



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial y Sistemas
ICS1113-Optimización

Informe 4

Minimización del tiempo de evacuación ante tsunamis

Grupo 46

Nicolás Bobadilla F. 21207623 sección 1
Vanessa Castro J. 22643591 sección 2
Florencia Lazo A. 22640401 sección 5
Felipe Lira Z. 20627963 sección 4
Rodolfo Loyola F. 22205136 sección 2
José Nordenflycht L. 22637907 sección 4
Diego Torres B. 20640323 sección 4

Fecha entrega: 22 de noviembre de 2024

Índice

1. Descripción del problema	3
1.1. Contextualización del problema	3
1.2. Impacto del problema	4
1.3. Objetivo	4
2. Modelación del problema	5
2.1. Conjuntos	5
2.2. Parámetros	5
2.3. Variables de decisión	5
2.4. Función objetivo	5
2.5. Restricciones	5
3. Definición de datos	7
3.1. Población a evacuar	7
3.2. Cuadrantes	7
3.3. Tiempos	8
3.4. Capacidad de ocupación en evacuación vertical	8
3.5. Cantidad de zonas seguras por cuadrante	8
4. Resolución	8
4.1. Implementación computacional	8
4.2. Solución y valor objetivo	8
5. Validación de resultados	8
6. Bibliografía	9

1. Descripción del problema

1.1. Contextualización del problema

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo. En los últimos 20 años, el país ha experimentado 12 sismos con una magnitud de momento superior a 7 (Mw), afectando a decenas de miles de personas (Ramírez, s.f.). Entre los eventos más significativos se encuentran: el terremoto de Maule en 2010, con una magnitud de Mw 8.8 en la zona central de Chile; el terremoto de Iquique en 2014, con una magnitud de Mw 8.2 en el norte; el terremoto de Illapel en 2015, con una magnitud de Mw 8.3 en la región central; y el terremoto de Chiloé en 2016, con una magnitud de Mw 7.6 en el centro-sur del país. Sin embargo, no se puede olvidar el devastador terremoto de Valdivia en 1960, que con una magnitud de Mw 9.5, cobró la vida de más de dos mil personas y continúa siendo el evento telúrico de mayor magnitud registrado por un acelerógrafo. A su vez, “la ubicación geológica de Chile, en la zona de subducción entre las Placas de Nazca y Sudamericana, ha hecho que los tsunamis sean recurrentes, causando una gran problemática para la población” (Barrenechea et al., 2019).

Los daños asociados a tsunamis en el periodo 1998-2017 escalan a más de 250000 personas damnificadas y 280 billones de dólares en pérdidas asociadas (Imamura et al., 2019). Eventos como el tsunami asociado al terremoto del 27F en Chile, el tsunami de Tohoku, 2011, en Japón, son solo algunos de los ejemplos más recientes que podemos encontrar en el sistema del cinturón de fuego del Pacífico. En el océano pacífico se han concentrado más de dos tercios de los tsunamis ocurridos en las últimas décadas, causando daños a incluso más allá de 1000 km de la generación de las olas (Suppasri et al., 2012).

Durante la ocurrencia de un terremoto, una evacuación oportuna es uno de los métodos más efectivos e importantes para la preservación de vidas, particularmente en regiones donde el intervalo entre la generación de un tsunami y su impacto inicial puede ser de apenas 10 minutos. Este fenómeno fue claramente evidenciado en los sismos de 2014 y 2015 en Pisagua e Illapel, donde los tsunamis asociados llegaron en menos de 15 minutos, restringiendo significativamente la capacidad de respuesta de la población en riesgo (León et al., 2021).

Para abordar la problemática, se analiza el modelo de evacuación vertical, que implica utilizar un edificio o infraestructura con al menos ocho pisos como zona segura para ascender lo máximo posible antes de que el agua de un tsunami inunde las áreas más bajas (CIGIDEN, 2024). Este enfoque se complementa con la investigación titulada *«El papel de la forma urbana física del entorno construido en el apoyo a las evacuaciones rápidas por tsunamis»* (León, Mokrani, et al., 2019).

En línea con lo anterior, se busca que el SENAPRED sea capaz de implementar el modelo, que se desarrollará en los apartados siguientes, en aquellas regiones susceptibles a los daños provocados por un Tsunami, como ciudades que tienen más del 10% de su población expuesta a la amenaza de tsunamis, entre ellas Talcahuano, Iquique, Arica, Penco, Hualpén, Cartagena, Lota, Constitución y Viña del Mar (León et al., 2019).

Se estima que la implementación del modelo deba ser en un plazo máximo de 2 años, teniendo en cuenta que los eventos de megaempuje que suelen producir grandes tsunamis transpacíficos, ocurren a una tasa promedio de dos por siglo en toda la zona de contacto de placas en Chile (Ruiz & Madariaga, 2018), aunque no se debe dejar de lado que, debido a la difícil predicción de

la ocurrencia de un terremoto, su anticipación es compleja, lo que podría llevar a que este suceda en un tiempo mucho más corto de lo esperado. Por otro lado, una vez empieza la catástrofe el tiempo máximo de implementación del modelo es de 20 minutos, dado que este es el tiempo que permite la evacuación a una persona a una zona segura, ya sea por evacuación vertical o tradicional dependiendo de la magnitud del terremoto.

1.2. Impacto del problema

El trabajo de León et al. (2024), muestra que en Viña del Mar, los tiempos de evacuación entre las zonas más expuestas a tsunamis y los puntos de encuentro (PE) pueden ser mayores a 30 minutos, lo que no es suficiente, ya que durante los primeros 20 minutos de ocurrido el terremoto alrededor de un 38% de la población no llegaría a zonas de seguridad.

Al realizar un diagnóstico de los lugares más expuestos, como la población Vergara de Viña del Mar, luego de incluir 14 edificios que cumplan con los criterios para ser utilizados en una evacuación vertical, se podría reducir significativamente los tiempos de evacuación, logrando que toda la población llegue a una zona segura dentro de los primeros 20 minutos transcurridos después de un terremoto.

A lo largo de la historia sísmica del país, uno de los mayores costos ha sido la pérdida de vidas humanas, como se vio en 2010 con al rededor de 500 víctimas mortales, 150 por causa de tsunami (Pallardy, 2024). Al implementar la evacuación vertical y optimizar los tiempos de evacuación, el número de víctimas podrá disminuir en gran manera a un índice de mortalidad de 1%.

Dentro de los criterios necesarios para que un edificio sea seleccionado para la evacuación vertical se consideran: tener una estructura acorde a la norma NTM007 (MINVU, 2013), una altura superior a 8 pisos, un uso público para garantizar el acceso de las personas y una superficie adecuada en relación con el número esperado de evacuados.

En resumen, la implementación de la evacuación vertical puede ayudar en gran manera a minimizar el tiempo de evacuación en zonas propensas a tsunamis, reduciendo a su vez las posibles víctimas frente a este desastre natural.

1.3. Objetivo

En el presente informe, se busca crear un modelo lineal que optimice la cantidad de personas evacuadas frente a un tsunami, a un porcentaje de evacuación del 100%, considerando que una evacuación exitosa solo se logra si los tiempos desde el inicio del proceso hasta la evacuación completa son inferiores al umbral actualmente establecido, que oscila entre 4 y 14 minutos (León et al., 2021). Esto se complementa con la implementación del modelo de evacuación vertical, que podría proteger a las personas en el peor de los escenarios, como un tsunami con características similares al del terremoto de Valdivia. En resumen, se prioriza la preservación y protección de la vida humana ante este posible desastre natural, evitando situaciones fatales y salvando la mayor cantidad de vidas posible.

De este modo, el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) asume la responsabilidad como tomador de decisiones del proyecto, dado que posee la capacidad para implementar el modelo propuesto. A su vez, esta institución tiene como misión contribuir a generar conciencia y acciones que reduzcan el riesgo de desastres en el país, a

través de planificar, coordinar, organizar, supervisar (...), en las fases de mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación» (Onemi, 2024).

En línea con lo anterior, el tomador de decisiones debe determinar hacia que zona segura evacúa cada persona, en que cuadrante evacúa y el tipo de evacuación que realiza (vertical o tradicional).

2. Modelación del problema

2.1. Conjuntos

- P : Conjunto de personas, indexado por p .
- Z : Conjunto de zonas seguras (verticales y tradicionales), indexado por z .
- Q : Conjunto de cuadrantes de la ciudad, indexado por q y j .
- T : Conjunto de tiempo, en minutos, indexado por t .

2.2. Parámetros

- B_{pq} : Valor binario que dice si la persona p pertenece al cuadrante q .
- γ_{zq} : Valor binario que dice si la zona z pertenece al cuadrante q .
- d_z : Distancia a la zona segura z dentro de su cuadrante.
- v_p : Velocidad de traslado de persona p .
- C_z : Capacidad máxima de personas que puede refugiar la zona segura z .
- f_{qj} : Tiempo de viaje entre los cuadrantes q y j .
- M : Un valor suficientemente grande para garantizar la validez de la restricción.
- h_z : Parámetro binario que indica si zona segura z es vertical o no.
- Φ_q : Parámetro binario que indica si cuadrante q fue afectado por el tsunami.
- T : Techo de tiempo para evacuar.
- K : Cantidad mínima de personas a evacuar.

2.3. Variables de decisión

- $\alpha_{pzt} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que indica si la persona p comienza a evacuar hacia la zona segura z en el instante de tiempo t .
- X_{zt} : Variable que indica la cantidad de personas en la zona segura z en tiempo t .
- $w_{pqt} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que indica si la persona p se encuentra en un cuadrante q en el tiempo t .
- $\theta_{pqjt} \in \{0, 1\}$: Variable binaria que indica si la persona p decide viajar a un cuadrante j desde un cuadrante q en el tiempo t .

2.4. Función objetivo

Se busca maximizar el número de personas evacuadas, considerando un tiempo máximo, las distancias a las zonas seguras, la capacidad de estas zonas y las velocidades de evacuación asociadas a las diferentes personas:

$$\max \sum_{z \in Z} X_{zT}$$

2.5. Restricciones

1. Restricción de no-negatividad y variables binarias (naturaleza de las variables):

$$\alpha_{pzt}, w_{pqt}, \theta_{pqjt} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, \forall z \in Z, \forall (q, j) \in Q, \forall t \in T$$

$$X_{zt} \in Z \quad \forall z \in Z, \forall q \in Q, \forall t \in T$$

2. Restricción de evacuación única:

Cada persona debe ser evacuada exactamente a un punto seguro:

$$\sum_{z \in Z} \sum_{t \in T} \alpha_{pzt} \leq 1 \quad \forall p \in P$$

3. Restricción valor α_{pzt} :

Sólo activar en caso de que la persona se traslade a la zona:

$$\alpha_{pzt} \leq \frac{w_{pqt} + \gamma_{zq}}{2} \quad \forall p \in P, \forall z \in Z, \forall q \in Q, \forall t \in T$$

4. Restricción a cambio de cuadrante:

No se puede viajar al mismo cuadrante de origen:

$$\sum_{t \in T} \theta_{pqjt} \leq 1 - B_{pj} \quad \forall p \in P, \forall (q, j) \in Q$$

5. Condición inicial de cuadrante:

Cada persona inicia en su cuadrante de origen:

$$w_{pq1} = B_{pq} - \theta_{pqj1} \quad \forall p \in P, \forall (q, j) \in Q$$

6. Restricción de cuadrante único:

Cada persona solo puede estar en un cuadrante a la vez:

$$\sum_{q \in Q} w_{pqt} = 1 \quad \forall p \in P, \forall t \in T$$

7. Posicionamiento de cuadrante:

Cada persona está en el mismo cuadrante del tiempo anterior, a no ser que se haya movido:

$$w_{pqt} = w_{pq(t-1)} - \sum_{j \in J, j \neq q} \theta_{pqjt} \quad \forall p \in P, q \in Q, \forall t \in \{2, \dots, 1 + f_{jq}\}$$

$$w_{pqt} = w_{pq(t-1)} - \sum_{j \in J, j \neq q} \theta_{pqjt} + \sum_{j \in J, j \neq q} \theta_{pjqt-f_{jq}} \quad \forall p \in P, q \in Q, \forall t \in \{1 + f_{jq}, \dots, T\}$$

8. Flujo de cuadrantes:

Si una persona se encuentra en un cuadrante q , esta puede quedarse en su cuadrante, donde se puede ir a una zona segura dentro de este, o viajar a un cuadrante distinto.

$$w_{pqt} \geq \sum_{j \in J, j \neq q} \theta_{pqjt} \quad \forall p \in P, q \in Q, \forall t \in T$$

9. Cantidad mínima a evacuar:

$$\sum_{z \in Z} X_{zT} \geq K$$

10. Restricción de zonas afectadas por tsunami:

Si es que el cuadrante q fue afectado por el tsunami y la zona z no es vertical, entonces no se evacuará a esa zona.

$$\sum_{p \in P} \alpha_{pzt} = 1 - \Phi_q + h_z \cdot \Phi_q \quad \forall p \in P, \forall z \in Z, \forall q \in Q, \forall t \in T$$

11. Restricción de activación de θ_{pqjt} :

Si la capacidad del cuadrante q es superada, entonces la persona debe evacuar a otro cuadrante j .

$$w_{pqt} \leq \sum_{z \in Z} (C_z \cdot \gamma_{zq}) + \sum_{p \in P} \sum_{j \in Q, j \neq q} \theta_{pqjt} \quad \forall q \in Q, \forall t \in T$$

12. Restricción de inventario de personas de la zona segura:

La cantidad de personas en cada zona segura z estará determinada por la siguiente restricción de inventario.

$$X_{zt} = X_{z(t-1)} + \sum_{p \in P} \alpha_{pz} \left(t + \frac{d_{zp}}{v_p} + h_z \right) \quad \forall z \in Z, t \in T$$

13. Condición inicial de inventario de las zonas:

$$X_{z1} = \sum_{p \in P} \alpha_{pz1} \quad \forall z \in Z$$

14. Capacidad de zonas seguras:

La cantidad total de personas evacuadas a una zona segura z no debe exceder la capacidad de la zona.

$$X_{zT} \leq c_z \quad \forall z \in Z$$

3. Definición de datos

3.1. Población a evacuar

Mediante herramientas de topografía y geolocalización, se estima que la cantidad mínima de personas a evacuar sea aproximadamente 6000, pues la densidad poblacional de Viña del Mar en el sector Plan , de acuerdo con la base de datos recopilado por la Secretaría Comunal de Planificación (SECPLA) de la I. Municipalidad de Viña del Mar, corresponde aproximadamnete a 42000 habitantes por 504 hectáreas, por lo que dividiendo nuestra área estimada total por la cantidad de habitantes a la fecha y realizando los cálculos correspondientes al área estudiada, según los cuadrantes, nos entrega este número.(CIGIDEN,2024)

3.2. Cuadrantes

Utilizando las mismas herramientas topográficas empleadas en la definición de la población objetivo del modelo, se realiza un estudio del territorio en el cual se optimizaría el uso de zonas de evacuación verticales y se fracciona el espacio, intentando que cada una de las zonas delimitadas, designadas como cuadrantes, mantenga un margen de alrededor de 55000 metros cuadrados, de tal forma que las personas puedan identificar a que zona corresponden y acudir a

las vías de evacuación correspondientes o que su defeco, busquen la solución más óptima con el fin de salvarse.

3.3. Tiempos

- **Tiempo máximo según magnitud:** Supondremos para la modelación que no nos enfrentaremos al peor escenario posible (i.e. un megaterremoto, con recurrencia 500 años (Canales et al., 2019)), por lo que podemos tomar el tiempo asociado a la llegada del mayor evento del tsunami definido anteriormente (14 minutos) y dividirlo por un factor de magnitud máxima, 9 Mw. (Ejemplo: para un terremoto magnitud 7 Mw sería $14/(7/9) = 18$ minutos).
- **Tiempo de cada actividad según velocidad:** Cada persona tendrá una velocidad promedio que se encontrará entre los valores de 0.95 m/s y 1.25 m/s, datos recopilados desde el estudio «*Walkability Index for Elderly Health: A Proposal*», la cual será utilizada para ser multiplicada por la distancia a recorrer según la acción que debe realizar (desplazarse hacia una zona segura, cambiarse de cuadrante), con ello, conseguir el tiempo que demoraría en cumplir dicha acción y ocupar ese valor como variable a optimizar que cumpla con la restricción de tiempo máximo antes de la llegada de la ola.
- **Tiempo de subida en evacuación vertical:** El tiempo de subida hasta una cota de seguridad en un edificio (20 metros, equivalente a aproximadamente 8 pisos), el cual se estima igual a 1 minuto y 30 segundos (Hinman et al., 2014).

3.4. Capacidad de ocupación en evacuación vertical

Siguiendo el estándar de 0,93 m² por persona establecido por FEMA (2008), la capacidad de cada zona de evacuación vertical será la superficie disponible del edificio dividido por el espacio de ocupación promedio de una persona. Se estima que la cantidad de pisos para cada edificio utilizado como evacuación vertical será de 11 pisos (León et al., 2019), y cada piso tendrá una superficie de 100 m². Es decir, que solo 4 pisos por edificio podrán ser utilizados como zona segura, teniendo en cuenta que edificios que cumplen con criterio de evacuación vertical deben tener una «altura superior a los 8 pisos» (León et al., 2019).

3.5. Cantidad de zonas seguras por cuadrante

En base a la estimación de cuadrantes realizada anteriormente y junto a «Evaluación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunami en Chile», se pudo determinar la cantidad de edificios mayores a 11 pisos en cada cuadrante. Con este valor se calculó un promedio de entre todos los cuadrantes, resultando en 7 zonas seguras por cuadrante.

4. Resolución

4.1. Implementación computacional

4.2. Solución y valor objetivo

5. Validación de resultados

6. Bibliografía

- Barrenechea, F., Ferrada, M. F., & Jara, M. (2019). Riesgo por tsunami en la ciudad de San Antonio: un aporte a gobiernos locales. *Revista Cartográfica*, 92, 71-90. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i92.438>
- Castro, S., Poulos, A., Herrera, J. C., & De la Llera, J. C. (2018). Modeling the Impact of Earthquake-Induced Debris on Tsunami Evacuation Times of Coastal Cities. *Earthquake Spectra*, 35(1), 137-158. <https://doi.org/10.1193/101917eqs218m>
- CIGIDEN. (2024, 8 abril). Advierten la urgencia de implementar la evacuación vertical en Chile. <https://www.cigiden.cl/advierten-la-urgencia-de-implementar-la-evacuacion-vertical-en-chile/#:~:text=La%20evacuaci%C3%B3n%20vertical%20consiste%20en,inunde%20las%20zonas%20m%C3%A1s%20bajas>
- Earthquakes – Deadly risk, devastating damage | Munich Re. (s. f.). <https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters/earthquakes.html>
- FEMA, F. (2008). Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_earthquakes_guidelines-for-design-of-structures-for-vertical-evacuation-from-tsunamis-fema-p-646.pdf
- Hinman, M. R., O'Connell, J. K., Dorr, M., Hardin, R., Tumlinson, A. B., & Varner, B. (2014). Functional predictors of stair-climbing speed in older adults. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, 37(1), 1–6. <https://doi.org/10.1519/JPT.0b013e318298969f>
- Imamura, F., Boret, S. P., Suppasri, A., & Muhari, A. (2019). Recent occurrences of serious tsunami damage and the future challenges of tsunami disaster risk reduction. *Progress In Disaster Science*, 1, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100009>
- León, J., Catalán, P. A., & Gubler, A. (2021). Assessment of Top-Down Design of Tsunami Evacuation Strategies Based on Drill and Modelled Data. *Frontiers In Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.744193>
- León, J., Mokrani, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., & Femenías, C. (2019). The Role of Built Environment's Physical Urban Form in Supporting Rapid Tsunami Evacuations: Using Computer-Based Models and Real-World Data as Examination Tools. *Frontiers In Built Environment*, 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00089>
- León, J., Zamora, N., Castro, S., Jünemann, R., Gubler, A., & Cienfuegos, R. (2019). Evacuación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunamis en Chile. En CIGIDEN. https://www.cigiden.cl/wp-content/uploads/2019/07/PPCIGIDEN_EvacVert_digital.pdf
- MINVU. (2013). Norma Técnica 007: Diseño estructural para edificaciones en áreas de riesgo de inundación por tsunami o seiche. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. <https://portal.ondac.com/601/w3-article-59581.html>
- Nealy, J. L., Herman, M. W., Moore, G. L., Hayes, G. P., Benz, H. M., Bergman, E. A., & Barrientos, S. E. (2017). 2017 Valparaíso earthquake sequence and the megathrust patchwork of central Chile. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8865-8872. <https://doi.org/10.1002/2017gl074767>

- Núñez, I., Boroschek, R., Comte, D., & Contrera, V. (2015). NUEVO PELIGRO SÍSMICO PARA CHILE. XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA. https://boroschek.com/wp-content/uploads/2015/04/2015_achisinanunezboroscheketalpeligrosismico_189.pdf
- Onemi. (2024, 2 julio). Sobre SENAPRED | SENAPRED. SENAPRED | Servicio Nacional de Prevención y Respuesta Ante Desastres. <https://web.senapred.cl/nosotros/>
- Pallardy, R. and Rafferty, John P. (2024, May 4). Chile earthquake of 2010. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/event/Chile-earthquake-of-2010>
- Ramirez, L. (s. f.). Leyla Ramirez. <https://dfc.uchile.cl/inicio/estudio-de-fisica-de-la-u-de-chile--detecta-cambios-previos-a-terremotos-ocurridos-en-el-pais/#:~:text=Chile%20es%20uno%20de%20los,damnificados%20y%20millonarias%20p%C3%A9rdidas%20econ%C3%B3micas>
- Ruiz, S., & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.015>
- SECPLA. (s.f.). Datos estadísticos de la Comuna de Viña del Mar. Ilustre Municipalidad de Viña del Mar. <https://www.munivina.cl>
- Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2012). Tsunamigenic Ratio of the Pacific Ocean earthquakes and a proposal for a Tsunami Index. *Natural Hazards And Earth System Sciences*, 12(1), 175-185. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-175-2012>