobre el nivel del mar. Tal evacuación debe realizarse caminando, para evitar accidentes y aglomeraciones por el uso de medios de transporte como vehículos y motocicletas. La velocidad peatonal utilizada, es la propuesta por Smith (1995) citado por León *et al.* (2014) quién recomienda ejecutar el modelo considerando una velocidad de 1,4 m/s (5,04 km/h), independientemente del sexo o edad de la persona.

Otros factores importantes a considerar en el modelo de simulación, corresponden a aquellos que retrasan el proceso de evacuación o simplemente hacen que la población no evacúe. Se entiende por tiempo de retraso a aquel que transcurre desde que existe una alarma oficial de evacuación hasta que se inicia el movimiento rumbo a las zonas de seguridad. Influyen de manera directa:

- ❖ El temor al robo de pertenencias al dejar la vivienda desprotegida.

¹⁶ El Instituto Nacional de Estadísticas indica que los datos proporcionados del año 2012 son útiles para la toma de decisiones en escenarios futuros.

- ❖ La falsa sensación de seguridad al no percibir un terremoto de grandes proporciones.
- ❖ La percepción del riesgo, dependiendo de experiencias previas.

El primer punto guarda relación con los niveles de delincuencia que caracterizan a una provincia o comuna en particular. Talcahuano posee altas cifras de delincuencia. En el año 2014, 1.392 fueron los delitos contra la propiedad de un total de 3.437 delitos (INE, 2014), hecho que genera una sensación de inseguridad en la población, y el temor de dejar las viviendas desprotegidas.

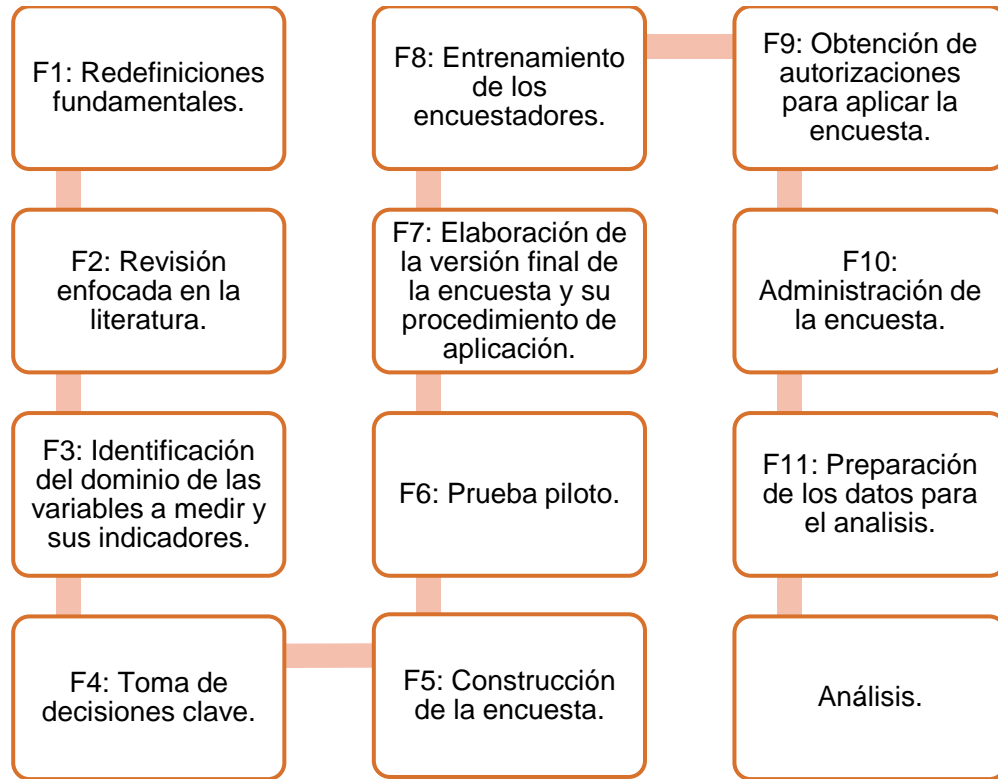
Por otra parte, tras las lecciones aprendidas de la evacuación de tsunami del año 2010, Cisternas (2011) señala que los habitantes de mayor edad saben detectar los signos de la venida a un tsunami como consecuencia de las experiencias vividas previamente como el terremoto del año 1960. Esta proporción de la población de Talcahuano mayor de 55 años, alrededor de un 15% según el INE (2012), evacúa inmediatamente tras producirse un terremoto hacía sitios de altura sin que necesariamente exista una alerta formal de tsunami.

3.4.1 Encuesta y resultados.

Ante la falta de datos acerca de las características de los habitantes de Talcahuano en un proceso de evacuación, fue necesario la realización de una encuesta. Esta corresponde a una técnica de investigación que tiene como propósito recopilar datos, de un sitio de interés, a través de un cuestionario previamente diseñado. La encuesta permite incluir un mayor número de casos a diferencia de otras técnicas como la entrevista.

Para llevarla a cabo se utilizó el proceso propuesto por Sampieri *et al.* (2010), quienes postulan fases para el desarrollo y administración de la encuesta, así como también para la preparación de los datos que serán analizados. Las etapas se resumen en la figura 8 y se detallan en el anexo B.

Figura 8: Proceso para construir la encuesta.



Tras seguir las fases, se diseñó el tránsito de la variable al ítem, ver tabla 2, de la cual se obtuvo como resultado la encuesta que se muestra en el anexo B (ver figura 28). Esta fue validada por Natalia Vera Aguilera, socióloga del Departamento de Gestión Integral de Riesgo de Desastre de la Ilustre Municipalidad de Talcahuano.

Tabla 2: Tránsito de la variable al ítem.

Variable	Dimensión	Indicadores	Ítems
Características Sociodemográficas.	Género.	Aspectos sociodemográficos del sector Centro de Talcahuano.	Género del encuestado (inspección visual). 1. Masculino. 2. Femenino.
	Edad.		¿En qué rango se encuentra su edad? 1. 18 – 30 años. 2. 31 – 45 años. 3. 46 – 60 años. 4. 61 – 75 años. 5. 76 años o más.
	Grupo familiar.		¿De cuántas personas se compone su grupo familiar? R: _____.
Conocimientos sobre tsunami.	Experiencias anteriores.	Experiencia y nivel de planificación de un grupo familiar ante una evacuación de tsunami.	¿Tiene experiencias previas en evacuación de tsunami? 1. Sí. 2. No.
	Plan familiar de evacuación.		¿Posee un plan familiar de evacuación de tsunami? 1. Sí. 2. No.

	Conocimiento de zonas seguras.		¿Conoce las zonas seguras de Talcahuano? 1. Sí. 2. No.
Proceso de evacuación.	Alerta de tsunami.	Variables que influyen en un proceso de evacuación.	Considerando que en el terremoto de Illapel dada la alerta de tsunami para todo el borde costero de Chile usted no evacuó, ¿a qué se debió su decisión? 1. Según su experiencia previa sabía que no llegarían grandes olas al borde costero. 2. Por temor al robo, al dejar su vivienda desprotegida. 3. Al observar el mar en calma, desistió evacuar. 4. Otro (especificar).
Antes: Terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010.	Lugar en qué se encontraba al momento del terremoto.	Ubicación de los habitantes del sector centro de Talcahuano.	Con respecto a la experiencia vivida en el terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010, ¿en qué lugar se encontraba al momento del terremoto? R: _____.
Durante: Terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010.	Retrasos en el proceso de evacuación.	Acciones seguidas antes de realizar la evacuación.	¿Qué acciones consideró antes de evacuar? (Selección múltiple). 1. Recopilar implementos básicos como agua, abrigo, alimento, etc. 2. Esperar que todo el grupo familiar se encuentre listo para evacuar. 3. Dejar cerradas puertas y ventanas para evitar posibles robos. 4. Reunir dinero y las pertenencias de valor. 5. No considera nada. 6. Otro (especificar).

	Tiempo en salir del hogar.	Tiempos involucrados en el proceso de evacuación.	Aproximadamente, ¿Cuánto tiempo tardó en salir de su hogar desde el momento en que ocurrió el terremoto? R: _____.
			Aproximadamente, ¿Cuánto tiempo tardó en salir de su hogar desde el momento en que se enteró de la alerta de tsunami? R: _____.
	Tiempo de evacuación.		¿Cuánto tiempo transcurrió desde el momento en que salió de su hogar hasta encontrarse en una zona segura? R: _____.
	Destinos de evacuación.	Zonas consideradas seguras por la población.	¿Hacia qué sitio seguro evacuó? R: _____.
	Medios para evacuar.	Medio de transporte considerado adecuado para realizar un proceso de evacuación.	¿Qué medio de transporte utilizó para evacuar? 1. Pie. 2. Automóvil. 3. Motocicleta. 4. Bicicleta. 5. Otro (especificar).
Comunicación con terceros.	Grado de comunicación en el proceso de evacuación.	¿Le informó a alguien que estaba evacuando? 1. Sí. 2. No.	

Post: Terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010.	Tiempo en zona segura (sensación de seguridad).	Tiempo que tarda una persona en volver a su vivienda tras evacuar.	¿Cuánto tiempo se mantuvo en la zona segura hasta regresar a su hogar? R: _____.
	Estimación de pérdidas materiales.	Nivel de pérdidas materiales y acciones tomadas tras la experiencia del 27 de febrero del 2010.	¿En cuánto dinero estima la pérdida de sus bienes? R: _____.
	Seguros de propiedad.		Entendiendo que vive en una zona de inundación de tsunami, ¿posee su propiedad seguro contra desastres naturales? 1. Sí. 2. No.
	Resguardo de bienes.		Entendiendo los riesgos que implica vivir en esta zona ¿ha tomado medidas para resguardar sus bienes? 1. Sí. 2. No.

El universo del estudio se compone por aquellas personas residentes en zonas susceptibles a inundación por tsunami en la comuna de Talcahuano. Conforme a los objetivos de este estudio, la población considera a los habitantes del sector centro de Talcahuano, expuestos a amenaza de inundación.

El área definida como centro de la comuna es determinada por la municipalidad de Talcahuano; limitando al Norte con la Base Naval, al Oeste con la bahía de San Vicente, al Este con la bahía de Concepción y al Sur con el territorio de Las Higueras y Salinas, ver figura 9. En el espacio se encuentra inserto el foco comercial histórico, portuario y de servicios, además de viviendas.

Para establecer la población de interés se utilizaron datos secundarios provenientes de dos fuentes:

1. Las bases censales del Instituto Nacional de Estadística (INE) del 2002 proyectado al 2015, que entregan el número de habitantes por manzana.
2. La cartografía de zonas inundables en Talcahuano elaborado en el año 2014 por el Centro de Estudios Urbanos (CEUR) de la Universidad del Bío Bío, basada en el registro histórico de tsunamis emitido por el SHOA.

Ambos antecedentes (sociodemográfico y geográfico) se cruzaron por medio del software para sistemas de información georreferenciada ArcGIS, con lo cual fue posible determinar las manzanas y número de habitantes ubicados en la zona inundable. Así, la población a estudiar se compone por 28.021 sujetos¹⁷.

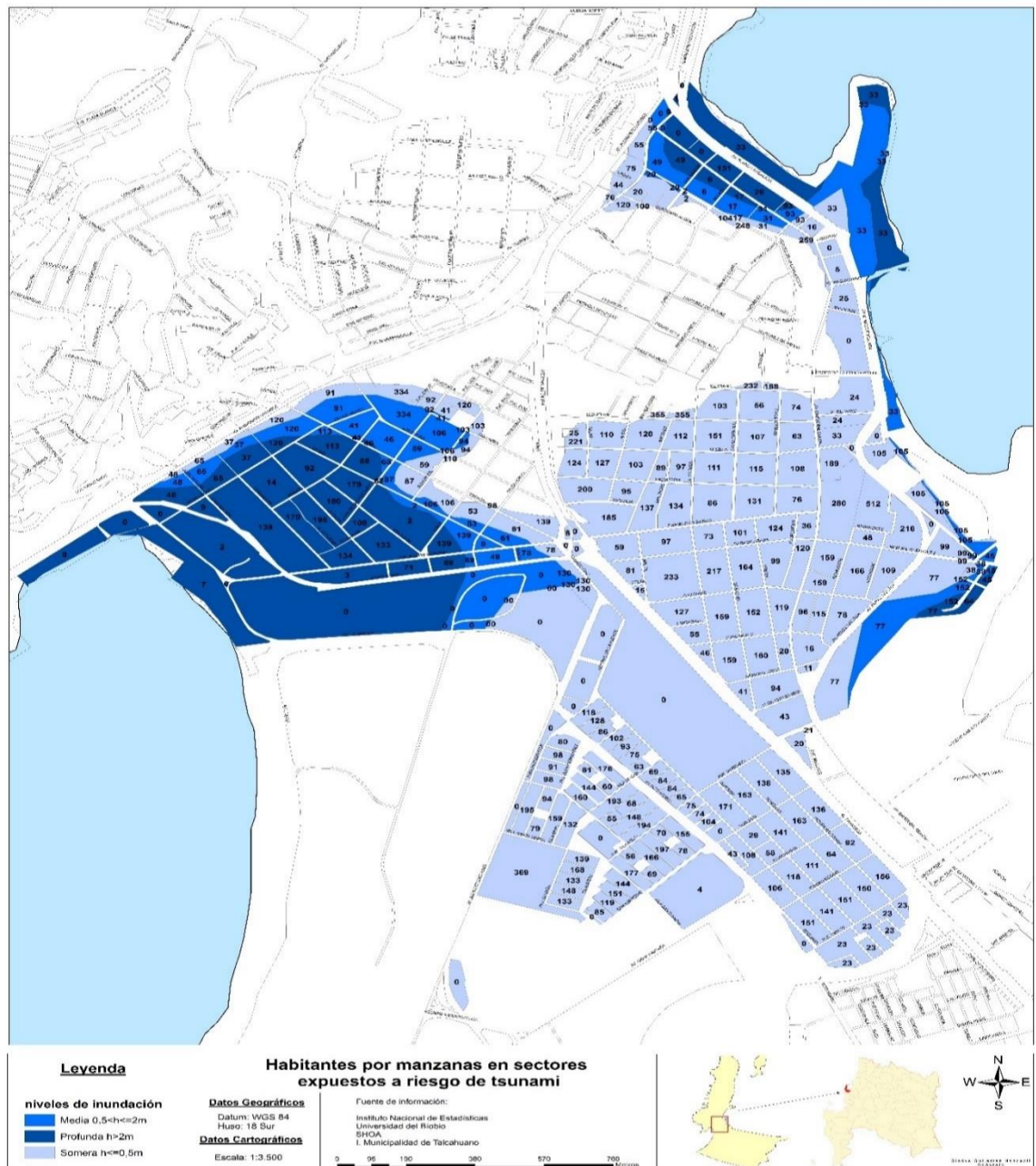
Para los fines de este trabajo, se buscó generar una muestra que resulte representativa de la población en términos distributivos. Por ello, se optó por utilizar un muestreo estratificado al azar con un error muestral de 5% y confiabilidad de 95%. Así, se estableció un tamaño muestral de 378 sujetos¹⁸.

¹⁷ Ésta labor fue realizada por Gladys Gutiérrez N., geógrafa del Departamento de Gestión Integral del Riesgo de Talcahuano.

¹⁸ Tras el trabajo en terreno este valor se redujo a 334 encuestas, ya que algunas manzanas correspondían a sectores industriales y comerciales.

Considerando la población de habitantes, se definieron submuestras proporcionales por cada manzana del sector (ver figura 29, anexo B).

Figura 9. Sector Centro de Talcahuano.



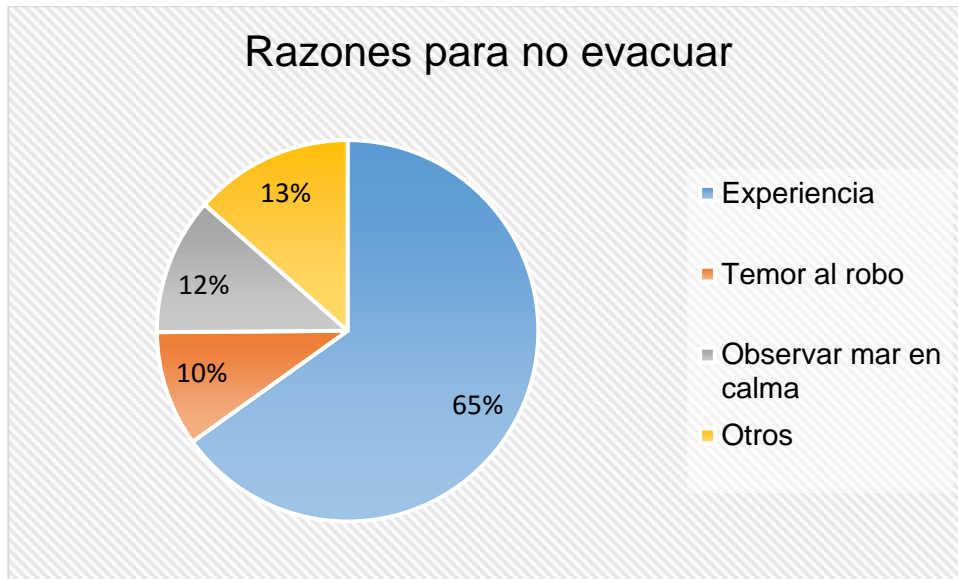
Fuente: Departamento de Gestión Integral de Riesgo de la Ilustre Municipalidad de Talcahuano (2016).

En la encuesta realizada, el 58% de los encuestados corresponden al género femenino y el 42% al masculino. En cuanto a la edad, el grupo que con más frecuencia respondió fueron aquellas personas que tienen entre 61 y 75 años con un 32%, seguidos con un 26% por un grupo etario que fluctúa entre 46 y 60 años (ver figura 31 del anexo B).

Tras el terremoto de Coquimbo ocurrido en septiembre del año 2015, los encuestados fueron consultados si habían evacuado sus hogares tras la activación de una alerta de tsunami para todo el borde costero chileno. Un 84% se encontraba en Talcahuano, específicamente en sus hogares cuando ocurrió este fenómeno. De este porcentaje sólo un 24% dijo haber evacuado (ver figura 33, anexo B).

El resto de la población que no evacuó, mencionó en un 65% que dicha decisión se debió a que por experiencia sabía que no llegarían grandes ondas a la costa. Un 12% fue a observar el mar y al verlo en calma desistió evacuar, generándose una falsa sensación de seguridad. Un 10% indicó que no realizó el proceso de evacuación para no dejar su vivienda desprotegida por temor a robos, y el 13% restante dijo entre otras cosas que: no hubo alerta de tsunami, se encontraba trabajando o no le dio importancia a lo sucedido (ver figura 10).

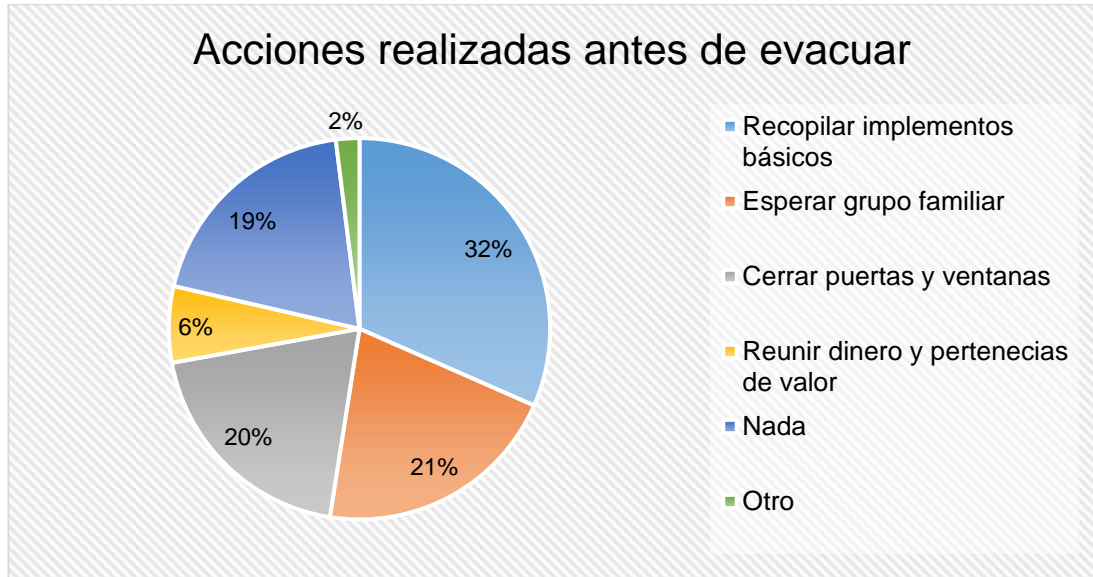
Figura 10: Razones para no realizar el proceso de evacuación.



Por otra parte, tras ser consultados sobre su experiencia en el terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010, un 90% de los encuestados se encontraba en Talcahuano, específicamente en sus hogares, cuando ocurrió tal fenómeno natural. Un 4% se encontraba en Talcahuano fuera de sus hogares, ya sea en su trabajo o en reuniones familiares. Y el 6% restante estaba fuera de la ciudad (ver figura 34, anexo B).

La respuesta de la ciudadanía ante el movimiento telúrico fue variable, ya que no todos reaccionan de la misma manera. En promedio la población tardó 19,35 minutos en evacuar hacia un sitio seguro. Las acciones realizadas antes de evacuar (ver figura 11), en un 32% corresponden a recopilar implementos básicos como alimento, agua, abrigo y medicamentos. Un 21% esperó que todo el grupo familiar se encontrara listo para evacuar. El 20% se preocupó de cerrar puertas y ventanas para evitar posibles robos de sus pertenencias. Finalmente, un 19% no consideró nada para realizar el proceso de evacuación.

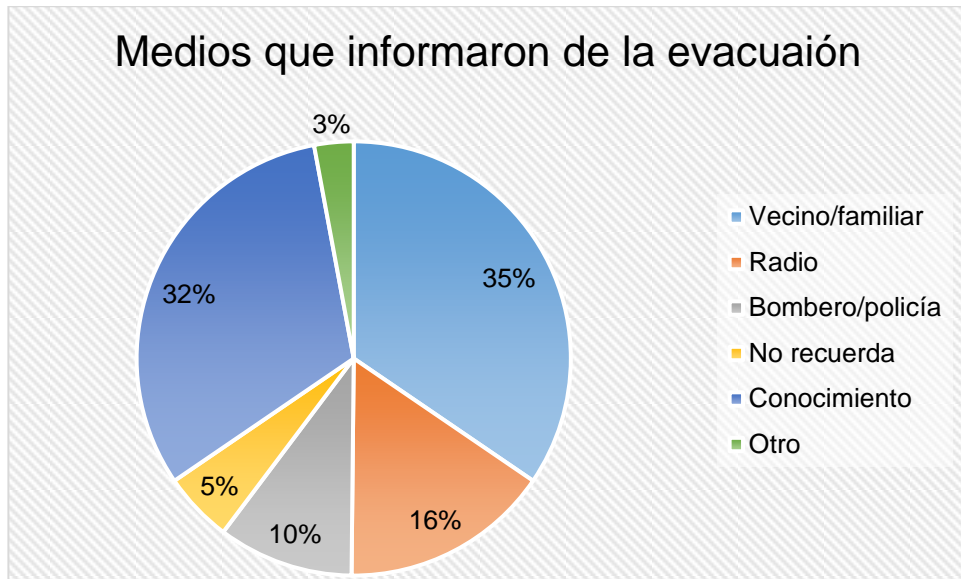
Figura 11: Acciones previas a evacuar.



La madrugada del 27 de febrero del 2010 un 82% de la población evacuó hacia una zona segura (luego de ocurrido el terremoto), de los cuales un 67% lo hizo caminando y un 32% en automóvil (ver figura 36, anexo B). Los destinos más frecuentes, en un 91% de los casos, corresponden a los cerros más cercanos de cada sector (ver figura 35, anexo B). Este hecho que da cuenta del gran conocimiento que tienen los habitantes del sector centro de Talcahuano de las zonas seguras, donde un 94% aseguró conocer dichos sitios (ver figura 32, anexo B).

Las razones que motivaron la evacuación ante un inminente tsunami son variables y se presentan en la figura 12. El 35% se enteró por un vecino o familiar. Un 32% aseguró tener conocimiento de este fenómeno y que ante un sismo de tal magnitud era muy probable el arribo de un tsunami. Mientras que un 16% fue alertado a evacuar al escuchar la radio.

Figura 12: Medios de alerta de evacuación.



Finalmente, tras las lecciones aprendidas del terremoto y tsunami que afectó a la zona de estudio, un 72% aseguró tener un plan familiar de evacuación en el caso de un terremoto de gran magnitud. Mientras que un 28% indicó lo contrario, hecho que denota un cierto descuido y desinformación de los riesgos a los cuales se exponen.

CAPITULO IV: Construcción del modelo.

4.1 Construcción del modelo.

Para la construcción del modelo se utilizó la plataforma Netlogo. Esta fue creada en 1999 por Uri Wilensky, director de la Universidad de Northwestern. La plataforma se encuentra en constante desarrollo en el *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* de Estados Unidos.

Netlogo se puede obtener gratuitamente a través de su página oficial¹⁹ y cuenta con una biblioteca de modelos con más de 140 simulaciones pre-construidas que se pueden explorar y modificar. Estas abarcan fenómenos naturales y sociales complejos que se subdividen en las áreas del arte, biología, ciencias de la computación, química, física, ciencias del suelo, juegos, matemáticas, economía, psicología y ciencias sociales.

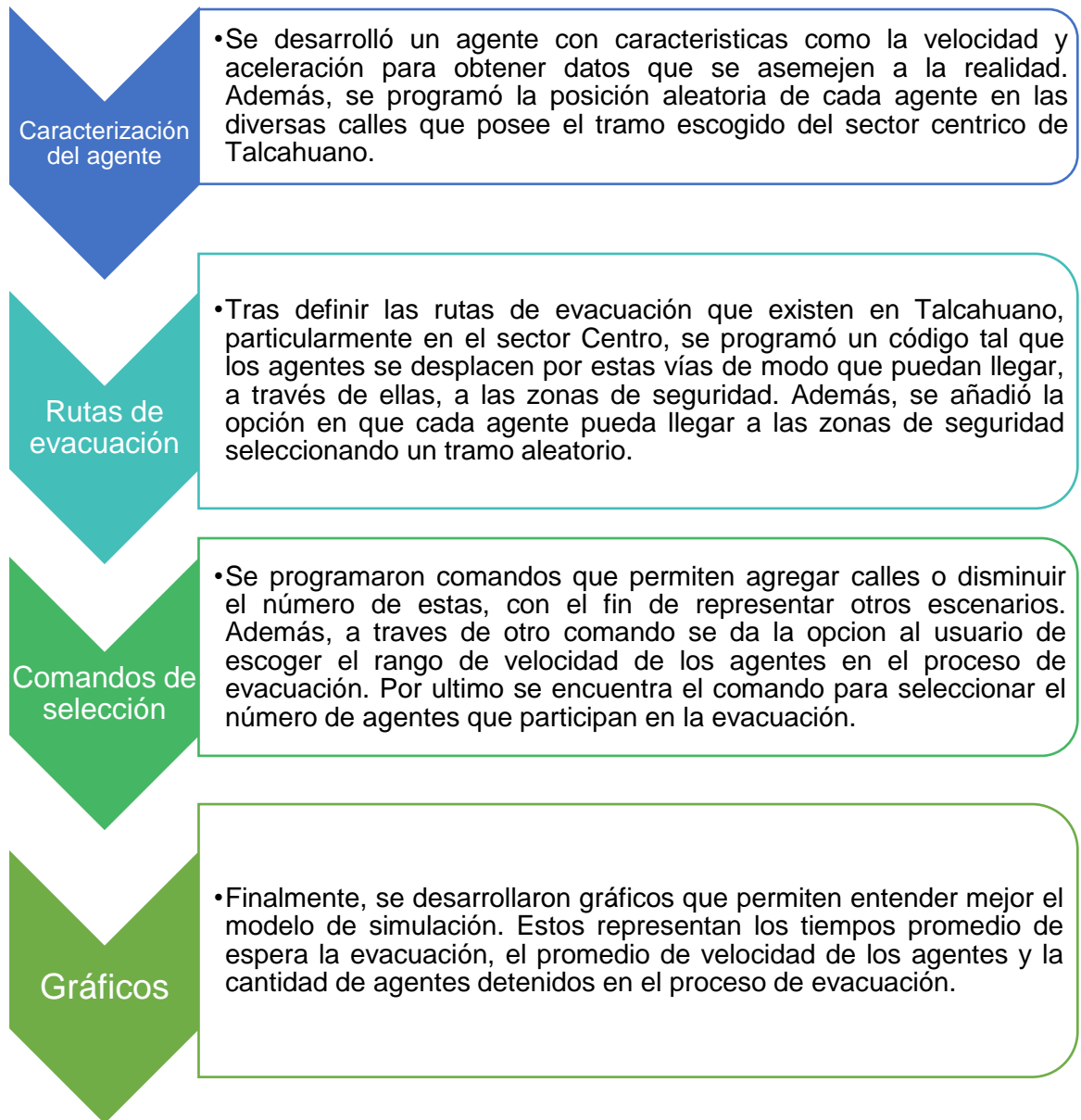
La plataforma de simulación cuenta con agentes móviles llamados *turtles* los cuales realizan su recorrido a través de una rejilla o cuadrículas de *patches* que también corresponden a agentes programables. Cabe destacar que todos los agentes pueden interactuar entre sí y realizar diversas tareas en forma simultánea. Por lo demás, Netlogo incluye otro tipo de agente llamado *observer* el cual es único y cumple la función de emitir instrucciones a las *turtles* y *patches* (Tisue y Wilensky, 2004).

4.1.1 Programación de la lógica del modelo.

La programación de la lógica del modelo consistió en el desarrollo de 4 sub-modelos, los cuales se resumen en la figura 13.

¹⁹ <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/download.shtml>

Figura 13: Sub-modelos de simulación.



Para comenzar la programación del modelo fue necesario establecer las variables globales que la plataforma requería. Es necesario entender que estas variables son aquellas que están asociadas a valores y en el que cada agente puede tener acceso a ellas. Es por esto que las variables creadas fueron las siguientes:

```
globals [ grid-x-inc grid-y-inc acceleration num-persons-stopped intersections  
roads ]
```

El siguiente paso en la programación fue crear las variables propias de las *turtles* y de los *patches*. Estas son definidas como *turtles-own* y *patches-own*, y deben establecerse en el inicio de la programación antes de las definiciones de funciones. Las variables propias empleadas en el modelo se presentan a continuación:

```
turtles-own [ speed up-person? wait-time ]  
patches-own [ intersection? my-row my-column ]
```

Tras haber definido las variables globales y propias se comienza con la programación del comando *setup*. En este proceso se da la orden de limpiar la pantalla o mundo virtual y se crean las *turtles* dándoles características e instrucciones. Además, se definen comandos que se desarrollaron más adelante como se observa en el cuadro:

```
to setup  
clear-all  
setup-globals setup-patches  
set-default-shape turtles "person"  
create-turtles num-persons [ setup-persons set-person-color record-data ]  
ask turtles [set-person-speed]  
reset-ticks  
end
```

Hay que señalar que a partir de este punto todos los procesos que continúen comienzan con la palabra *to* y finalizan con la sentencia *end*. En caso que no se

utilicen estos términos la programación no tendrá validez en el modelo de simulación.

La programación de *setup-globals* tiene relación con la creación de las variables descritas en un principio. En este procedimiento, que se presenta a continuación, se configuran las variables globales de modo que al iniciar el modelo estas posean ciertas características.

```
to setup-globals
  set num-persons-stopped 0
  set grid-x-inc world-width / grid-size-x
  set grid-y-inc world-height / grid-size-y
  set acceleration 0.099 end
```

Continuando con la programación, *setup-patches* es un procedimiento creado para configurar los *patches* en donde se define la posición de los cuadros que representarán las calles, las manzanas (lugares en donde se sitúan las viviendas) y sus respectivos colores.

Además, se establece otro procedimiento llamado *setup-intersections*. Aquí se establecieron las intersecciones de las calles dando comienzo a la caracterización del entorno en el que se desplazarán las *turtles*.

A continuación, se pueden observar ambas programaciones:

```
to setup-patches
  ask patches [ set intersection? false set my-row -1 set my-column -1 set pcolor
  gray + 1 ]
  set roads patches with [(floor((pxcor + max-pxcor - floor(grid-x-inc - 1)) mod grid-x-
  inc) = 0) or (floor((pycor + max-pycor) mod grid-y-inc) = 0)]
```

```

set intersections roads with [(floor((pxcor + max-pxcor - floor(grid-x-inc - 1)) mod
grid-x-inc) = 0) and (floor((pycor + max-pycor) mod grid-y-inc) = 0)]

ask roads [ set pcolor white ] setup-intersections

end

to setup-intersections

ask intersections [ set intersection? true set my-row floor((pycor + max-pycor) /
grid-y-inc) set my-column floor((pxcor + max-pxcor) / grid-x-inc) ]

end

```

El siguiente cuadro presenta la programación de los agentes móviles, a los cuales se les da valores iniciales a variables como la velocidad, el tiempo de espera y la orientación que deben seguir tras la partida del modelo.

```

to setup-persons

set speed 0 set wait-time 0

put-on-empty-road

ifelse intersection?

[ ifelse random 2 = 0 [set up-person? true] [set up-person? false]]

[ ifelse (floor((pxcor + max-pxcor - floor(grid-x-inc - 1)) mod grid-x-inc) = 0) [ set up-
person? true] [ set up-person? false] ]

ifelse up-person? [ set heading 180] [ set heading 0]

end

```

Teniendo ciertas características ya definidas, la programación continuó con el posicionamiento aleatorio de las *turtles* en los *patches*, específicamente en aquellas definidas como calles. Para esto se creó el comando *put-on-empty-road* que se observa a continuación:

```
to put-on-empty-road
```

```
move-to one-of roads with [not any? turtles-on self] end
```

Luego de los pasos anteriores, se programó el comando del botón *go*. En este punto se les pide a todos los agentes móviles nuevas variables, tal como se aprecia en el cuadro siguiente, las que se programaron más adelante.

```
to go
```

```
set num-persons-stopped 0
```

```
ask turtles [ set-person-speed forward speed record-data set-person-color ] tick
```

```
end
```

set-person-speed se programó con el objeto de definir bajo qué condiciones los agentes reducían su velocidad a 0 y a qué direcciones debían dirigirse, todo esto mediante funciones lógicas como se muestra a continuación.

```
to set-person-speed
```

```
ifelse pcolor = red [ set speed 0 ]
```

```
[ ifelse up-person? [ set-speed 1 0 ][ set-speed 0 -1 ]
```

```
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 23) [set heading 90]
```

```
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 17) [set heading 90]...] 
```

```
end
```

Los puntos suspensivos obedecen a la abreviación de la secuencia que se puede observar en el anexo C. Aquí se le da la orden a las *turtles* que cambien de dirección en 90° cuando transitan por las diferentes intersecciones que posee el modelo para que estos lleguen a la zona de seguridad.

Cabe destacar que existen dos códigos distintos para cumplir lo anterior, la primera hace que cada agente siga una ruta aleatoria hasta llegar a la zona segura (ver figura 37, anexo C). Y la segunda, ordena a los agentes seguir las rutas establecidas de evacuación para llegar a las zonas de seguridad (ver figura 38, anexo C).

Por último, se programaron los comandos que tienen relación con la velocidad tal como se aprecia en el cuadro siguiente.

```
to set-speed [ delta-x delta-y]

let turtles-ahead turtles-at delta-x delta-y

ifelse any? turtles-ahead [ifelse any? (turtles-ahead with [ up-person? != [up-
person?] of myself)) [ set speed 0 ]

[ set speed [speed] of one-of turtles-ahead slow-down ]] [speed-up]

end

to slow-down

ifelse speed <= 0 [ set speed 0 ] [ set speed speed - acceleration ]

end

to speed-up

ifelse speed > speed-limit [ set speed speed-limit ] [ set speed speed +
acceleration ] end

to set-person-color

ifelse speed < (speed-limit / 2) [ set color blue ] [ set color cyan - 2 ] end

to record-data

ifelse speed = 0 [ set num-persons-stopped num-persons-stopped + 1 set wait-
time wait-time + 1 ] [ set wait-time 0 ] end
```

La primera programación *set-speed* establece la velocidad en ambos ejes x e y. Además, reduce la velocidad de un agente a 0 cuando existe una *turtle* que le impide el paso. Por otra parte, en *speed-down* y *speed-up* se programaron reglas que hacen a los agentes móviles reducir y aumentar la velocidad respectivamente.

Set-person-color hace cambiar de color a los agentes dependiendo de la velocidad que alcancen. Y finalmente, *record-data* graba los datos del número de personas detenidas y tiempo de espera para desplegar estos datos a los gráficos.

4.1.2 Diseño de la animación del modelo.

Para explicar acerca del diseño de la animación del modelo es necesario comenzar explicando las funciones de cada comando cumple dentro de la simulación.

Como se mencionó en el comienzo del capítulo 4, Netlogo posee dos principales agentes que interactúan entre sí y estos corresponden a las *turtles* y los *patches*. La asociación de ambos en el modelo se da porque las *turtles* tienen que desplazarse sobre los *patches* y cumplir ciertas reglas y funciones.

Para iniciar el modelo se encuentra el botón *setup* que dibuja el mapa, es decir la red de calles que representa un tramo del sector céntrico de Talcahuano. Además, posiciona aleatoriamente en las calles a las *turtles* que poseen la forma de personas. El botón *go* da inicio al modelo haciendo que los agentes comiencen a desplazarse en el mapa. Ambos comandos se muestran en la figura 14.

Figura 14: Botones iniciales.



La figura 14 muestra un signo en la parte inferior del botón *go*. Esta es una opción que posee Netlogo, la cual hace que el modelo se ejecute continuamente (cada

*tick*²⁰) hasta que el usuario considere por finalizado el modelo, en ese entonces se debe apretar nuevamente el botón *go*.

Existen ciertos comandos que se pueden ejecutar antes de dar inicio al modelo de simulación. Uno de estos corresponde al deslizador que lleva por nombre *num-person*, ver figura 15. Este da la opción al usuario para seleccionar el número de personas que se desee introducir en el modelo.

Otro deslizador que es modificable es el *speed-limit*, ver figura 16. Con este se puede variar la velocidad máxima que pueden alcanzar los agentes en el modelo, así también se puede acotar la velocidad para que sea fija. Además, en la tabla de configuración se le da la unidad de medida que el usuario requiera.

Figura 15: Deslizador número de personas.

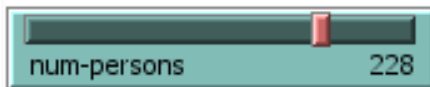
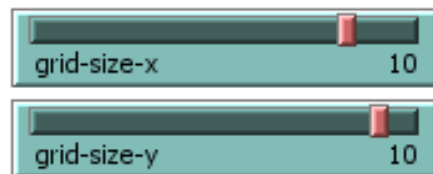


Figura 16: Deslizador límite de velocidad.



Figura 17: Deslizador número de calles.

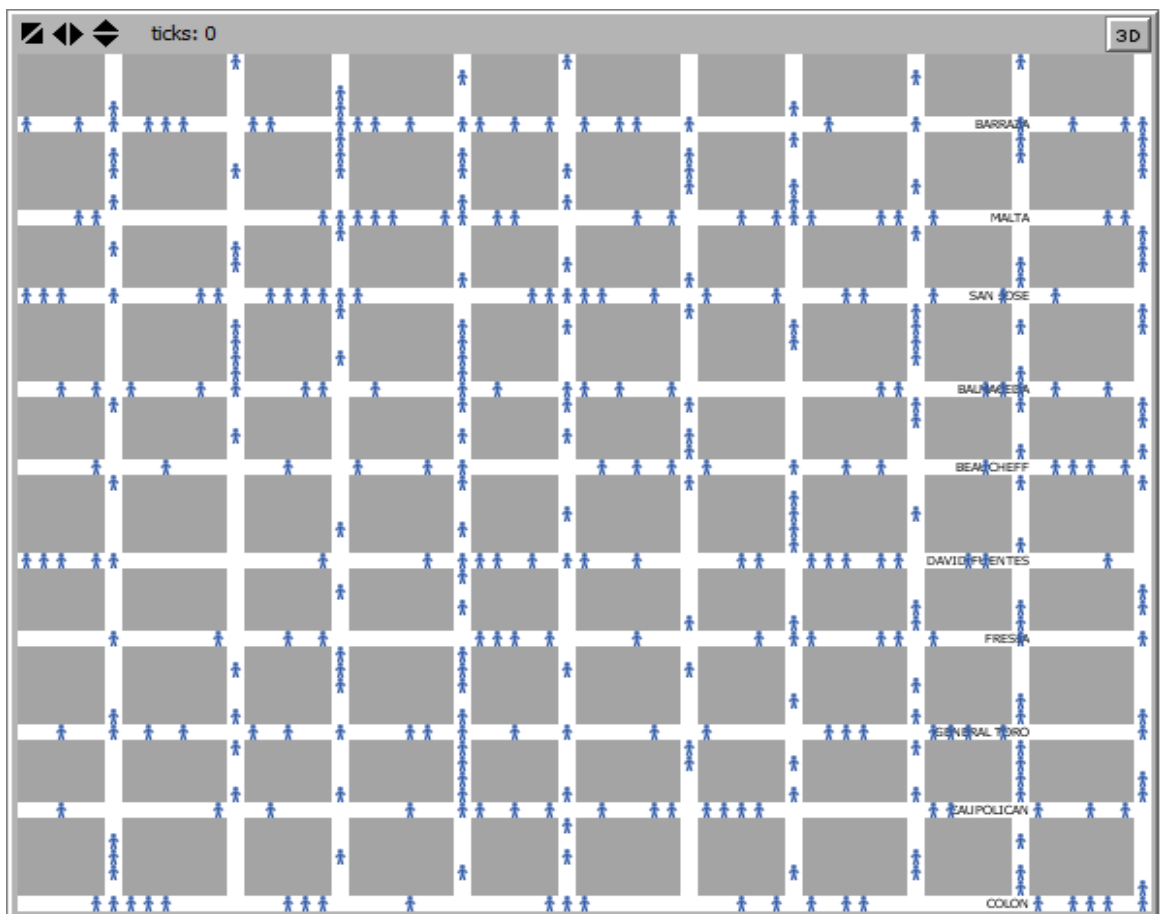


Por otra parte, los deslizadores *grid-size-x* y *grid-size-y*, ver figura 17, dan la opción de aumentar o disminuir el número de calles, ya sea en el eje x o en el eje y, en el caso que se desee representar otros escenarios.

²⁰ Unidad de tiempo de la plataforma Netlogo.

Posterior a la configuración de los deslizadores, es necesario oprimir el botón *setup* para observar los cambios en la pantalla. Tras realizar las configuraciones respectivas de los comandos, se observa el mundo virtual en el cual se sitúan los agentes de manera aleatoria en la red de calles, ver figura 18. Una vez presionado el botón *go* se da inicio al modelo de simulación, y los agentes, dependiendo de sus ubicaciones, comienzan a buscar el camino más apropiado para llegar a la zona de seguridad, que corresponde a la última columna del cuadro.

Figura 18: Vista del mundo virtual.



En el transcurso del modelo se puede observar que los agentes móviles o *turtles* comienzan a cambiar de color azul a azul verdoso. Tal cambio depende de la velocidad que toman estos, cuando alcanzan una velocidad inferior al límite

configurado en el deslizador el tono es azul y una vez que se alcanza la velocidad máxima cambian su color a azul verdoso.

Para analizar el modelo se crearon dos gráficos (ver figura 39 y 40, anexo C), los cuales consideran dos factores: la velocidad media de las personas y el número de personas detenidas en el trayecto hacia la zona de seguridad.

4.2 Verificación.

Este proceso consiste en comprobar que el modelo de simulación realice correctamente el propósito para el cual fue elaborado. Esta fase es de gran importancia y por esto fue realizada conjuntamente con la programación. Las técnicas utilizadas son descritas a continuación.

4.2.1 Reuniones con responsables del proceso.

Las reuniones fueron realizadas con la directora del Observatorio de Gestión de Desastres de la Universidad Católica de La Santísima Concepción y con personal del Departamento de Gestión Integral de Riesgo de Desastre de la Ilustre Municipalidad de Talcahuano con la finalidad de presentar la forma en que el programador visualizaba el actuar de la población frente al fenómeno natural estudiado. De este modo se contrastaron opiniones logrando obtener una perspectiva más acabada del proceso de evacuación en Talcahuano para así, traspasar dicho conocimiento al modelo.

Además, se escogió una red de calles que represente una zona inundable, las primeras ocho cuadras de izquierda a la derecha en la animación, y una zona de seguridad, representada por las últimas dos cuadras de la derecha de la pantalla.

4.2.2 Animación y programación.

El segundo paso de la verificación fue el revisar detenidamente la animación y programación del modelo por parte del programador y de los especialistas del proceso. Esta fase permitió visualizar que las operaciones involucradas en el

modelo funcionaran como se esperaba y, por otra parte, ejecutar el modelo observando el código fuente para realizar correcciones debidas a malinterpretaciones del proceso de evacuación de tsunami.

De la animación, lo más importante en verificar fue que el desplazamiento de los agentes fuera realizado a través de las calles hasta llegar a la zona de seguridad ubicada en la parte lateral derecha del cuadro.

4.2.3 Reportes de simulación.

El proceso de evacuación simulado depende de factores que fueron determinados con cierta precisión, lo cual hace indispensable verificar los resultados y compararlos para establecer si las variables introducidas se encuentran presente en la población estudiada.

Es por lo anterior, que los reportes de simulación fueron consultados de forma frecuente en el transcurso del proyecto y se compararon con los datos obtenidos de otras investigaciones de evacuación en Talcahuano y de la encuesta realizada, de modo que fueran tiempos de evacuación razonables.

4.3 Validación.

La validación hace referencia al sistema real que se está modelando. En esta fase se debe asegurar que el modelo de simulación se comporte como el sistema real.

Previo paso a la validación de los resultados del modelo, se debió validar el cambio de unidad de tiempo, es decir de *ticks* a segundos. Hay que recordar que la plataforma Netlogo arroja tiempos en *ticks*, los cuales varían dependiendo de las dimensiones del escenario a desarrollar. En este caso, para realizar el proceso se le dieron valores a las cuadras, donde cada una tiene una longitud de 100 metros dando como resultado una distancia de recorrido total de 1000 metros o 1 kilómetro. Por otra parte, el modelo posee comandos para seleccionar la cantidad

de agentes involucrados en la evacuación y la velocidad que estos pueden alcanzar. Es aquí en donde se seleccionó sólo a un agente con una velocidad correspondiente a 1,4 m/s, valor utilizado en el desarrollo del proyecto.

Tras hacer diversas corridas con el agente, se obtuvo que en promedio tardaba 50 *ticks* en recorrer las 10 cuadras, equivalentes a 1000 metros. De forma análoga, se obtuvo que una persona que camina a una velocidad constante de 1,4 m/s tarda 714 segundos (aproximadamente 12 minutos) en recorrer 1000 metros. Comparando ambos resultados se determinó que 1 *tick* equivale a 14,28 segundos.

Teniendo claro el cambio de variables, se continuó con el proceso de validación del modelo en el cual se compararon los tiempos de evacuación arrojados por la simulación con los tiempos de evacuación obtenidos de la encuesta realizada en la zona de estudio.

La encuesta determinó que en promedio las personas que evacuaron a pie, en el terremoto del 27 de febrero del 2010, llegaron a un sitio seguro en 18,03 minutos. Por otra parte, el modelo de simulación (tras 10 corridas) arrojó un tiempo total de evacuación de 77 *ticks*, es decir 18,33 minutos (ver tabla 3).

Tabla 3: Tiempos de evacuación.

Tiempo promedio de evacuación según encuesta (minutos).	Tiempo de evacuación arrojado por el modelo (minutos).	Diferencia de tiempos (Z).	Desviación estándar.	Varianza (Var[Z]).
18,03	18,33	0,30	0,15	0,0225

Para determinar si los datos arrojados por el modelo son aceptables fue necesario determinar el intervalo de confianza. Para esto se utilizó la siguiente formula:

$$Z \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{Var(Z)}$$

Luego, reemplazando los datos en la ecuación y con un nivel de confianza del 90%, se obtuvo el siguiente intervalo $[-0,647; 1,247]$. Como este contiene al cero, se puede concluir con un 90% de confianza que las medias no difieren y por lo tanto que los valores obtenidos del modelo de simulación son aceptables.

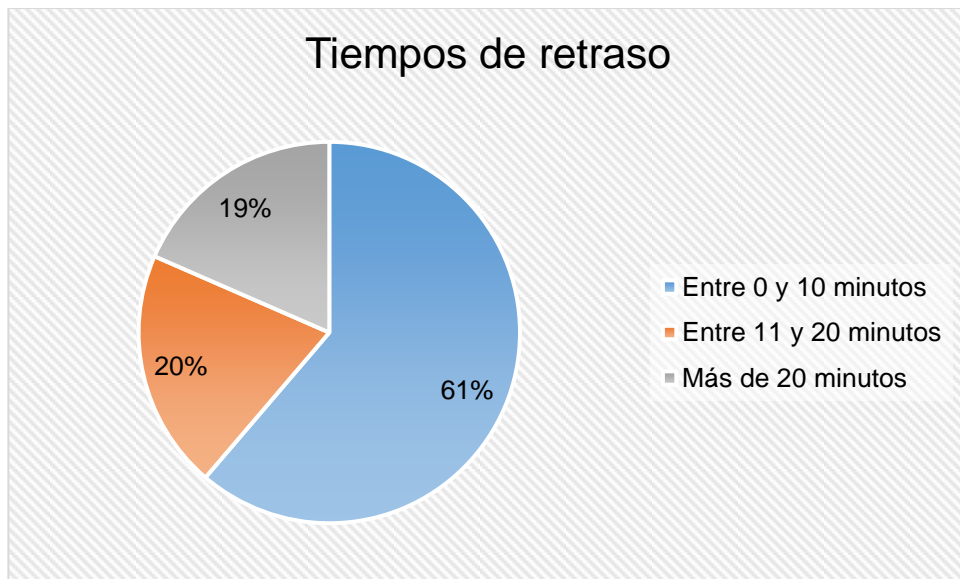
CAPITULO V: Análisis, experimentación y resultados.

En este capítulo el análisis se centra en los tiempos de evacuación y de espera de los habitantes de la zona inundable del sector centro de Talcahuano. Se contemplan marcos de cómo puede ser efectuado el proceso de evacuación.

Las observaciones de estos cambios serán representadas por los resultados de salida obtenidos. Se proponen dos escenarios, los cuales arrojan distintos resultados (medibles en tiempo) para cada prueba.

Tras realizar la encuesta se seleccionaron aquellos tiempos que tarda la población en salir de sus hogares (ver tabla 7 del anexo D). En función a la tabla se crearon rangos de tiempos (ver figura 19), donde un 61% de las familias tarda en salir de sus hogares hasta 10 minutos. Además, se puede concluir que el 39% de la población provoca retrasos en la evacuación mayores a 10 minutos.

Figura 19: Tiempos que tardan las familias en salir de sus hogares.

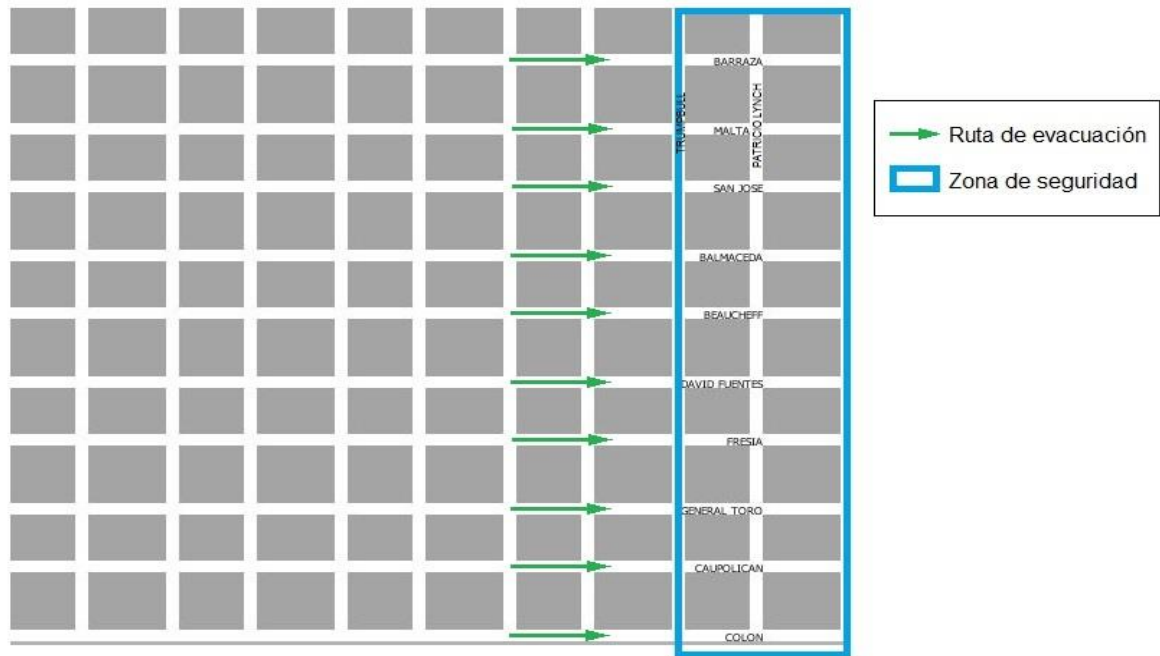


De esta forma, y bajo supuesto, el modelo de simulación consideró que el 39% de las personas (147 agentes) producen retrasos en la evacuación en ambos escenarios.

5.1 Primer escenario.

La evacuación es realizada en una red de calles que comienza en Barraza y finaliza en Colón. En este entorno, cada avenida representa una vía de evacuación por donde las personas se desplazan libremente hasta llegar a la zona de seguridad (ver figura 20).

Figura 20: Representación del primer escenario.



Como fue establecido, la velocidad máxima alcanza 1,4 m/s y la simulación se realizó con 378 personas²¹ de las cuales 147 de ellas provocan un retraso. Las restantes comienzan a evacuar desde el minuto 0.

Como tiempo de retraso se consideraron 5 minutos (21 *ticks*), ya que es un lapso aceptable para que las personas puedan reunir lo necesario antes de evacuar.

La simulación arrojó un tiempo total de evacuación de 19,04 minutos.

²¹ Proporción significativa del total de la población estudiada.

Los resultados de los gráficos fueron exportados a Excel, transformados a las unidades de tiempo utilizadas (minutos y segundos), y se obtuvo los gráficos de velocidad media alcanzada y cantidad de personas detenidas.

La figura 21 indica que las personas tardan alrededor de 3,5 minutos para superar la velocidad promedio de 1 m/s. Luego de este tiempo, la velocidad sigue en aumento hasta llegar a 1,2 m/s. Tras finalizar el recorrido, las personas disminuyen su velocidad hasta alcanzar 0,9 m/s.

La figura 22 muestra que, al comenzar la evacuación, la cantidad de personas detenidas es 147, las que aún no comienzan a evacuar tal como se había establecido en la descripción del escenario. Luego de 5 minutos (300 segundos), el número de personas detenidas disminuye considerablemente tras el comienzo de la evacuación de las personas que retrasan el proceso. Finalmente, los sujetos comienzan a detenerse paulatinamente tras llegar a la zona de seguridad.

Figura 21: Velocidad media de las personas, escenario 1.

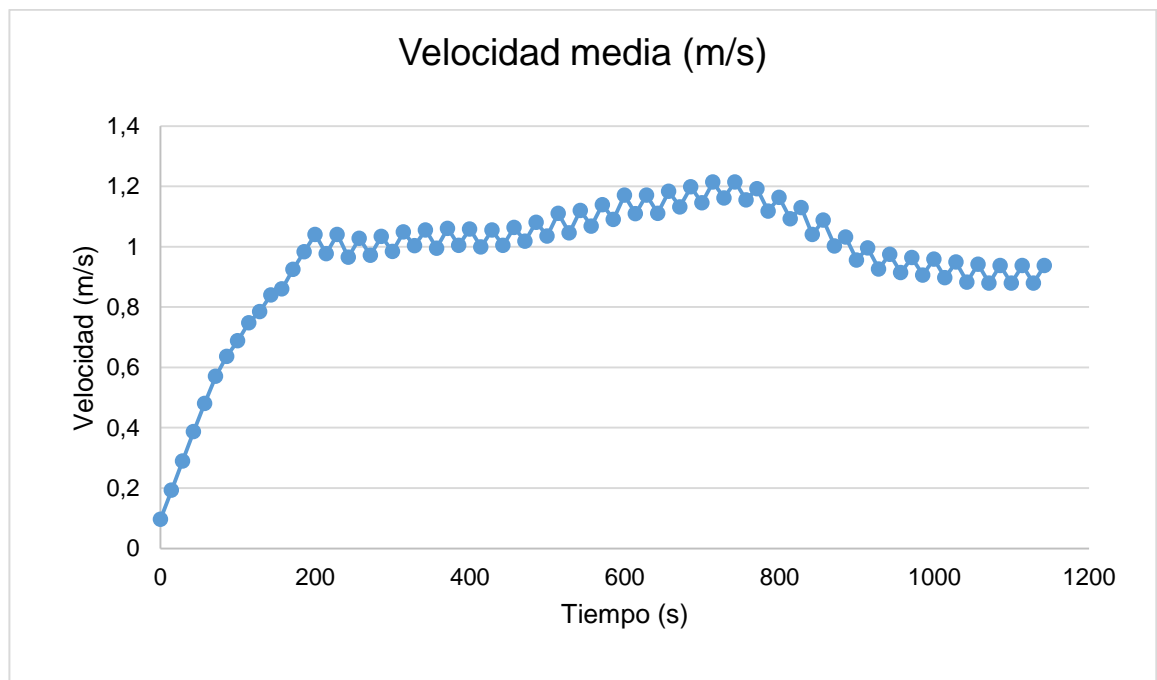
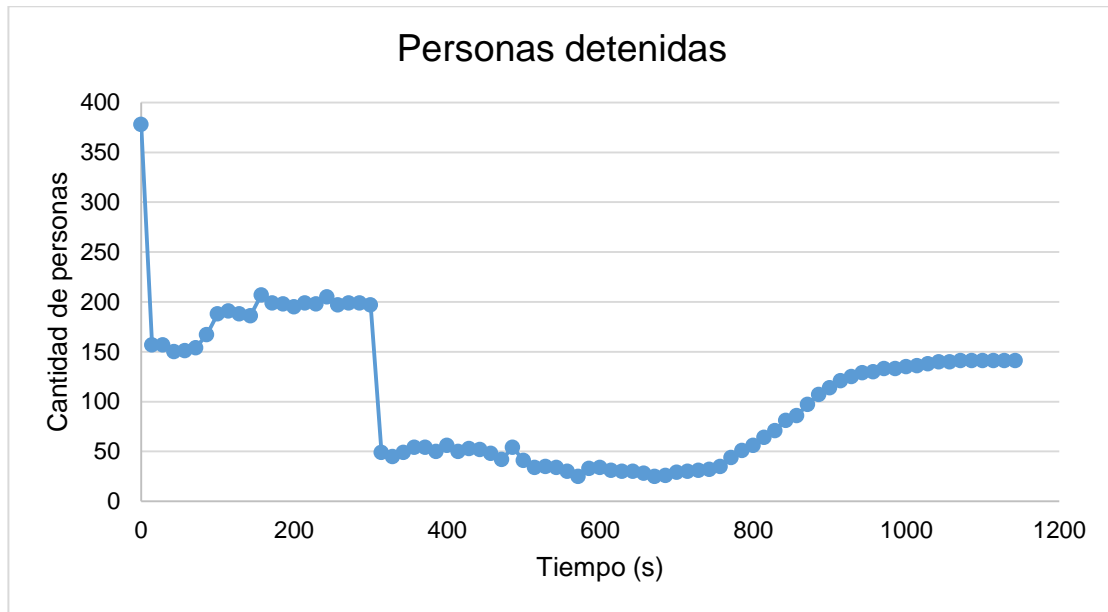


Figura 22: Personas detenidas, escenario 1.



5.2 Segundo escenario.

El segundo escenario plantea una evacuación, en la misma red de calles dispuesta en el primer escenario, con un cambio de las vías habilitadas para evacuar. Las personas siguieron las cuatro rutas de evacuación²² disponibles actualmente en el sitio de estudio (calles Balmaceda, David Fuentes, General Toro y Colón) hasta llegar a la zona segura (ver figura 23). La velocidad máxima sigue siendo de 1,4 m/s, y las personas que formaron parte de la simulación son 378.

También se consideran 147 personas que provocan retraso con un tiempo asociado de 5 minutos. Las personas restantes comienzan la evacuación desde el minuto 0.

La simulación arrojó un tiempo total de evacuación de 22,85 minutos, esto debido a un mayor desplazamiento de los agentes para llegar a las vías establecidas.

²² Las rutas de evacuación están disponibles en la página web del Sistema de Información Geográfica (SIG) <http://deptoriesgo.aeurus.cl/>

Figura 23: Representación del segundo escenario.

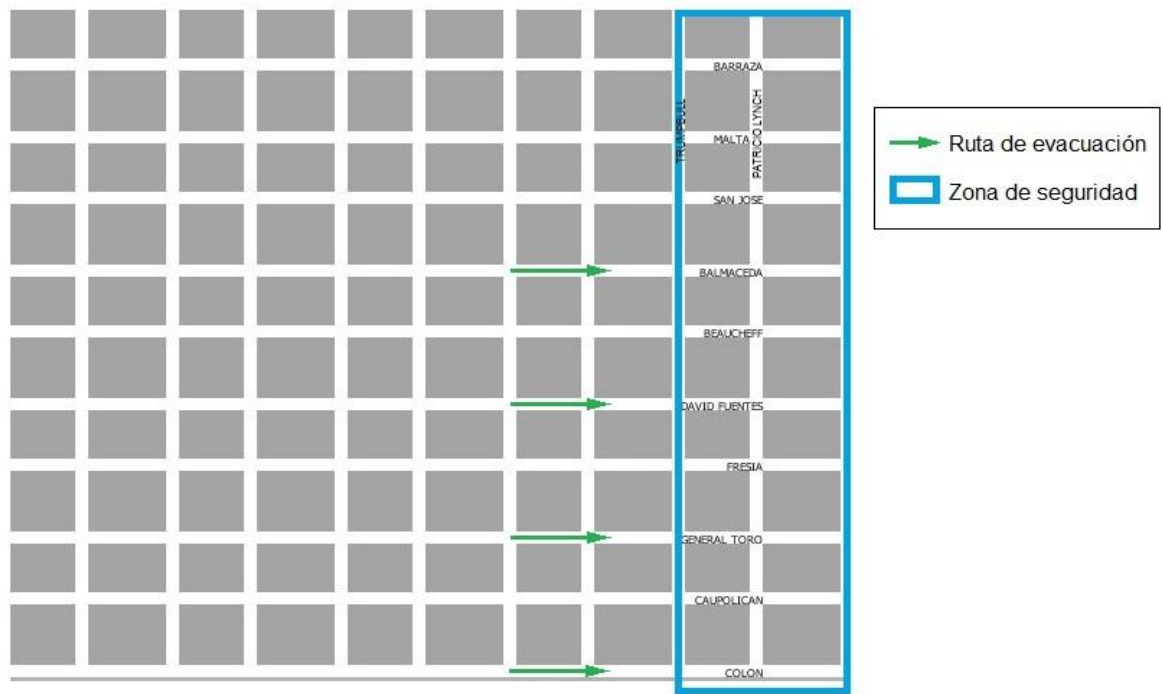
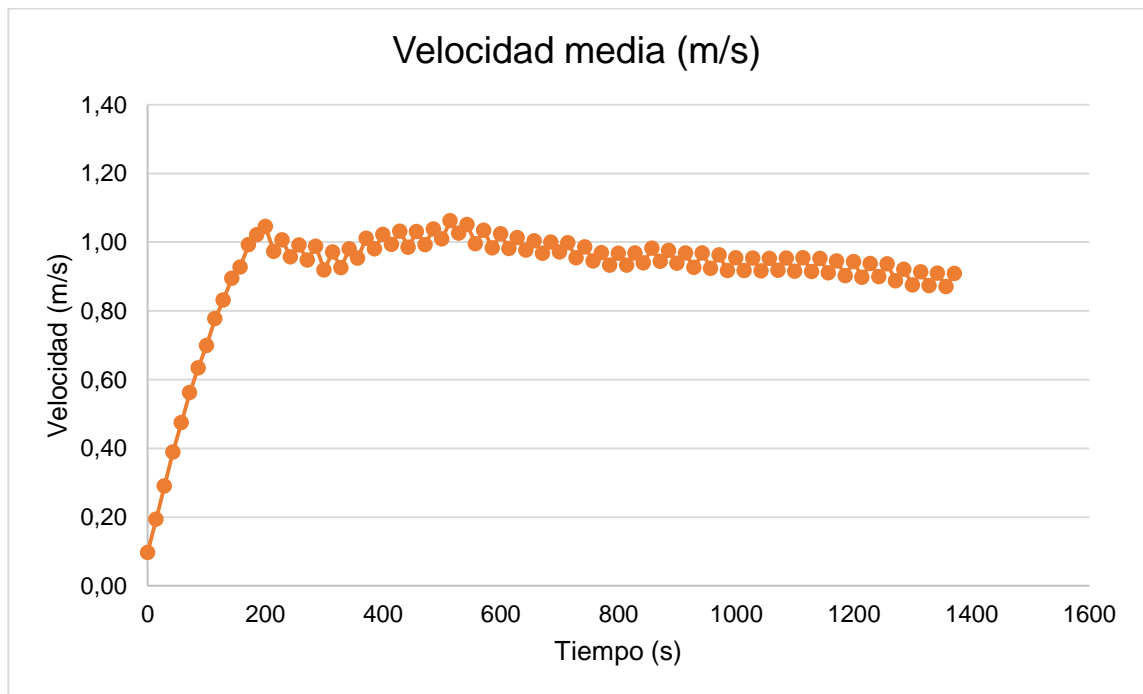
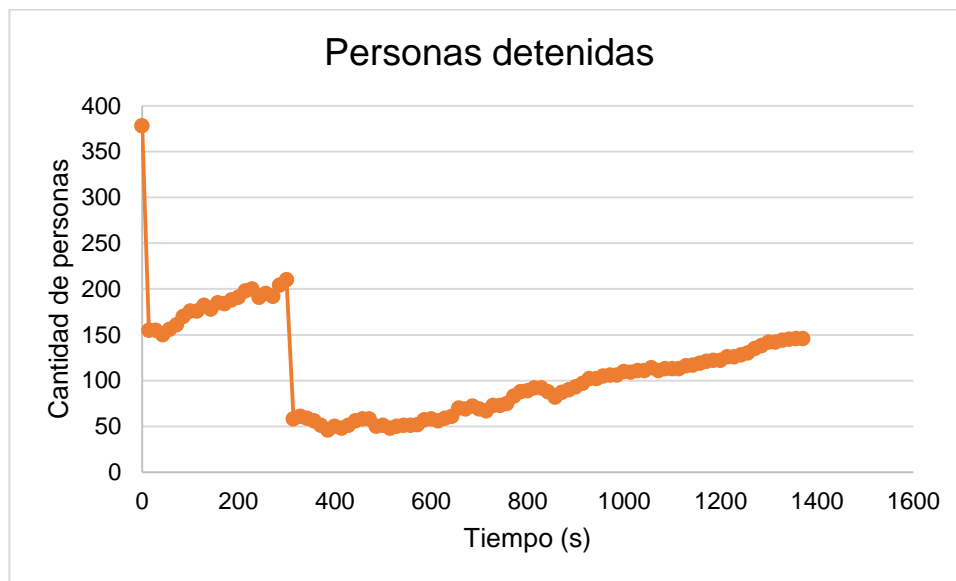


Figura 24: Velocidad media de las personas, escenario 2.



La figura 24 enseña que las personas superan la velocidad media de 1 m/s a los 3,5 minutos al igual que en el primer escenario. Tras este tiempo, la velocidad comienza a bordear 1 m/s. Luego, a partir de los 10 minutos disminuye constantemente hasta llegar a la zona segura, en donde las personas alcanzan una velocidad media de 0,9 m/s.

Figura 25: Personas detenidas, escenario 2.



Del gráfico personas detenidas (ver figura 25), se puede apreciar que en los primeros 5 minutos el número de personas detenidas aumenta hasta superar las 200 detenciones. Luego de esto, en el minuto 5, los sujetos que demoran el proceso comienzan a evacuar disminuyendo drásticamente el número de detenidos. Por último, al llegar a la zona de seguridad la tendencia es que aumente el número de personas detenidas.

CAPITULO IV: Conclusiones y recomendaciones.

Chile es un país propenso a fenómenos naturales de los cuales se destacan los terremotos y tsunamis. Estos últimos, son eventos físicos que tienen una alta complejidad al ser impredecibles. Es por esto, que nuestro país debe tener una alta preparación de respuesta ante este fenómeno para evitar pérdidas humanas.

Para tener una idea más completa del sector de estudio se realizó una encuesta que abordó los temas relacionados con la evacuación de la población ante alertas de tsunami. Tras las experiencias que dejó el terremoto y tsunami del 2010, un hecho que llamó mucho la atención es que casi un tercio de la población aún no tiene un plan familiar de evacuación delatando el poco conocimiento y subestimación de los riesgos que estos fenómenos naturales traen consigo.

Por otra parte, existe una proporción de la población que no evacúa cuando se producen terremotos con epicentros alejados a su región. Los tres principales motivos que impulsan estas decisiones son:

1. Un 65% de la población, por experiencias previas sabe que no llegarán grandes ondas al borde costero de su zona. A esto se le suma un 1% que no le dio importancia a la alerta de tsunami.
2. Un 10% no evacuó por temor al robo al dejar su vivienda desprotegida.
3. Por último, un 12% tras ver el oleaje del mar y observarlo en calma desisten de evacuar, generándose una falsa sensación de seguridad.

Más resultados de la encuesta indican que los tiempos asociados a la evacuación, es decir desde el minuto en que salen de sus casas hasta llegar a los cerros son relativamente seguros, encontrándose en su mayoría por debajo de los 25 minutos. Pero, por otra parte, los tiempos de desalojo de los hogares alargan la evacuación en algunos casos por más de 20 minutos alcanzando un tiempo total de evacuación que se encuentra en el rango de los 40 y 50 minutos. Estos hechos son preocupantes, ya que un tsunami puede arribar a la costa en menos de 30

minutos. Este proyecto sugiere que las alertas de evacuación sean más rápidas y concisas, para acortar el tiempo de reacción y respuesta de los habitantes de Talcahuano ante un fenómeno natural tan peligroso como lo es un tsunami.

El modelo de simulación propone dos escenarios de evacuación aplicados a un tsunami, donde el tiempo de reacción del 39% de la población es de 5 minutos y del 61% restante instantáneo, es decir comienzan a evacuar desde el minuto 0. El primer escenario propone que todas las calles sean vías de evacuación teniendo un total de 10 rutas. Mientras que el segundo dispone sólo las cuatro vías que actualmente posee el sector. El primer escenario arrojó un tiempo total de evacuación de 19,04 minutos y el segundo 22,85 minutos. La diferencia en los tiempos y tras analizar los gráficos se pudo concluir que mientras más vías disponibles de evacuación existan, menor es el tiempo involucrado en una evacuación. Esto se debe a que los tiempos de espera disminuyen y consigo las personas alcanzan mayor velocidad.

Para trabajos futuros es importante considerar los cambios que produciría la implementación de rutas de evacuación inclusivas para discapacitados y adultos mayores, estos últimos conforman un 39% de la población total.

Si bien progresivamente las muertes asociadas a fenómenos naturales han disminuido tras un mejor uso de alertas, no significa que el tema esté resuelto. Se necesita educar desde temprana edad sobre el tema, ya que corresponde al mejor método de prevención.

BIBLIOGRAFÍA.

Aránguiz R. (2014). Analysis of tsunami propagation in coastal areas: lesson from past tsunamis.

Aránguiz, R., Shibayama, T., & Yamazaki, Y. (2014). Tsunamis from the Arica-Tocopilla source region and their effects on ports of Central Chile. *Natural hazards*, 71(1), 175-202.

Aránguiz, R., Villagrán, M., & Eyzaguirre, G. (2011). Use of trees as a tsunami natural barrier for Concepcion, Chile-11th International Coastal Symposium. *Journal of Coastal Research*, (64), 450.

Banco Interamericano de Desarrollo (2003). Evaluation of interamerican development bank's operational policy on natural and unexpected disasters. Canobbio: Virginia Tech. <http://www.drmonline.net/drmlibrary/pdfs/DRM02.pdf>

Bu, R. C. (1996). *Simulación: un enfoque práctico*. Editorial Limusa.

Campos Romero, M. L. (2006). Los desastres naturales y el riesgo de Tsunamis. El Tsunami de Indonesia del 26 de diciembre de 2004. *Investigaciones geográficas*, nº 39, 2006; pp. 133-153.

Capote, J. A., Alvear, D., Abreu, O. V., Lázaro, M., & Cuesta, A. (2009). Modelado y simulación computacional de evacuación en edificios singulares. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1997, vol. 13, num. 3.

Cardona, Y., Toro, M., Vélez, J. I., & Otero, L. J. (2005). Modelación de tsunamis en la costa pacífica colombiana: caso Bahía de Tumaco. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (12), 43-54.

Castillo, E. J., Contreras, A., Ríos, R., & Flory, J. Q. (2013). Evaluación de vulnerabilidad ante tsunami en Chile Central. Un factor para la gestión local del riesgo. *Revista Geográfica Venezolana*, 54(1), 47-65.

Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile (2015). Grandes terremotos en Chile. <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/>

Cisternas, M. E. (2011). 1.4 Responsabilidad social de los geocientistas en el manejo de riesgos: Enseñanzas derivadas de la experiencia chilena con el megaterremoto del 27 de febrero 2010. *Geo risk management—a German Latin American approach*, 19.

Cordero E. (2014). Análisis de amenazas y propuestas de instrumentos para la reducción de estas frente a desastres naturales y socio-naturales en la comuna de Talcahuano.

Coss, R. (2015). Etapas de simulación.

Chuquisengo, O. & Gamarra, L. (2001). Propuesta metodológica para la gestión local de riesgos de desastre, una experiencia práctica.

Dash, N., & Gladwin, H. (2007). Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household. *Natural Hazards Review*, 8(3), 69-77.

Espinoza, G. (1990). El manejo de los desastres naturales: Conceptos y definiciones básicas aplicadas a Chile. *Medio Ambiente y Urbanización*, 30, 21-30.

Ferradas, P. (2004). Investigación, acción y participación en redes para la gestión de riesgos. *INDECI. Nuevas perspectivas en la investigación científica y tecnológica para la prevención y atención de desastres: Memoria del Seminario Taller Internacional sobre Prevención y Atención de Desastres en la Educación. Lima: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), 24-26*

Guajardo, F. (2011). Política pública, sociedad y riesgos naturales en Chile: El terremoto del 27/F y las lecciones para la institucionalidad. *Real Sociedad Geográfica*, 148, 127-144.

Izquierdo, L. R., Ordax, J. M. G., Santos, J. I., & Martínez, R. D. O. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y

mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de metodología de ciencias sociales*, (16), 85-112.

Keipi, K., Mora-Castro, S., & Bastidas, P. (2005). *Gestión de riesgo de amenazas naturales en proyectos de desarrollo: Lista de preguntas de verificación ("Checklist")*. Inter-American Development Bank

Kelton, W. D., & Law, A. M. (2000). *Simulation modeling and analysis*. Boston: McGraw Hill.

Lagos, M. (2000). Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile. *Isla*, 2, 09.

León, J., & March, A. (2014). Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: A case study of Talcahuano, Chile. *Habitat International*, 43, 250-262.

Marchetti, T. J., & García, A. J. (2003). Evaluación de plataformas para el desarrollo de sistemas multiagente. In *IX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.

Martínez del Camino, G. (2012). Simulaciones de emergencia en entornos 3D.

Medina, J. I. G. V. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales/Agent-based Modelling: A New Way of Exploring Social Phenomena. *Reis*, 91-109.

Medina S., Medina A., & González A. (2010). Reducir tiempos de espera de pacientes en el departamento de emergencias de un hospital utilizando simulación. *Industrial Data*, 13(1), 067-076.

Miguel, F. J., & Hassan, S. (2012). La investigación mediante simulación social multiagente. *Arroyo &*

Molina, J. M. (2010). Modelado y simulación mediante sistemas multiagente de la evacuación de personas de edificaciones de varios pisos en presencia de obstáculos.

Montenegro-Romero, T., & Peña-Cortés, F. (2010). Gestión de la emergencia ante eventos de inundación por tsunami en Chile: el caso de Puerto Saavedra. *Revista de Geografía Norte Grande*, (47), 63-80.

National Disaster Education (2004). Tsunamis. Washington D.C. http://disastereducation.org/library/public_2004/Tsunamis.pdf

North, M., Howe, T. R., Collier, N. T., & Vos, J. (2005, October). The repast symphony runtime system. In *Agent 2005 Conference on Generative Social Processes, Models, and Mechanisms*. Argonne, Illinois, USA: Argonne National Laboratory.

ONEMI (2015). Chile preparado. <http://simulacros.onemi.gov.cl/>

ONEMI (2015). ONEMI Tarapacá realizó seminario de Evacuación de Tsunami. <http://www.onemi.cl/noticia/onemi-tarapaca-realizo-seminario-de-evacuacion-de-tsunami/>

Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO) (2009). Análisis de sistemas de gestión del riesgo de desastres. *Environment*, 39(06), 57053360.

Páez, D., Arroyo, E., & Fernández, I. (1995). Catástrofes, situaciones de riesgo y factores psicosociales. *Mapfre Seguridad*, 57, 43-55

Pantoja, A., Moscoso, P. (2012). Modelación de rutas de evacuación ante amenaza de tsunamis basado en algoritmos ACO.

Paul, S. K. (2014). Determinants of evacuation response to cyclone warning in coastal areas of Bangladesh: A Comparative Study. *Oriental Geographer*, 55(1-2), 57-84.

Pérez, F., López, A., Peter, E., & Donoso, R. (2010). Simulación del movimiento de personas. Aplicación a la evacuación de buques. *RIAI*, 2(4), 78-88.

Pozo, R. (2014). Análisis de vulnerabilidad para la comuna de Talcahuano y propuestas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y antrópicos.

Rojahn, C., Heintz, J. A., Hortacsu, A., Clark, J. L., Ewing, L., Goltz, J. D. & Walsh, T. J. (2004). Vertical evacuation from tsunamis: A guide for community officials. *FEMA, (Ed)*.

Romero, H., Fuentes, C., & Smith, P. (2011). La geografía de los riesgos “naturales” y el terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010. *Geografía y ambiente en América Latina. México DF, UNAM, CIGA, Semarnat, INE, 251-282.*

Sampieri, R., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2010). Metodología de la Investigación. México: El Comercio SA.

Santos, G., & Aguirre, B. E. (2004). A critical review of emergency evacuation simulation models.

Sanz, J. J. G. (2003). Metodologías para el desarrollo de sistemas multi-agente. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 18, 51-63.*

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) (2005). *Tsunamis registrados en la costa de Chile.* http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf

Shibayama, T., Esteban, M., Nistor, I., Takagi, H., Nguyen, T., Matsumaru, R.,... & Ohtani, A. (2012). Implicaciones del tsunami de Tohoku del año 2011 para la gestión de desastres naturales en Japón. *Obras y proyectos, (11), 4-17.*

SHOA (2014). Recomendaciones para la preparación y respuesta ante tsunami. Santiago. http://www.shoa.cl/manual_de_tsunami/manual_de_tsunami.pdf

Sievers, H. (2000). El maremoto del 22 mayo de 1960 en las costas de Chile. *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 2a Edición, Santiago, Chile.*

Staub, G., & Bähr, H. P. (2014). Potencial de la percepción remota. Estudio basado en desastres naturales ocurridos durante los últimos 5 años en Chile. *Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, 20(1), 204-221.*

Tissue, S., & Wilensky, U. (2004). Netlogo: A simple environment for modeling complexity. In International conference on complex systems (pp. 16-21).

Figura 27: Charlas: Terremotos y tsunamis.



Tabla 4: Proyección de la población de Talcahuano.

Año	Número de habitantes	Variación
2002	250.348	-32%
2012	171.463	

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2012).

Tabla 5: Sexo de la población de Talcahuano

Año	Número de habitantes	
2002	Hombre	121.778
	Mujer	128.570
2012	Hombre	84.952
	Mujer	86.511

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2012).

Tabla 6: Cantidad de viviendas en Talcahuano.

Año	2008	2009	2010	2011	2012
Número de hogares	49.679	50.321	50.969	51.553	52.135

Fuente: Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2012).

Anexo B. Encuesta.

Fase 1: En la primera etapa se reevaluaron las variables de la investigación, tal que cumplieran con los objetivos y delimitaciones propuestos desde un inicio. Además, se definió a la zona inundable del sector centro de Talcahuano como foco de interés y en donde se recabaron los datos.

Por otra parte, la recolección de información tiene como propósito cuantificar las variables que afectan la decisión de evacuar ante un tsunami, y las repercusiones que generó en la población el terremoto y tsunami del 2010.

Fase 2: En este punto se revisó la información de interés que se encontraba en la literatura para estructurar una encuesta en base a las variables faltantes.

Fase 3: En la tercera fase se identificaron las dimensiones de cada variable de interés presente en la encuesta y también se establecieron los indicadores para cada dimensión. Esta fase corresponde al paso previo de la construcción de la encuesta, en donde la variable transita por varios pasos antes de llegar a la pregunta final como se muestra en la tabla 2 (ver capítulo 3.4.1).

Fase 4: En la cuarta etapa se definieron las características de la encuesta como el formato (tamaño y tipo de fuente entre los más destacados) y los tipos de preguntas. También se estableció que el cuestionario se aplicara *in situ* a los habitantes de la zona céntrica de Talcahuano.

La encuesta es de tipo descriptiva, lo que permite cuantificar las variables previamente detectadas y también otorga la posibilidad de identificar nuevas variables. Esta posee preguntas abiertas y cerradas, en donde el encuestado puede elegir entre diversas opciones la alternativa con la que más se identifica. Además, se da la posibilidad de que el encuestado pueda dar otra opción en caso que una alternativa no represente su experiencia en el proceso de evacuación.

Para determinar el tamaño de la población a encuestar se utilizó la fórmula del tamaño muestral para una población finita, la cual se presenta a continuación:

$$n = \frac{N \times Z^2 \times p \times (1 - p)}{(N - 1) \times e^2 + Z^2 \times p \times (1 - p)}$$

Donde:

n= Tamaño de la muestra que se quiere obtener.

N= Población total (28.021 habitantes).

Z= Nivel de confianza (1,96 asociado a un 95% de confiabilidad).

p= Proporción que se espera encontrar (0,5).

e= Margen de error máximo admisible (5%).

Luego de realizar los cálculos, se obtuvo como resultado que 378 sujetos debían ser encuestados para obtener datos con un 95% de confianza.

Fase 5: En esta fase se creó la encuesta en base a la tabla 2 y siguiendo el formato definido en la etapa anterior.

Fase 6: Punto en el cual la encuesta fue aplicada a una pequeña muestra para evaluar la estructura, coherencia y claridad de las preguntas. Una vez que el cuestionario no presentó errores se produjo la validación de este, dando paso a la elaboración de la versión final.

Fase 7: En esta fase, tras validar la encuesta y hacer los cambios respectivos en su formato, se llegó a la construcción definitiva de la encuesta que se muestra a continuación.

Figura 28: Formato de la encuesta.



Encuesta: Evacuación de Talcahuano.

La siguiente encuesta tiene por finalidad conocer el proceso de toma de decisiones de los habitantes del sector centro de Talcahuano durante la evacuación de esta zona, y como actuaría actualmente la comunidad tras la experiencia del terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010.

La encuesta es el resultado de dos convenios de cooperación. El primero entre la Universidad Católica De La Ssma. Concepción (Observatorio de Gestión de Desastres de la Facultad de Ingeniería) y la Ilustre Municipalidad de Talcahuano. Y el segundo, entre la UCSC y la Universidad Nacional Andrés Bello (Laboratorio de Simulación en Desastres).

La actividad en terreno se encuentra liderada por la profesora María Teresa Bull y el estudiante de último año de Ingeniería Civil Industrial, Sr. Franco Kröll Yáñez.

Le agradecemos de antemano su participación.

Indicación: Encierre en un círculo la alternativa señalada por el encuestado y en caso que sea necesario completar con letra legible los espacios establecidos para una respuesta.

Pregunta 1. ¿Género del encuestado? (Inspección visual)

- a) Masculino.
- b) Femenino.

Pregunta 2. ¿En qué rango se encuentra su edad?

- a) 18 – 30 años.
- b) 31 – 45 años.
- c) 46 – 60 años.
- d) 61 – 75 años.
- e) 76 años o más.

Pregunta 3. ¿De cuántas personas se compone su grupo familiar?

R: _____.

Pregunta 4. ¿Tiene experiencias previas en evacuación de tsunami?

a) Sí.

b) No.

Pregunta 5. ¿Posee un plan familiar de evacuación de tsunami?

a) Sí.

b) No.

Pregunta 6. ¿Conoce las zonas seguras de Talcahuano?

a) Sí.

b) No.

Pregunta 7. Con respecto al terremoto del Coquimbo el mes de septiembre del año 2015, ¿se encontraba en el sector céntrico de Talcahuano en el instante en que este ocurrió?

a) Sí. (Continuar con la pregunta N°8)

b) No. (Ir a la pregunta N°10)

Pregunta 8. Dada la alerta de tsunami para todo el borde costero de Chile, ¿usted realizó la evacuación?

a) Sí (Ir a la pregunta N°10).

b) No (Continuar con la pregunta N°9).

Pregunta 9. ¿A qué se debió su decisión?

a) Según experiencias previas sabía que no llegarían grandes olas al borde costero.

b) Por temor al robo, al dejar su vivienda desprotegida.

c) Al observar el mar en calma, desistió evacuar.

d) Otro _____.

Pregunta 10. Con respecto a la experiencia vivida en el terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010, ¿en qué lugar se encontraba al momento del terremoto?

R: _____.

Pregunta 11. ¿Qué acciones consideró antes de evacuar? (Selección múltiple).

- a) Recopilar implementos básicos como agua, abrigo, alimento, etc.
- b) Esperar que todo el grupo familiar se encuentre listo para evacuar.
- c) Dejar cerradas puertas y ventanas para evitar posibles robos.
- d) Reunir dinero y las pertenencias de valor.
- e) No considera nada.
- f) Otro _____.

Pregunta 12. Aproximadamente, ¿Cuánto tiempo tardó en salir de su hogar desde el momento en que ocurrió el terremoto?

R: _____.

Pregunta 13. Aproximadamente, ¿Cuánto tiempo tardó en salir de su hogar desde el momento en que se enteró de la alerta de tsunami?

R: _____.

Pregunta 14. ¿Cuánto tiempo transcurrió desde el momento en que salió de su hogar hasta encontrarse en una zona segura?

R: _____.

Pregunta 15. ¿Hacia qué sitio seguro evacuó?

R: _____.

Pregunta 16. ¿Qué medio de transporte utilizó para evacuar?

- a) Pie.
- b) Automóvil.
- c) Motocicleta.
- d) Bicicleta.
- e) Otro _____.

Pregunta 17. ¿Cómo se enteró de la evacuación de tsunami?

- a) Vecino/Familia.
- b) Radio.
- c) Bombero/Policía (sirena/megáfono).
- d) Teléfono.
- e) No recuerda.

f) Otro _____.

Pregunta 18. ¿Le informó a alguien que estaba evacuando?

a) Sí.

b) No.

Pregunta 19. ¿Cuánto tiempo se mantuvo en la zona segura hasta regresar a su hogar?

R: _____.

Pregunta 20. ¿En cuánto dinero estima la pérdida de sus bienes?

R: _____.

Pregunta 21. Entendiendo que vive en una zona de inundación de tsunami, ¿posee su propiedad seguro contra desastres naturales?

a) Si.

b) No.

Pregunta 22. Entendiendo los riesgos que implica vivir en esta zona ¿ha tomado medidas para resguardar sus bienes?

a) Si.

b) No.

Fase 8. En el entrenamiento del personal se dio a conocer el propósito del estudio y el rol que debían cumplir, dando énfasis en la objetividad que deben tener para aplicar la encuesta, de modo que los resultados representen fielmente las respuestas de la población de interés.

Fase 9. La encuesta fue respaldada por la Ilustre Municipalidad de Talcahuano y el Departamento de Gestión Integral de Desastre de misma ciudad.

Fase 10. La encuesta fue aplicada cara a cara en el sector bajo estudio y fue tomada durante 2 días por 8 colaboradores. El traslado de un sector a otro fue realizado por una van y el trabajo en terreno fue liderado por la profesora María Teresa Bull y el estudiante de Ingeniería Civil Industrial Franco Kröll.

Fase 11. En esta fase los resultados de cada encuesta fueron codificados en una planilla Excel, en donde a cada dato obtenido se le asignó un valor representativo para su posterior análisis.

Figura 29: Número de encuestados por manzana.

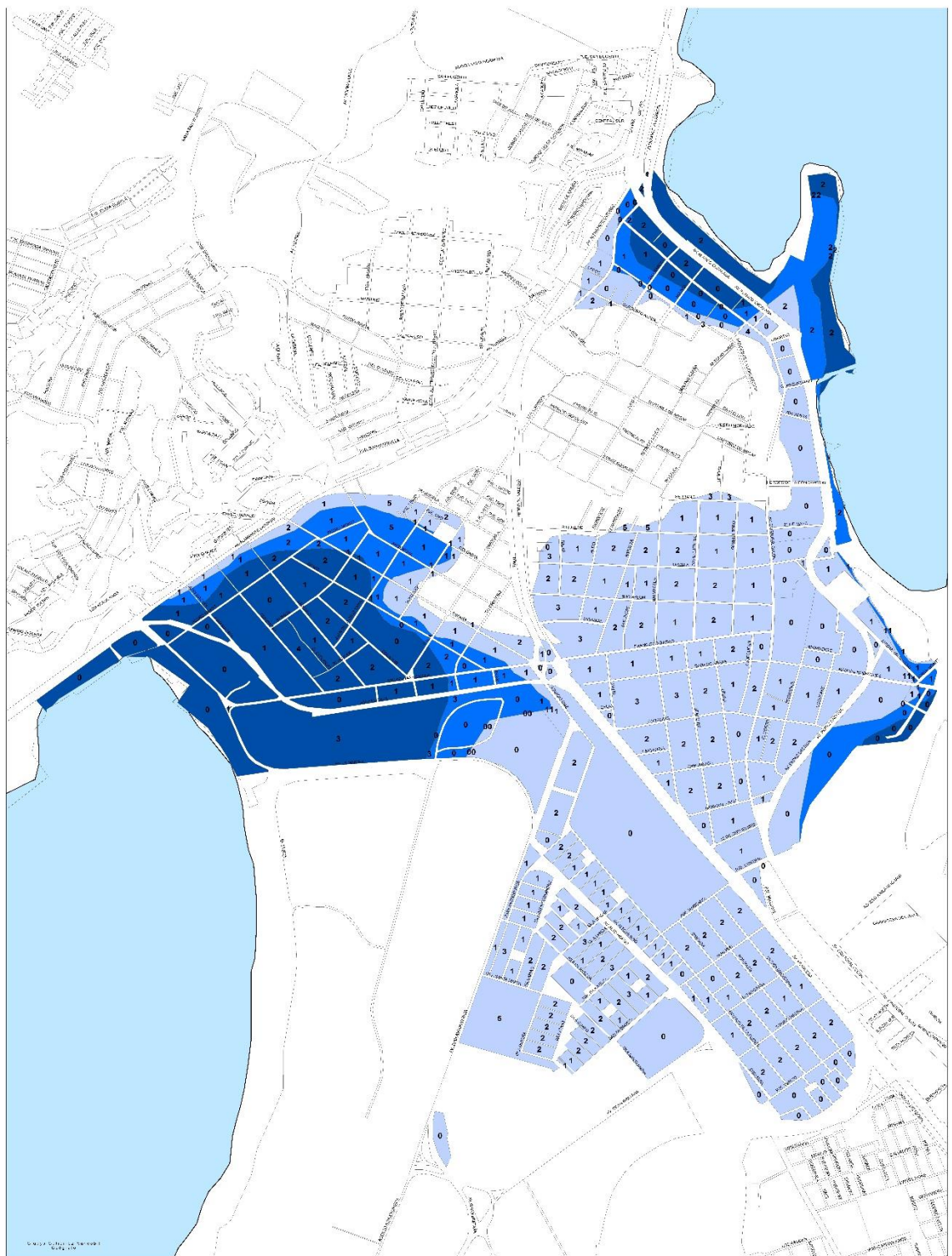


Figura 30: Género de los encuestados.

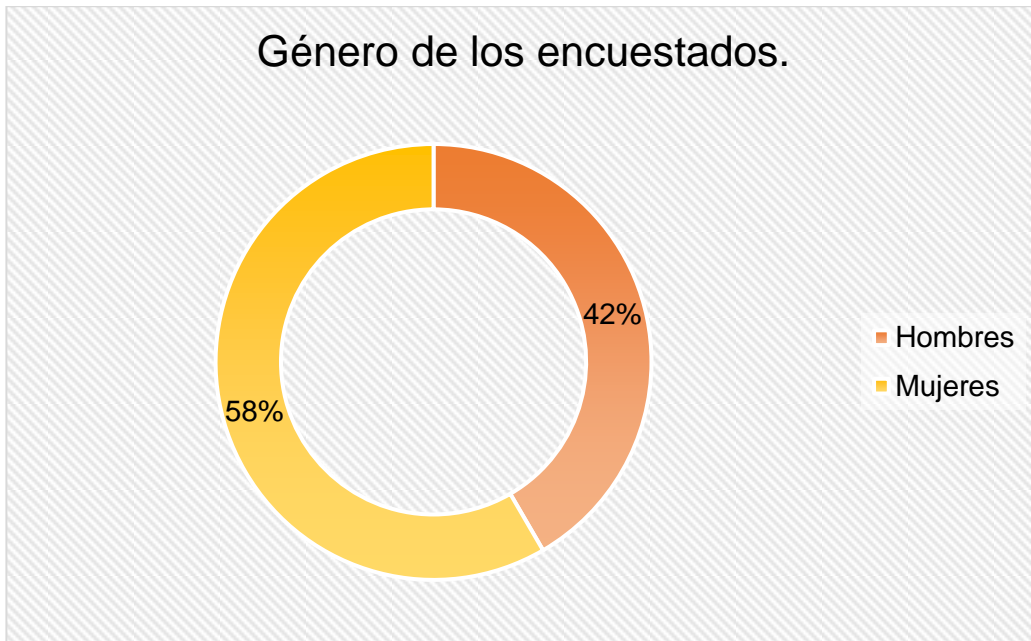


Figura 31: Rango etario de encuestados.

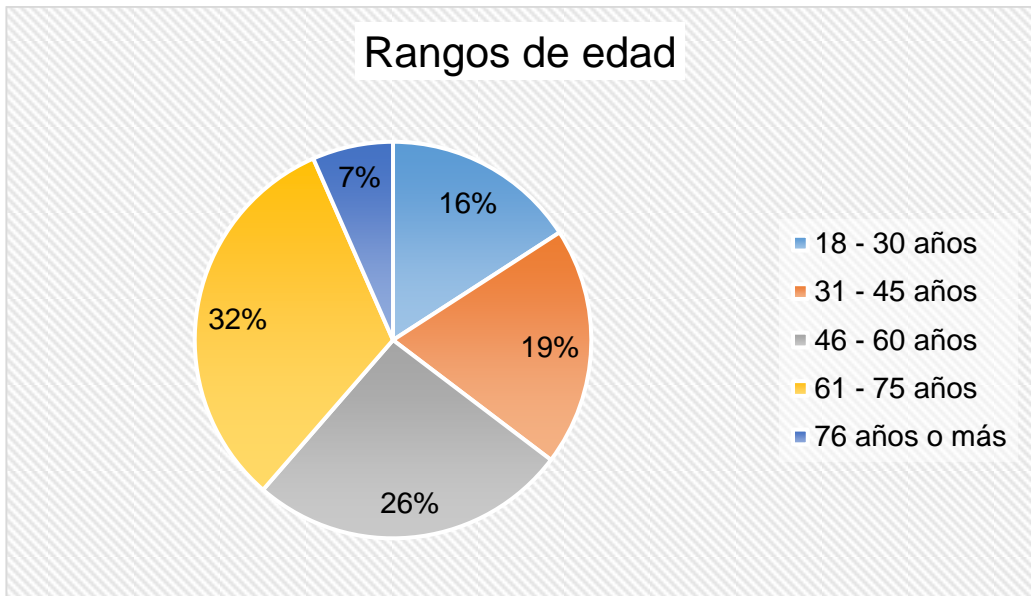


Figura 32: Conocimiento de zonas seguras de Talcahuano.

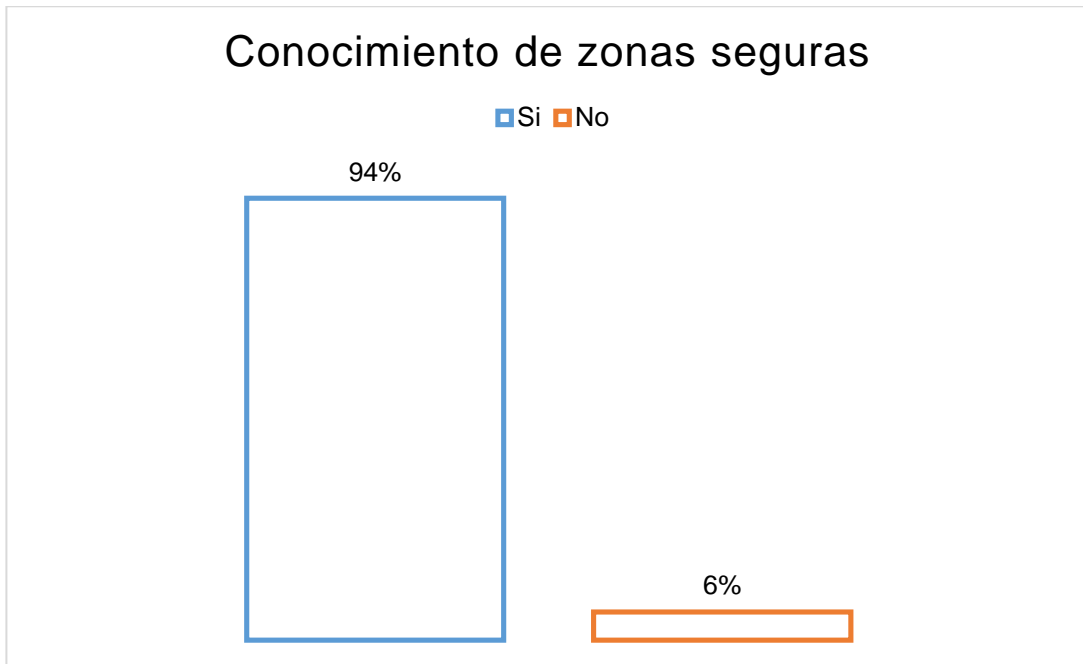


Figura 33: Evacuación en Talcahuano tras terremoto de Coquimbo.

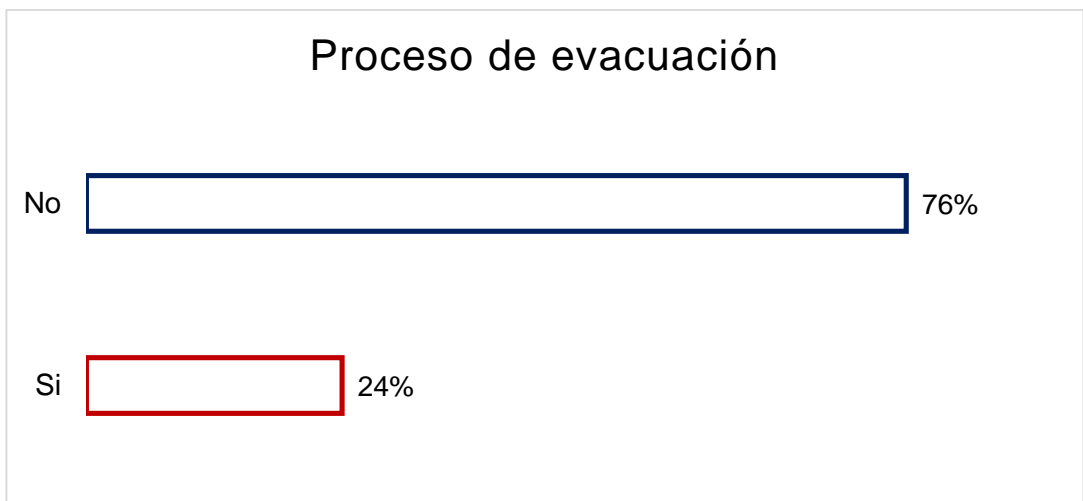


Figura 34: Localización de la población, terremoto 2010.

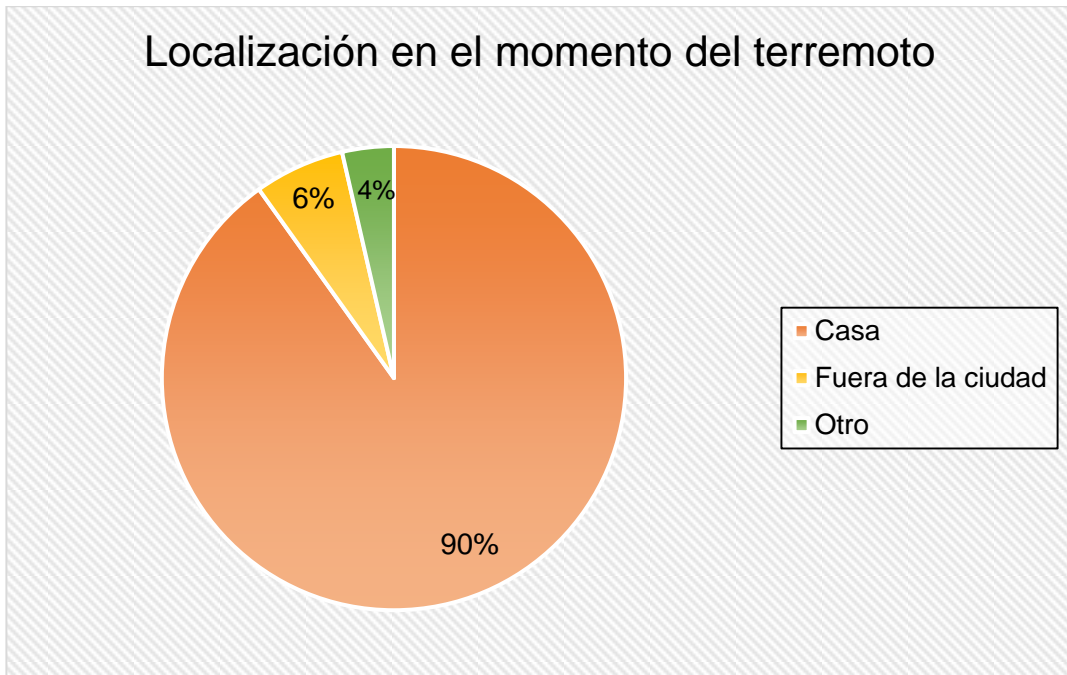


Figura 35: Destinos de evacuación.

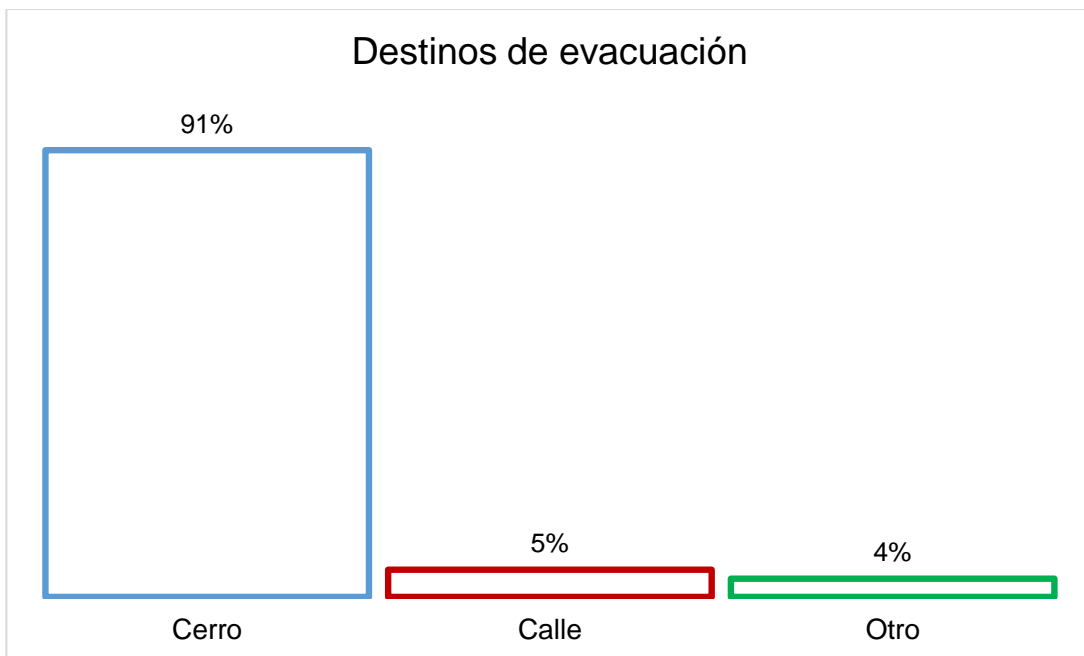
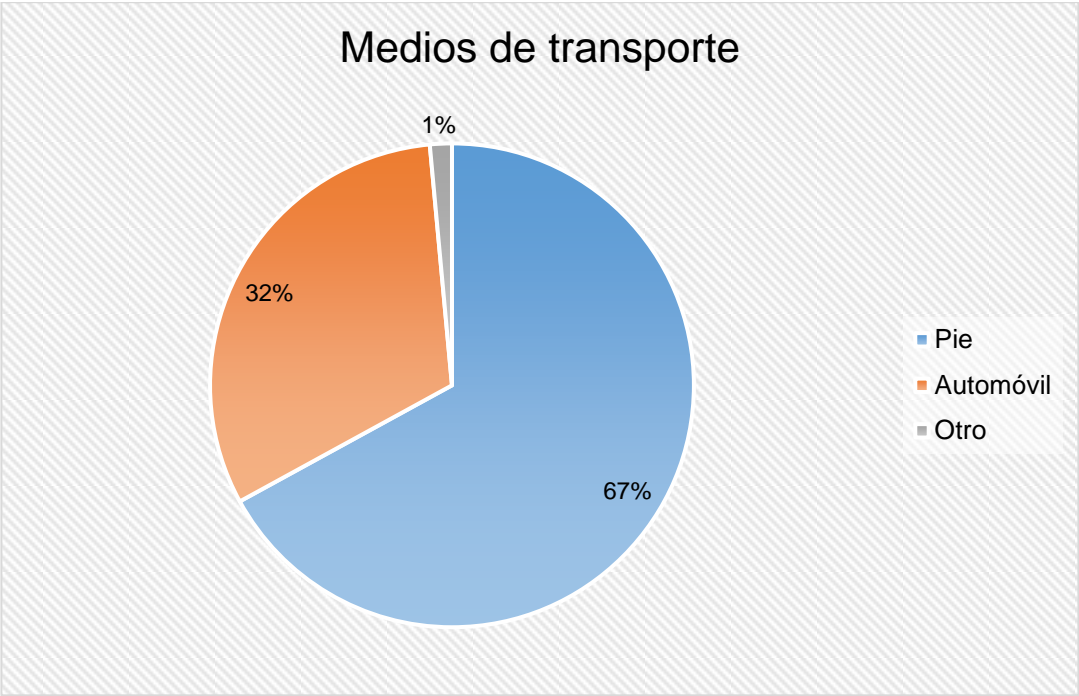


Figura 36: Medios de transporte utilizados para evacuar.



Anexo C. Programación de Netlogo.

Figura 37: Código de rutas aleatorias de evacuación.

```
;; intersecciones primera columna
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones segunda columna
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones tercera columna
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 1) [set heading 90]
```

if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones cuarta columna
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones quinta columna
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones sexta columna
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 17) [set heading 90]

if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones séptima columna
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones octava columna
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -27) [set heading 90]

```
;; intersecciones novena columna
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -27) [set heading 90]
;; intersecciones decima columna
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 23) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 17) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 12) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 1) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -10) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -21) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -27) [set heading 90]
```

Figura 38: Código de rutas establecidas de evacuación.

```
;;intersecciones primera columna
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 6) [set heading 90]
```

if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -27 and pycor = -27) [set heading 90]
 ;;intersecciones segunda columna
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -20 and pycor = -27) [set heading 90]
 ;;intersecciones tercera columna
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -14 and pycor = -27) [set heading 90]
 ;;intersecciones cuarta columna
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 23) [set heading 180]

if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -7 and pycor = -27) [set heading 90]
;;intersecciones quinta columna
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = -1 and pycor = -27) [set heading 90]
;;intersecciones sexta columna
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -21) [set heading 180]

if up-person? = (pxcor = 6 and pycor = -27) [set heading 90]
;;intersecciones séptima columna

if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 12 and pycor = -27) [set heading 90]
;;intersecciones octava columna

if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 19 and pycor = -27) [set heading 90]
;;intersecciones novena columna

if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -5) [set heading 90]

```
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 25 and pycor = -27) [set heading 90]
;;intersecciones decima columna
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 23) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 17) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 12) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 6) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = 1) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -5) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -10) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -16) [set heading 90]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -21) [set heading 180]
if up-person? = (pxcor = 32 and pycor = -27) [set heading 90]
```

Figura 39: Gráfico del modelo, velocidad media.



Figura 40: Gráfico del modelo, personas detenidas.



Anexo D. Análisis y experimentación.

Tabla 7: Tiempos que tardan las familias en salir de sus hogares.

Tiempos (en minutos).					
2	15	30	5	17	10
10	10	5	10	5	10
5	15	20	10	10	30
7	20	15	10	5	5
30	10	3	10	15	5
5	5	15	20	15	5
90	10	10	5	120	5
20	80	15	30	5	10
2	5	8	15	30	15
10	10	0	10	120	3
10	10	30	20	5	5
5	10	0	10	10	5
10	20	30	5	180	10
5	15	5	60	60	10
20	15	5	5	10	10
5	5	120	5	30	5
10	30	0	3	0	10
15	10	5	8	15	7
0	30	60	5	20	10
15	15	15	3	0	5
5	5	0	10	15	3
7	10	5	5	5	5
0	10	60	30	5	10
4	15	0	20	60	5
5	5	0	60	5	5
5	20	5	180	10	240
5	5	120	5	5	10
5	90	20	30	30	3
5	3	30	15	0	1
10	7	15	10	10	10
10	5	15	5	5	5
360	7	30	15	0	30
20	15	5	5	20	15
5	30	30	15	15	5
10	5	30	10	2	30
15	20	60	15	10	15
60	15	10	5	5	25
5	5	30	5	0	15
0	2	0	240	5	10

20	5	30	10	20	5
5	15	20	60	10	5
40	30	20	5	8	3
2	20	10	5	30	10
5,5	30	5	5	5	15
5	30	5	15	2	10
					15