

CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDRODINÁMICAS DE TSUNAMI PARA EXPERIMENTOS DE LABORATORIO.

S. Ruiz González¹, R. Aránguiz M², M. Villagrán V³.

RESUMEN:

Los tsunamis son un fenómeno recurrente en nuestras costas, son altamente destructivos provocando pérdidas humanas y de infraestructura. Actualmente, no existe una normativa de construcción para la prevención de daños por tsunami, sin embargo, el desarrollo de estudios permite visualizar el comportamiento asociado a la física del tsunami y ser de ayuda para tener nociones del impacto que producen en la costa para considerarlo en el diseño de fundaciones. En esta investigación se caracterizaron las variables hidrodinámicas de tsunami para experimentos de laboratorio a partir de datos obtenidos de los últimos tres tsunamis ocurridos en Chile y de inundaciones por tsunami en las costas de Chile mediante simulaciones numéricas, para generar tsunamis a escala en un canal de olas que usa el método generador de olas con pistón. Los resultados demuestran que las magnitudes obtenidas de las longitudes de ondas de tsunamis escalados superan a la permitida por el largo del canal, a causa de los períodos de ola extremadamente grandes. Mediante un análisis de datos a la simulación numérica se encontró un único valor representativo denominado factor K que corresponde a una fracción del tiempo de la ola máxima del tsunami. Este factor permite obtener las variables hidrodinámicas máximas de un tsunami. Se discute el implementar un nuevo modelo generador de olas para el canal.

PALABRAS CLAVES: Tsunamis en Chile; Generador de Olas; Física del Tsunami.

ABSTRACT:

Tsunamis are a frequent phenomenon on our shores. They are highly destructive, provoking the loss of infrastructure and human lives. In the current day, there are no set construction standards set for preventing tsunami damage, however, the development of studies allows us to visualize the behavior associated with tsunami physics and helps us comprehend the impact that they produce on the coast in order to consider it in the construction of foundations. In this study, tsunami hydrodynamic variables are characterized for lab experiments from the data sourced from the last three tsunami events in Chile and from tsunami flooding in the Chilean coast from numerical simulation in order to generate a scaled tsunami in a piston-type wave maker. The results show that the magnitudes derived from the wavelength of the scaled tsunami are larger than what is possible within the length of the wave maker's flume due to the extremely large wave periods. Through a data analysis performed on the numerical simulation, a single representative value was found designated factor K , which corresponds to a fraction of the time of the maximum wave of the tsunami. This factor allows the gathering of tsunami maximum hydrodynamic variables. The implementation of a new wave generation model is discussed.

KEYWORDS: Tsunamis in Chile, Wave generator; Physics of a Tsunami.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, sruizg@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, raranguiz@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mwillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En Chile, los tsunamis producidos por terremotos son un fenómeno recurrente en nuestras costas por la privilegiada localización geográfica de una zona de subducción cuya extensión abarca todo el litoral costero del país. Por otra parte, también se puede producir un tsunami por deslizamiento de tierra (submarinos y subaéreos), erupciones volcánicas y aún menos frecuentes por la caída de meteoritos en el océano o en lagos, que para el caso de esta investigación no forman parte. Los últimos eventos de terremotos ocurridos en el país con posterior tsunami son los de Maule 2010 con $M_w = 8.8$, Illapel con $M_w = 8.2$ en 2014 e Iquique con $M_w = 8.3$ en 2015.

Estos tsunamis causados por terremotos de subducción generan una serie de ondas oceánicas de largos períodos, superiores a los 5 minutos, y una longitud de onda, de decenas de kilómetros, producidas por una perturbación rápida y a gran escala de una masa de agua, propagándose a una profundidad relativamente baja sobre la plataforma continental desde aguas profundas cercanas al epicentro de la fuente perturbadora hacia el litoral costero. A medida que se acerca a la costa la profundidad del fondo y la velocidad de propagación o celeridad disminuye y se amplifica la altura (Aránguiz, 2018). Por lo tanto, pueden viajar a una baja altura y a velocidades cercanas a los 700 [km/h] en alta mar (*Costas de Chile*, 2019).

Una vez que el tsunami se propaga hacia la costa sufre de procesos físicos induciendo una transformación producto de su interacción con el fondo marino y la geomorfología⁴ costera, que es causada por los fenómenos de refracción, asomeramiento, difracción, reflexión, dispersión angular, atrapamiento de energía, resonancia y la disipación de energía producto de la fricción de fondo y rotura, generando cambios en su dirección de propagación, celeridad y altura (CIGIDEN, 2018).

La refracción es un cambio en la dirección del tsunami producido por cambios en la celeridad al propagarse a distintas profundidades, produciendo zonas de convergencia y divergencia de energía, como las bahías. El asomeramiento es un cambio de la altura del tsunami, producto de los cambios en su celeridad. La difracción se relaciona con la propagación de la energía en dirección perpendicular al frente de onda, causado por una barrera física que induce a cambios de la altura de onda a lo largo de su frente. Como es el caso de los espigones en la costa. La reflexión es un cambio en el sentido de la propagación del tsunami debido a la presencia de un obstáculo o un cambio brusco de la batimetría, como lo son las islas o los cañones submarinos. Un ejemplo de esto es la Isla Santa María ubicada en la Región del Biobío (CIGIDEN, 2018).

Cuando el tsunami llega a la costa, el proceso de inundación no siempre es capaz de disipar la energía, por lo que retorna al océano propagándose lejos de la costa. Estas ondas reflejadas se ven afectadas por la refracción haciendo que, posiblemente, las ondas se reorienten hacia la costa produciendo un tiempo de arribo posterior al principal. La energía queda atrapada en la costa y se propaga en dirección paralela a ella, permitiendo que el tsunami alcance localidades alejadas de la zona de generación tras varias horas después de ocurrido el evento principal (CIGIDEN, 2018).

Las fuentes de disipación de energía se producen por dos efectos. Uno de ellos es la fricción del fondo, que al ocurrir en el proceso de inundación la rugosidad del fondo marino es percibido por la ola de tsunami, controlando la capacidad de intrusión horizontal y vertical del tsunami. El otro efecto es el de rotura de la onda de tsunami, que es un proceso altamente complejo y no en todos los casos se manifiesta, presenta una dependencia con pendiente del fondo (CIGIDEN, 2018).

Los efectos que genera un tsunami en la costa son devastadores, con pérdidas de vidas humanas y de una alta destrucción en localidades costeras producto del transporte masivo de sedimentos causada por fenómenos como la socavación en las bases de las estructuras y la erosión del litoral costero.

La modelación física y numérica permite tener una representación simplificada del proceso y predecir escenarios futuros ante intervenciones humanas o cambios climáticos usando datos de campo obtenido de fuentes de información. Los modelos físicos representan un sistema real a una escala menor bajo condiciones controladas en un

⁴ Geomorfología: disciplina que tiene por objetivo la descripción y explicación del relieve terrestre continental y submarino.

laboratorio, usando un generador de olas en un canal, y que tienen la ventaja de permitir la visualización real de los procesos costeros, para estudiar cuando el frente de olas se aproxima a la línea de costa y la inunda (*Costas de Chile*, 2019).

Como la generación de olas en un canal requiere de una fuente generadora, algunos investigadores han simulado tsunamis en laboratorio usando distintas fuentes como es el caso del Generador de olas con Pistón (Goring, 1979), Analogía de Rotura de Presa (Chanson & Aoki, 2003), Movimiento Vertical de Tabla (Monaghan & Kos, 2000), Generador de olas neumático (Rossetto et al., 2011) y el Generador de olas impulsado por volumen (Goseberg et al., 2013). Para el caso del generador de olas tipo pistón, la generación de la ola está limitada por el Stroke, que es la distancia de desplazamiento que permite el pistón para generar la onda, limitando la longitud de onda (L) y amplitud (A) (McGovern et al., 2016). A pesar de esto, la mayoría de las instalaciones existentes con generadores de ola de tipo pistón no lograrían generar estas ondas de largos periodos. Sin embargo, los otros generadores de ondas sí podrían cumplir con la condición.

Esta generación de olas implica que el tsunami sea representado por ondas largas, tradicionalmente ondas sinusoidales y/o solitarias, del cual esta última ha sido cuestionada denominándola como el “*Dilema de la onda solitaria*” (Madsen et al., 2008), mencionando no ser una buena representación física de un tsunami real y que para compensar esto propone el uso de datos de entrada del modelo tomados en el límite de la costa, in situ o con modelos numéricos.

Por lo tanto, la importancia del estudio de tsunamis radica en analizar su impacto en la costa chilena, estimando las alturas de tsunamis pasados usándolo como referencia para predecir el impacto futuro, los límites de inundación en comunidades y ubicaciones costeras específicas. Además, la investigación sobre tsunamis históricos puede ser de gran ayuda para analizar la frecuencia de ocurrencia de ellos. En ingeniería de costas se enfatiza en estimar la profundidad de socavación máxima producto del tsunami, ya que es importante para definir el tamaño y profundidad de fundaciones, con el fin de evitar fallas durante un evento de tsunami.

Esta investigación tiene por objetivo principal el caracterizar las variables hidrodinámicas de una onda de tsunami a partir de registros reales y de una base de datos resultante de simulaciones numéricas a escenarios estocásticos de inundación por tsunami en ciudades costeras de Chile, para evaluar su generación a escala en el canal de olas del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Este objetivo principal se espera lograr con los siguientes objetivos secundarios, como el identificar los parámetros de ola de los tsunamis reales (Tsunamis en Chile 2010, 2014 y 2015) para representar la onda de tsunami en laboratorio con generador de pistón como una onda solitaria y sinusoidal. Analizar la relación entre variables hidrodinámicas de la base de datos de eventos simulaciones de inundación por tsunami para todo Chile en 10 localidades (Aránguiz et al., 2024) para obtener un factor K representativo de los datos y por último, el establecer otra técnica de generación de olas a partir de resultados.

2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterización de variables con registros reales

Para caracterizar variables con registros reales de tsunami se recopiló datos reales de investigaciones previas indicados en la **Tabla 1**.

Los registros reales de tsunami se obtienen a partir de mareógrafos, que es un instrumento que registra los movimientos verticales del mar, cuyos datos se representan en un gráfico como series de tiempo con la altura del nivel del mar y el tiempo que transcurre.

Como en estas publicaciones científicas no hay base de datos como tal, sino que, es sólo el gráfico de los mareógrafos. Por lo tanto, de estos registros gráficos se extrajo los parámetros hidrodinámicos de ola, como la altura y período que aparecen indicados esquemáticamente en la **Figura 1**.

Por esta razón, con los parámetros extraídos se elaboró una base de datos registrándolo en un documento de Excel, que a partir de un código elaborado con el software MATLAB R2016, el cual se encuentra adjuntado en el ANEXO, para cargar los datos del documento y obtener una serie de tiempo correspondiente al tsunami. La **Figura 1**, es la serie de tiempo captada por el mareógrafo durante el tsunami de Tubul en 2010 cuyo registro gráfico se obtuvo de (Martínez et al., 2012) y se generó con el procedimiento indicado.

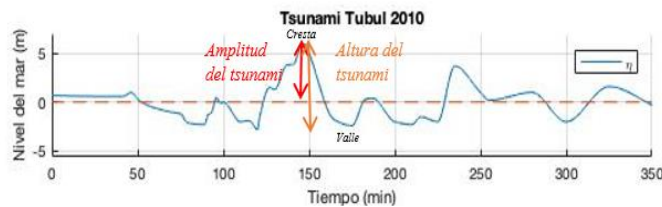


Figura 1. Definición de parámetros que definen una onda de tsunami usando de referencia el mareógrafo de Tubul en 2010. Fuente: Elaboración Propia.

Algunos de los parámetros hidrodinámicos de una onda de tsunami definidos en la **Figura 1** se detallan a continuación:

- La amplitud del tsunami (A) es la diferencia del seno y nivel normal del mar en reposo o la mitad de la altura del tsunami, su unidad de medida es en metros (m).
- La altura de tsunami (H) corresponde al valor absoluto entre la diferencia de una cresta y valle consecutivos o el doble de la amplitud del tsunami, su unidad de medida es en metros (m).
- El periodo del tsunami (T), es el tiempo en que una onda de tsunami completa un ciclo. Dada la dificultad de su medición, el periodo predominante del tsunami generalmente se mide como la diferencia de tiempo entre el tiempo de arribo de la onda de tsunami de mayor amplitud y el siguiente pico, medida en un mareograma. Los periodos típicos de tsunami varían entre 5 y 60 minutos (min).
- La desnivelación o superficie de elevación (η), que aparece indicada en azul en el gráfico, es la distancia vertical entre el nivel de referencia del evento y la superficie de agua en cada instante y punto del dominio, en metros, es decir, es la diferencia de altura entre el nivel de referencia del mar y la superficie de agua captada durante el evento de tsunami.
- La velocidad de propagación o celeridad del tsunami (C) es la velocidad de propagación de una onda de tsunami en el océano cuando su longitud de onda es 20 o más veces la profundidad del mar, es decir, la longitud de onda es mucho mayor que la profundidad del mar y se calcula como:

$$C = \sqrt{g * h} \quad (1)$$

donde g es la aceleración de gravedad como $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ donde m es metros y s es segundos. h es la profundidad del mar en metros (m) a la cual se propaga el tsunami.

A partir de estos parámetros hidrodinámicos se obtiene la longitud de onda de un tsunami que se identifica con una L o λ , y se calcula como:

$$L^2 = gT^2h \quad (2)$$

Este parámetro corresponde a la distancia horizontal entre dos puntos similares en dos ondas sucesivas medidas perpendicularmente a la cresta. La longitud de onda de un tsunami generados por terremotos se encuentra en el rango de 20 y 300 km. (CIGIDEN, 2018)

Tabla 1. Registro de tsunamis por localidades y su fuente bibliográfica.

Eventos	Localidades	Fuente
Maule 2010	Dichato Tubul Valparaíso	(Martínez et al., 2017) (Martínez et al., 2012) (NOAA Center for Tsunami Research, 2010)
Iquique 2014	Arica, Pisagua, Iquique Patache, Tocopilla, Mejillones, Antofagasta, Paposo, Taltal, Chañaral.	(An et al., 2014)
Coquimbo 2015	Coquimbo	(Aránguiz et al., 2018)

Como en esta investigación se pretende generar tsunamis reales a escala en el canal de olas ubicado en el laboratorio de la Facultad de ingeniería de la UCSC, se describe a continuación la descripción del canal y el procedimiento realizado para escalar los registros reales.

El canal de olas del laboratorio es una estructura de 24 metros de longitud total, en ambos extremos se encuentra una estructura de hormigón de 3.235 metros de largo y 2.015 metros de alto. En uno de los extremos se encuentra posicionada la paleta o Stroke, cómo es denominado en la literatura, y en el otro extremo se encuentran los disipadores de energía, por donde se propaga la ola en el canal. Tiene un largo de 17 metros, 1.2 metros de alto y 0.770 metros de ancho y está conformado por paredes de vidrio en secciones rectangulares unidas por refuerzos metálicos, montadas sobre hormigón. La paleta (Stroke) tiene un máximo de carrera o desplazamiento de 0.67 metros.

El esquema del canal de olas con sus variables asociadas se muestra en la **Figura 2**, en el que se observa las condiciones asociadas al movimiento de la paleta para generar una amplitud de ola propagada a una profundidad constante (Bravo et al., 2023). La generación de olas en el canal con un generador tipo pistón permite el desplazamiento horizontal de una pared vertical efectuando un movimiento hacia atrás y adelante como se muestra en el esquema de la **Figura 2**. Las variables identificadas en el esquema son:

- S o Stroke: desplazamiento axial o la carrera de la paleta, en metros(m).
- H: altura total de la ola generada, en metros (m).
- h: profundidad o altura de agua constante definida para los ensayos a 0.3 metros (m).
- η : superficie de elevación, se mide en metros (m).

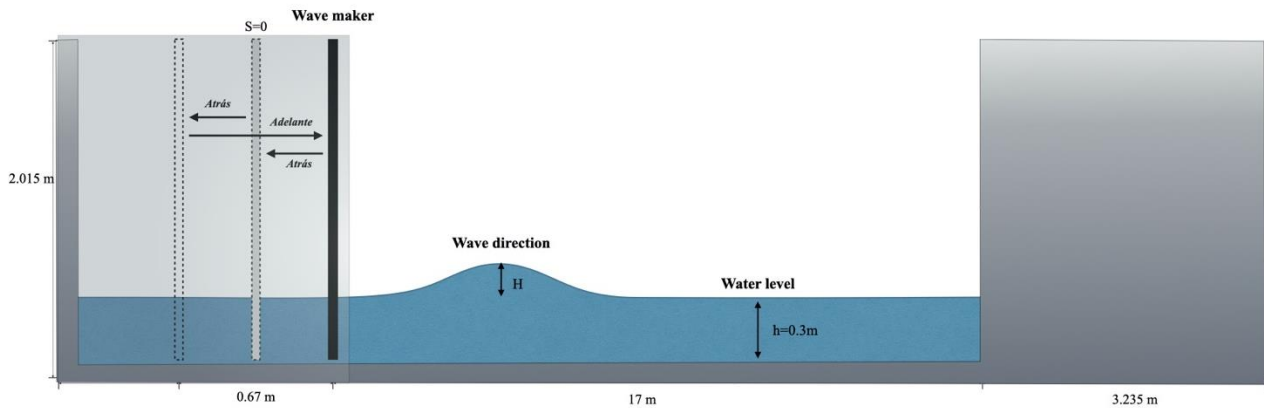


Figura 2. Esquema del canal generador de ondas con pistón y las variables asociadas. Fuente: Elaboración Propia.

Dado que, se busca generar ondas de tsunami en un canal de olas en laboratorio con un generador de olas accionado por pistón o compuerta, el que se ve representado en el esquema de la **Figura 2**. Esta investigación comprende la representación de olas de tsunami como ola solitaria y ola sinusoidal.

Una de las teorías para llevar acabo esto es la desarrollada por Goring (1978) que comprende el estudio de la propagación de tsunamis hacia la costa usando olas solitarias para representar la ola de tsunami en un canal de olas usando el generador de olas tipo pistón, el mismo presentado en el esquema de la **Figura 2**. La ola solitaria es una onda conformada por una cresta y sin valle, es decir, solo presenta una altura de ola H y el período de la ola (T).

Como ya tengo los datos de los registros reales de olas con los parámetros de los tsunamis, se generó nuevamente otra base de registros, pero en donde sólo considero la ola máxima del tsunami para representarla como una ola solitaria, la cuál es, la altura de la ola máxima en metros [m] y el período de la ola máxima es el tiempo máximo del valle antes de que se genere la ola máxima y el valle posterior a la ola máxima.

Otro método propuesto para la generación de ondas de tsunami en laboratorio es la de Dean & Darymple (1991) con la ola sinusoidal y usado por Goseberg (2013). La ola sinusoidal es una onda representada con un valle y cresta.

De esta forma, tal como se hizo para la nueva base de registros de tsunamis para la onda solitaria, en la onda sinusoidal se registra la altura de ola H como una amplitud correspondiente a la $\frac{1}{2}$ de la altura H , el período de ola de tsunami como onda sinusoidal se registra como el período en que la superficie de elevación η cruza bajo el nivel de referencia del mar graficado como $\eta = 0$, previo a la altura máxima de tsunami hasta que vuelve a cruzar la superficie de elevación η hacia abajo. Con el fin de que al modelar las ondas estas reflejen la forma.

Una vez ya registrado los parámetros de altura de ola y período de tsunamis para ola solitaria y ola sinusoidal, se realiza el cálculo para escalar los parámetros usando la escala Froude (Ec. 3), cuya escala presenta dos formas para realizar escala de longitudes, con la semejanza geométrica (Ec. 4) y la escala de tiempo con la semejanza cinemática (Ec. 5). Se consideraron distintas escalas 1:100, 1:40, 1:30 y 1:20, para visualizar los distintos valores asociados al periodo del modelo y la amplitud del modelo. Se utilizó la escala Froude puesto que, cuando el flujo representa una superficie libre, como lo es el mar, la fuerza predominante es la gravedad.

$$\text{Froude} = \frac{v}{\sqrt{g \times l}} \quad (3)$$

Por lo que, se concluyó que:

$$H_p = \alpha H_M \quad (4)$$

$$T_p = T_M \alpha^{1/2} \quad (5)$$

Donde H_M es la altura del modelo, H_P es la altura del prototipo, T_M es el período del modelo, T_P es el periodo del prototipo, α es la escala. Donde (4) corresponde a la semejanza geométrica y (5) es la semejanza cinemática.

Debido a que, ambos métodos de generación de olas, tanto del de Goring como el de Dean & Darymple son con pistón o paleta, por lo que, requiere del cálculo de la distancia del desplazamiento del Stroke (S) necesario para generar la ola de tsunami escalada. El cálculo se determinó a una profundidad de agua (h) de 0.30 [m] metros para un Stroke máximo de 0.68 [m] metros y una altura máxima de ola a 0.28 [m] metros, dadas las condiciones del canal y de acuerdo con investigaciones previas (Bravo et al., 2023)

Para la onda solitaria se determinó mediante lo propuesto por Goring (1979) en la ecuación (Ec. 6), cuyo resultado entrega la distancia de desplazamiento del Stroke o paleta que requiere para generar la ola solitaria asociada a esos parámetros ingresados (H, h), donde H es la altura de la ola y h es la profundidad. En cuanto a k es el número de onda y se calcula como se indica en la Ec. (7), donde L es la longitud de onda.

$$S = \frac{2H}{kh} = \sqrt{\frac{16}{3} \frac{H}{h}} h \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (7)$$

En cuanto a la onda sinusoidal, el Stroke se determinó mediante lo indicado por Goseberg (2013), en el cual se menciona que el volumen desplazado de la paleta es el mismo volumen contenido en la cresta de la onda sinusoidal Ec. (8), donde la ecuación para el cálculo del Stroke es la indicada en la Ec. (10).

$$V_{sd} = V_{cr} \quad (8)$$

$$S \cdot h = \int_{-L/4}^{L/4} \eta(x, t) dx \quad (9)$$

$$S \cdot h = \int_{-L/4}^{L/4} \left(\frac{H}{2} * \cos(kx - \omega t)\right) dx \quad (10)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (11)$$

Donde, S es la distancia de desplazamiento del Stroke, ω es la frecuencia angular (Ec. 11), T es el período de la ola sinusoidal, H es la altura de ola, h es la profundidad, t es el tiempo, $\eta(x, t)$ es la desnivelación de la superficie libre cuya solución se muestra en la Ec. (10).

Otra ecuación para determinar el Stroke para una onda sinusoidal fue propuesto por Goring (1979) por medio de la Ec. (12).

$$\frac{H}{S} = \frac{4\sinh^2(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (12)$$

2.2 Caracterización de variables a partir de simulaciones

Estas simulaciones numéricas fueron obtenidas a partir de la generación de escenarios estocásticos de inundación por tsunami en todo Chile (Aránguiz et al., 2024) a lo largo de la zona de subducción de nuestro país producidas por movimientos de subducción con magnitudes entre Mw 8.0 a Mw 9.6 para 11 ciudades costeras, del cual para caracterizar las variables de tsunami se usó la base de datos generada.

El procedimiento desarrollado para obtener la base de datos consta de, dividir la zona de subducción Chile-Perú en 4 segmentos sísmicos basados en su sismicidad histórica. La generación de los escenarios estocásticos de ruptura para magnitudes de Mw 8.0 a Mw 9.6 se obtuvieron a partir del modelo de expansión de Karhunen-Loève (K-L), donde la discretización de segmentos sísmicos en sub-fallas se utilizaron los datos del modelo Slab 2.0 (Hayes et al. 2018). El método de SROM ayudó a seleccionar escenarios representativos de tsunami para cada segmento y rango de magnitud. Para simular los eventos de inundación se utilizó el modelo numérico NEOWAVE (Yamazaki et al. 2011), empleando una variedad de grillas y métodos de generación de condiciones iniciales (Okada, 1985) que incluye deformación co-sísmica (elevación o hundimiento) en todas las grillas de simulación (Aránguiz et al. 2019), para crear mapas probabilísticos de inundación para varios periodos de retorno.

El resultado de la ejecución del modelo se observa en la **Figura 3**.

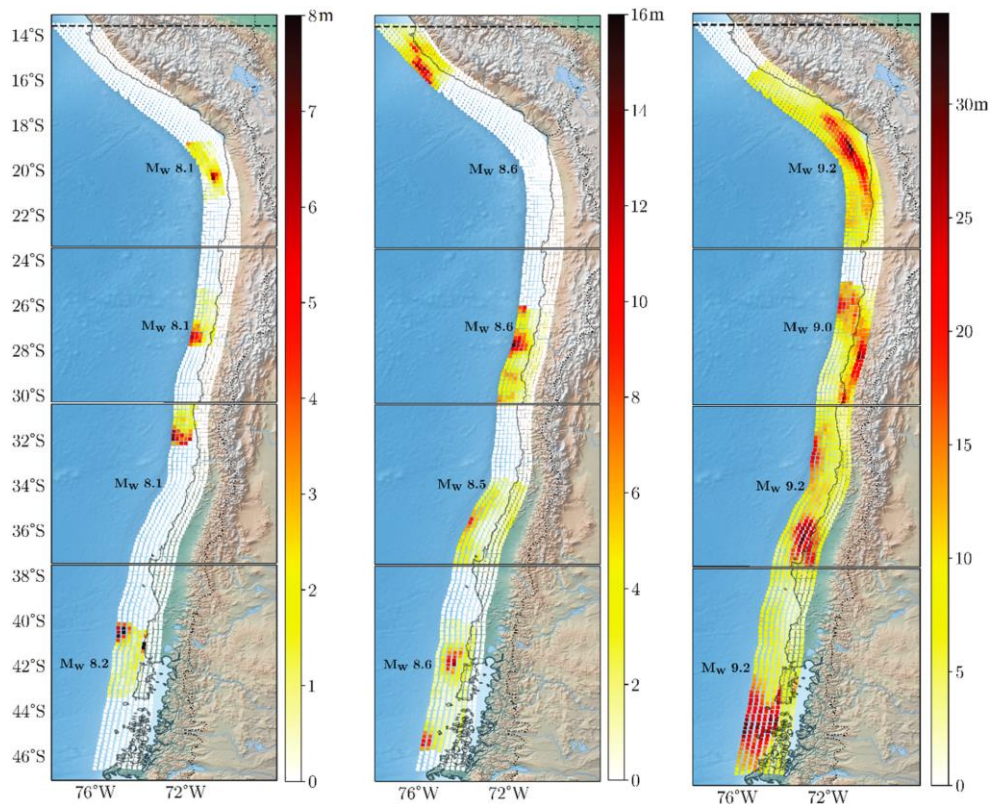


Figura 3. Ejemplo de fuentes de tsunami. Fuente: Aránguiz et al. 2024.

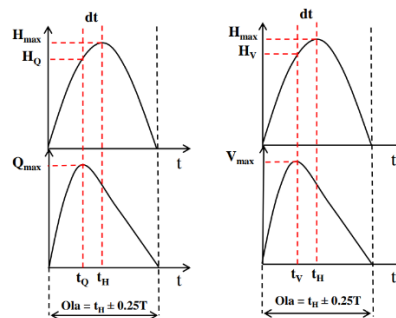
El registro de datos para los eventos de tsunamis simulados consta de la instalación de mareógrafos virtuales, ubicados en cada localidad costera simulada, lo más cercano a la línea de costa.

La base de datos resultante entregó las series de tiempo, velocidades y caudales de los tsunamis simulados en cada localidad, en una matriz de 15 columnas de los datos. Cada columna representa las siguientes variables ordenadas en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Identificación de variables para cada columna a partir de la matriz resultante.

Columna	Variable	Identificación	Unidad de medida	Sigla
1	Nivel del mar	(η)	Metros	[m]
2	Caudal máximo de entrada	(Q_{in})	Metros cúbicos por segundo	[m ³ /s]
3	Caudal máximo de salida	(Q_{out})	Metros cúbicos por segundo	[m ³ /s]
4	Altura máxima de entrada	(H_{in})	Metros	[m]
5	Altura máxima de salida	(H_{out})	Metros	[m]
6	Altura del caudal de entrada	(Hq_{in})	Metros	[m]
7	Altura del caudal de salida	(Hq_{out})	Metros	[m]
8	Velocidad máxima de entrada	(V_{in})	Metros por segundo	[m/s]
9	Velocidad máxima de salida	(V_{out})	Metros por segundo	[m/s]
10	Periodo de ola máximo	(T)	Segundos	[s]
11	Diferencia del periodo de entrada	(dt_{in})	Segundos	[s]
12	Diferencia del periodo de salida	(dt_{out})	Segundos	[s]
13	Tiempo del caudal de entrada	(Tq_{in})	Segundos	[s]
14	Tiempo del caudal de salida	(Tq_{out})	Segundos	[s]
15	Tiempo de la altura máxima	(t_{max})	Segundos	[s]

La obtención de esta matriz de datos que tiene estas variables hidrodinámicas como la altura máxima, velocidad y caudal máximos se obtiene a partir del criterio de la **Figura 4**. Este criterio es el de H_{max} se basa en seleccionar la ola de mayor profundidad (H_{max}) de las series de tiempo definiendo un intervalo de tiempo basado en el período con mayor energía espectral para captar la señal de la ola, del cual se obtienen la velocidad máxima (V_{max}) y el caudal máximo (Q_{max}) junto con el desfase de tiempo (dt) y las alturas correspondientes al caudal máximo (Hq) y velocidad máxima (Hv). (Bobadilla et al., 2022)


Figura 4. Criterio aplicado para establecer la relación de K de acuerdo a lo indicado según Bobadilla (2022).

Fuente: Bobadilla, 2022.

Por lo tanto, para el desarrollo de este estudio y la caracterización de las variables usadas se consideró los datos de las columnas correspondientes al: caudal máximo (Q_{max}), altura máxima (H_{max}), velocidad máxima (V_{max}), diferencia de tiempo (dt) y tiempo de la altura máxima (T), respectivamente. Además, todas estas variables corresponden a los datos de entrada.

Usando dos de estas variables, la de altura máxima de entrada y velocidad máxima, se calculó como HV^2 , la cual es una medida de fuerza que se puede aplicar y viene de la expresión de la Fuerza de arrastre ($F_D = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 A$).

Con las otras dos variables, la diferencia de tiempo (dt) y tiempo de la altura máxima (T), se utilizaron para calcular el factor K , que se obtiene como aparece indicado en la Ec. (13).

$$K = \frac{T-dt}{T} \quad (13)$$

Este factor K es una magnitud adimensional correspondiente a la proporción del período de la ola del tsunami cuando ocurre la altura máxima H_{max} . T corresponde al período de la ola máxima y dt es la diferencia de tiempo cuando ocurre la altura máxima de ola (H_{max}) y el caudal máximo de la ola (Q_{max}).

Tomando en consideración lo anterior, se generaron 4 gráficos de dispersión, el primero con la altura de la ola máxima a la entrada y el caudal máximo de entrada. La segunda con la misma altura de ola, pero con la velocidad máxima de entrada. El tercero con la misma altura, pero con componentes de la fuerza de arrastre (F_d) con HV^2 . El cuarto con el factor K y el tiempo (T).

3. RESULTADOS

3.1 Series de tiempo y parámetros reales de tsunamis en laboratorio

Las series de tiempo generadas en base a la información recopilada de investigaciones y elaboradas mediante MATLAB se aprecian en la **Figura 4.a, 4.b y 4.c**.

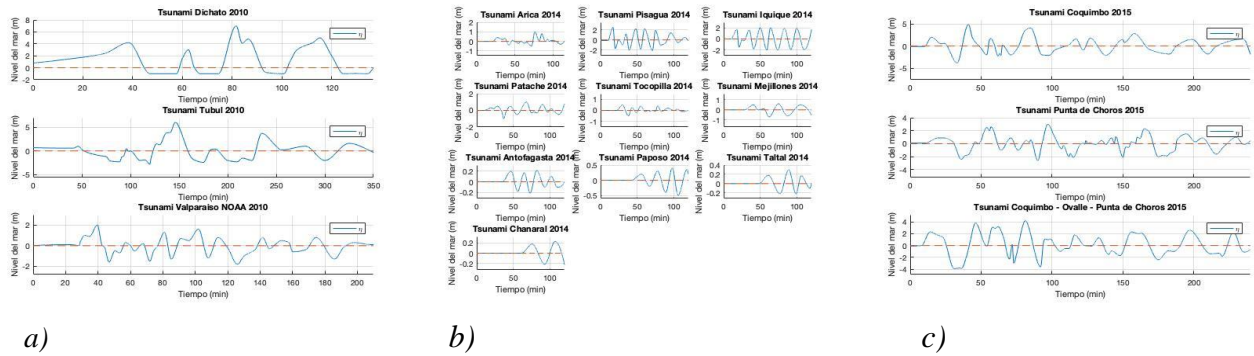


Figura 4: (a) Corresponde al tsunami ocurrido en 2010. (b) Tsunami ocurrido en las costas del norte de Chile en 2014. (c) Tsunami ocurrido en las costas chilenas en 2015. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los parámetros de ola como la amplitud (A), altura (H), período (T) y la longitud de onda (L) resultante de la resolución de la ecuación Ec. (2), de estos tsunamis se encuentran en la **Tabla 3** para tsunami de 2010, **Tabla 4** para el tsunami de 2014 y **Tabla 5** para el tsunami de 2015, son los valores reales sin escalar.

El cálculo de longitud de onda (L) (Ec. 2) se consideró para una profundidad h de 3 metros, ya que se está analizando en aguas someras, lo que implica que debe cumplir con $h/L < 1/20$. Las localidades que aparecen en estas tablas son las que presentaron una amplitud de ola máxima para cada tsunami. El resto de los parámetros de tsunami por localidad se encuentran en el Anexo B.

Tabla 3: Parámetros de ola Tsunami Maule 2010 onda sinusoidal y solitaria.

Localidad	Escala	A [m]	H [m]	T _{Sinusoidal} [s]	L _{Sinusoidal} [m]	T _{Solitaria} [s]	L _{Solitaria} [m]
Dichato	Real	3.50	7.00	1628.40	8833.98	1800.00	9764.90
Tubul	Real	3.00	6.00	3600.00	19529.79	3300.00	17902.31

En la **Tabla 3**, el período de las ondas sinusoidales es de 27.14 [min] para Dichato y de 60 [min] para Tubul. El periodo de las ondas solitarias para Dichato es de 30 [min] y Tubul de 55 [min].

Tabla 4: Parámetros de ola Tsunami Iquique 2014 onda sinusoidal y solitaria.

Localidad	Escala	A [m]	H [m]	T _{Sinusoidal} [s]	L _{Sinusoidal} [m]	T _{Solitaria} [s]	L _{Solitaria} [m]
Pisagua	Real	1.00	2.00	915.00	4963.82	960.00	5207.94
Iquique	Real	1.00	2.00	1002.00	5435.79	1080.00	5858.94

En la **Tabla 4**, el período de las ondas sinusoidales para Pisagua es de 15.25 [min] y de 16.7 [min] para Iquique. El periodo de las ondas solitarias para Pisagua es de 16 [min] e Iquique de 18 [min].

En la **Tabla 5**, el período de las ondas sinusoidales para Coquimbo es de 22.41 [min] y de 18 [min] para Punta de Choros El periodo de las ondas solitarias para Coquimbo es de 21.04 [min] y Punta de Choros de 25.3 [min].

Tabla 5: Parámetros de ola Tsunami Coquimbo 2015 onda sinusoidal y solitaria.

Localidad	Escala	A [m]	H [m]	T _{Sinusoidal} [s]	L _{Sinusoidal} [m]	T _{Solitaria} [s]	L _{Solitaria} [m]
Coquimbo	Real	2.45	4.90	1344.60	7294.38	1262.40	6848.45
Punta de Choros	Real	1.50	3.00	1080.00	5858.94	1518.00	8235.06

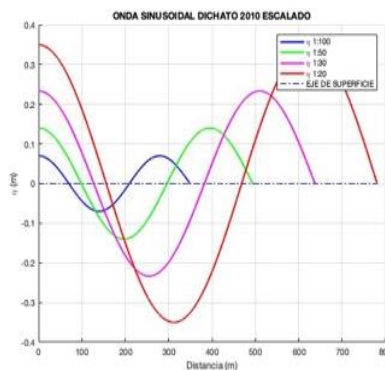
Estos parámetros de ola como la altura, amplitud y período se escalaron con las ecuaciones Ec. (3) y Ec. (4) para las escalas de 1:100, 1:50, 1:30 y 1:20.

En la **Tabla 6** se encuentran los resultados de la localidad de Dichato en el tsunami de 2010, ya que es la que presentó el tsunami con la amplitud de la ola más alta.

Tabla 6: Parámetros escalados de ola tipo sinusoidal, Tsunami Maule 2010

Localidad	Escala	A [m]	T [s]	L [m]	Stroke [m]
Dichato	1:100	0.035	162.84	279.35	20.75
	1:50	0.070	230.29	395.97	58.69
	1:30	0.115	297.30	510.03	126.27
	1:20	0.175	364.12	624.66	231.97

La longitud de onda (L) se calculó con la ecuación Ec. (2) y k con la Ec. (7). El desplazamiento del Stroke se determinó con la ecuación Ec. (10) que fue resuelta en MATLAB entregando un gráfico (**Figura 5**) para cada onda escalada. Los resultados del Stroke en la **Tabla 6** se obtuvo de la resolución de la Ec. (12).


Figura 5. Gráfico de onda sinusoidal tsunami Dichato 2010 con diferentes escalas Froude. La distancia es la distancia necesaria para generar la forma de onda sinusoidal. Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados de la **Tabla 6** y **Figura 5**, se observa que las amplitudes de onda podrían ser generadas en el canal aplicando la escala de 1:20, debido a que la máxima altura de ola que puede generar el canal es de 0.8 metros. Pero al ver los resultados de la Longitud de onda se ve que la magnitud es de 625 metros, eso quiere decir que se necesitaría aproximadamente 36 canales de laboratorio idénticos al que se tiene en el laboratorio de Ingeniería de la UCSC siendo necesario realizar un desplazamiento del Stroke de 232 metros, algo imposible, puesto que el máximo desplazamiento permitido por el Stroke es de 0,67 metros.

En cuanto a los resultados obtenidos para la onda solitaria, estos se presentan en la **Tabla 7**. La altura de ola H es el mismo valor de la amplitud de onda, ya que solo presenta una cresta al ser simulado, por lo tanto, el período que se obtuvo es distinto al presentado con la onda sinusoidal.

Tabla 7: Parámetros escalados de ola tipo solitaria, Tsunami Maule 2010

Localidad	Escala	H [m]	T [s]	L [m]	Stroke [m]
Dichato	1:100	0.07	180.00	308.79	0.33
	1:50	0.14	254.56	436.70	0.47
	1:30	0.23	328.63	563.78	0.61
	1:20	0.35	402.49	690.48	0.75

La longitud de onda (L) se calculó con la ecuación Ec. (2) y k con la Ec. (7) y el desplazamiento del Stroke se determinó con la ecuación Ec. (6).

En la **Figura 6** están las superficies de elevación tanto para el tsunami real como los escalados, donde la línea de color celeste representa el tsunami real, el de color azul la de 1:100, verde 1:50, magenta 1:30 y rojo 1:20.

El primer gráfico a la derecha corresponde a los tsunamis con el tsunami real y escalados. El gráfico del centro es los tsunamis escalados, la de arriba corresponde a la superficie de elevación con el periodo asociado y la de abajo corresponde a la superficie de elevación con la longitud de onda del tsunami. El gráfico de la derecha se encuentra normalizado con la superficie de elevación y la profundidad ($h=0.3$ [m]) con el tiempo $t\sqrt{g/h}$ y en la distancia la longitud de onda (λ) normalizado por la longitud del canal (17 [m]), con el propósito de ver mejor el comportamiento y requisitos de las ondas.

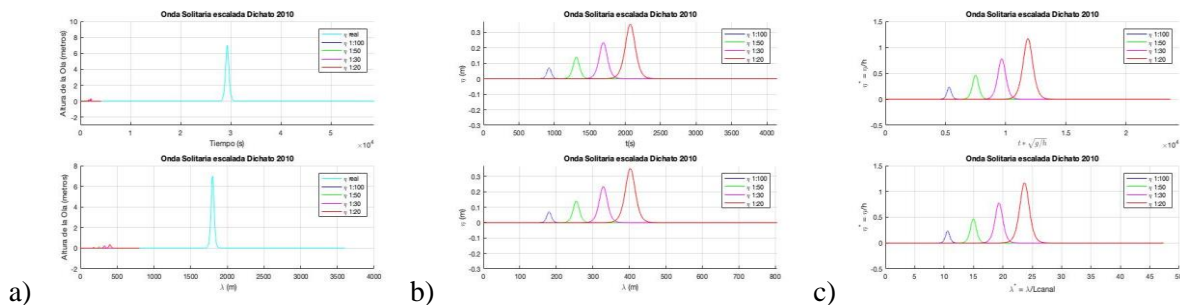


Figura 6. Gráficos de onda solitaria tsunami 2010 con el tsunami real y las diferentes escalas Froude. Las gráficas están en escalas deformadas debido a que las ondas presentan una amplitud muy baja pero una gran longitud de onda, por lo cual es imperceptible a simple vista. Fuente: Elaboración Propia.

Los valores del desplazamiento del Stroke para una onda solitaria, la cual se calculó con la ecuación Ec. (6), entrega valores inferiores a 0.68 metros, correspondiente al Stroke máximo de desplazamiento, para la mayoría de las escalas. Esto quiere decir que, tanto la altura H como la distancia del Stroke sí pueden ser generados en el canal del laboratorio, pero al analizar el gráfico (**Figura 6.b**) se observa que la longitud de onda es de 690.48 metros (**Tabla 7**), es decir que no puede ser generado en el canal de olas del laboratorio dadas las condiciones del canal, puesto que, la distancia del canal que se permite realizar el ensayo es de 17 metros.

Al hacer nuevamente un análisis a los parámetros de ola aplicando escalas superiores a 1:50, estos resultados no cambian. La longitud de onda calculada para generar una onda solitaria sigue siendo muy grande dadas las condiciones del canal existente en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UCSC. Por lo tanto, lo único que impide de generar estas ondas de tsunami reales escalados y representarlos como olas solitarias es la longitud del canal.

3.2 Relación de variables a partir datos de simulaciones

A partir de la base de datos de simulaciones de eventos estocásticos de tsunami para 10 localidades costeras, se realizaron 4 relaciones entre variables. Los gráficos resultantes de este análisis están en la **Figura 7** y fueron realizados mediante el software MATLAB.

El primer gráfico corresponde a la altura de la ola máxima a la entrada (H_{in}) del cual se realizó el cambio de sigla por la de H_{max} y el caudal máximo de entrada (Q_{in}), también se le realizó el cambio de sigla por la de Q_{max} . El segundo corresponde a la altura de la ola máxima a la entrada (H_{max}) y la velocidad máxima de entrada (V_{in}), con el cambio de sigla a V_{max} . El tercer gráfico es el de la altura de la ola máxima a la entrada (H_{max}) y los componentes de la fuerza de arrastre (F_d) con HV^2 . Finalmente, el último gráfico corresponde al factor K resultante de la Ec. (13) y el tiempo (T). Se ocupan los datos de entrada, porque son las magnitudes necesarias para que la ola llegue a la altura máxima.

Esta relación de variables sirve para visualizar la dependencia existente entre las otras variables y la altura de la ola máxima (H_{max}), ya que, para generar un tsunami a escala lo que se necesita, en teoría, es la altura máxima del tsunami y su período, con el fin de que, al simularlo en el canal de olas esto pueda ser visualizado.

Entonces, lo que se espera identificar en los gráficos resultantes son una relación positiva, en que una variable aumenta la otra también.

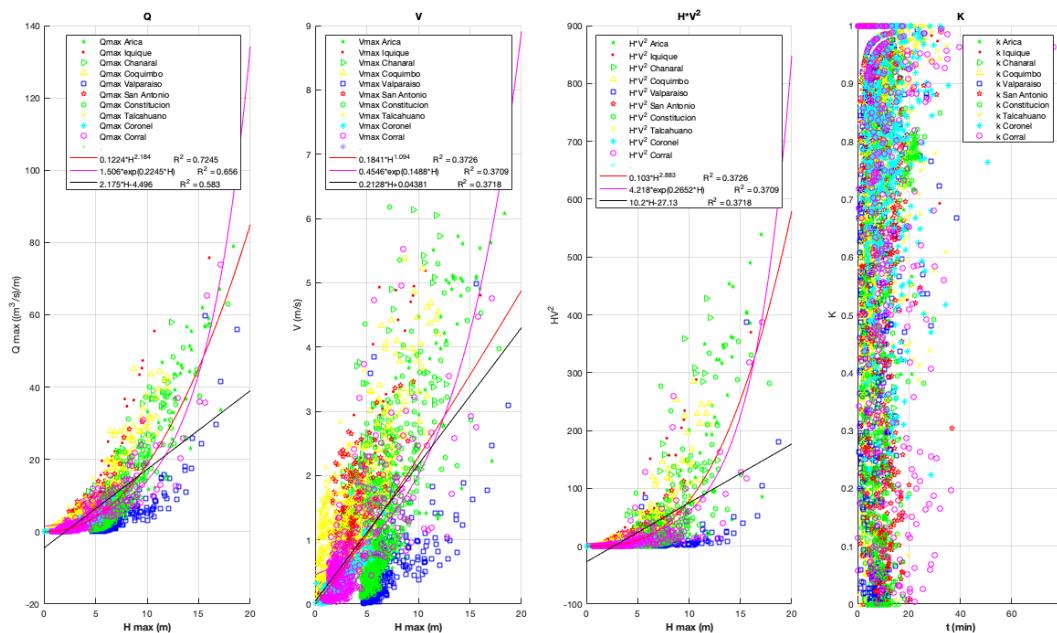


Figura 7. Gráficos de dispersión para Q_{max} , V_{max} y HV^2 con H_{max} . Presentan curvas de ajuste y las ecuaciones con el coeficiente de correlación se ven indicados en la leyenda de los gráficos. El último gráfico indica la relación existente entre el factor K y el período. Los colores y figuras corresponden a cada localidad. Fuente: Elaboración Propia.

En los 3 primeros gráficos de la **Figura 7**, se visualiza la altura de la ola máxima con el caudal máximo, la velocidad máxima y HV^2 indicando que sí existe una relación lineal positiva. A diferencia, de lo que se obtuvo del análisis al factor K con el período, en el último gráfico, que no muestra ninguna relación.

Por lo tanto, a estas variables se les aplicó un análisis estadístico realizando un ajuste de datos usando curvas de ajuste con potencia, exponencial, lineal y obteniendo el coeficiente de correlación asociado. Estos coeficientes de correlación buscan medir que tan bien un modelo lineal puede describir la relación entre dos variables. De los resultados obtenidos los ajustes que dieron una mayor correlación se describen a continuación.

Para Q_{\max} el coeficiente de correlación es $R^2 > 0.7$ y la ecuación que indica la relación es $0.1224H^{2.184}$. En cuanto para la V_{\max} con su ecuación es $0.1841H^{1.094}$ y para HV^2 la ecuación $0.103H^{2.883}$ entrega una correlación de $R^2 < 0.4$. (**Figura 7**). Por lo tanto, como los valores de la correlación se encuentran entre $0 < R^2 < 1$ presentando una correlación positiva, esto quiere decir que, si una de las variables aumenta la otra también lo hace. Por ejemplo, si aumenta la altura de la ola máxima (H_{\max}) aumenta la velocidad (V_{\max}) y el caudal (Q_{\max}) de la ola

En cuanto al resultado de la relación entre variables al factor K y el período (T), las correlaciones obtenidas de las curvas de ajuste daban valores cercanos a $R^2=0$ (**Figura 8.a**), por lo que, se realizó una nueva relación entre variables cambiando período (T) por la altura máxima de ola (H_{\max}) (**Figura 8.b**), realizando nuevamente un análisis estadístico con curvas de ajuste para potencia, exponencial y lineal.

De la **Figura 8**, en la leyenda del gráfico se observa que el promedio del factor K es de 0.63, debido a la alta dispersión de los datos.

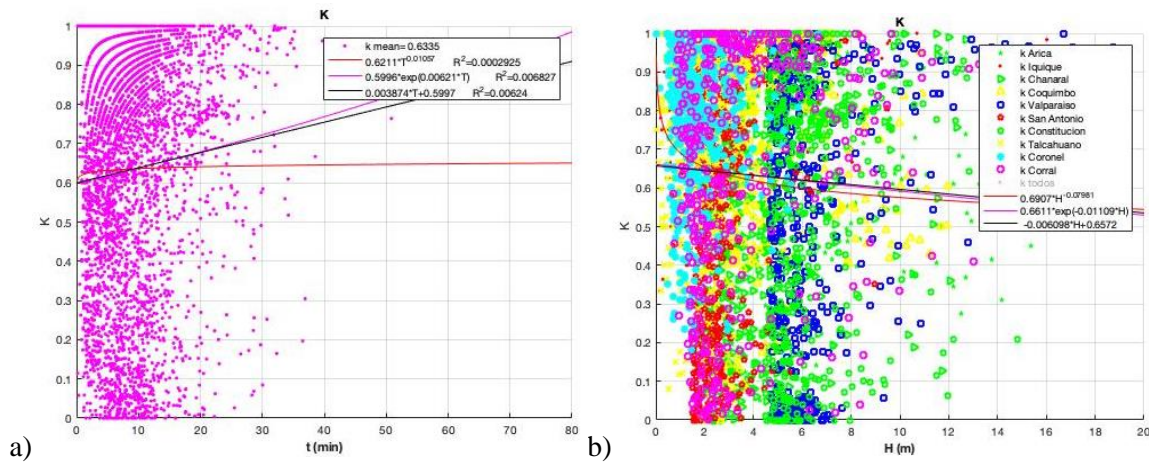


Figura 8. a) Gráfico de dispersión factor K y periodo, con curvas de ajustes para los datos. En la leyenda se indica la curva de ajuste y el coeficiente de correlación. b) Gráfico de dispersión factor K y altura de la ola máxima con todas las localidades, con curvas de ajustes para los datos. En la leyenda se indica las localidades y el símbolo que las identifica, además de la curva de ajuste y su coeficiente de correlación. Fuente: Elaboración Propia.

A pesar de que en la **Figura 8.a**, en el gráfico del factor K con el período se observa en la parte superior una línea recta en 1 y luego unas curvas que decrecen hasta $K=0.8$, este comportamiento en la dispersión no muestra una tendencia clara a simple vista, ya que la mayoría se encuentra agrupado en el primer tercio del período. Además, por los resultados obtenidos de acuerdo con el R^2 dando cercanos a cero.

En cambio, luego del nuevo análisis con el factor K y la altura máxima de ola H_{\max} , se observa en la **Figura 8.b** que los datos se encuentran más dispersos, pero tampoco se puede observar una tendencia clara.

Entonces, como los resultados no indican una relación muy clara entre las variables, se realiza otro tipo de análisis. Se generó un histograma con los datos del factor K para observar sus valores y su frecuencia. En el histograma (**Figura 9.a**) se observan las barras con sus peaks de frecuencias, la barra con una mayor cantidad de datos está en el rango de 0.9 a 1 con una frecuencia de 1070 datos. En la **Figura 9.b** se visualizan los datos con el diagrama de caja y bigotes, en que se obtuvo que la mediana de los datos está representada por una línea roja en la **Figura 9.b** dando un valor de 0.72, el primer cuartil es de $Q_1 = 0.41$ que comprende el 25% de los datos y un tercer cuartil de $Q_3 = 0.90$ que corresponde al 75% de los datos, esto quiere decir que los datos que se encuentran dentro de la caja comprenden el 50% del total de los datos y que la forma que tiene este diagrama indican un sesgo hacia la derecha, es decir una asimetría negativa, debido a que la media es menor a la mediana de los datos, ya que la mayor cantidad de datos que se repite es 1.

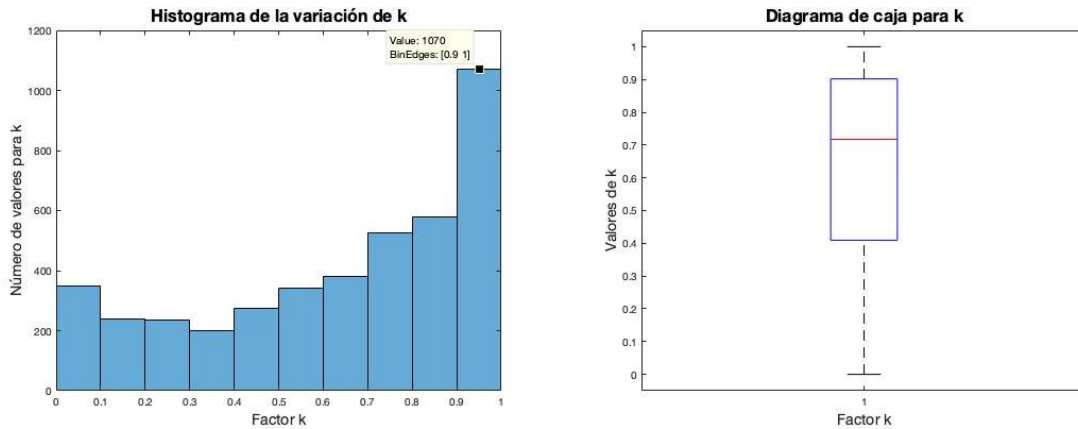


Figura 9. a) Histograma realizado a los valores del factor K. b) Diagrama de caja para los datos del factor K. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, esta dispersión en los datos observados en la **Figura 9.a**, se debe a que una mayor cantidad de datos se encuentra con valores del factor K entre 0.9 y 1.

Según los resultados y como se quiere dar un valor representativo del factor K , en relación con los datos de las localidades costeras, el promedio de K sería el dato más representativo con un valor de 0.63.

Puesto que, como se encontró que las variables de la velocidad (V_{max}), caudal (Q_{max}), HV^2 y el factor K están relacionados con la altura máxima de la ola de tsunami (H_{max}), el factor K al multiplicarlo por el período de la ola máxima (T) entrega la fracción del tiempo en que ocurre el caudal máximo (Q_{max}) asociado a la altura máxima de la ola (H_{max}).

En la **Figura 10** se compara la curva de la altura de la ola (H_{max}) y el caudal máximo (Q_{max}) asociada al periodo de la ola máxima de tsunami de la localidad de Talcahuano obtenido de las simulaciones numéricas, el cual representa $\frac{1}{4}$ del período (T). Donde el tiempo que hay entre H_{max} y Q_{max} es el dt . Es decir, el t asociado a Q_{max} es $\frac{1}{4}$ de T multiplicado por el factor K .

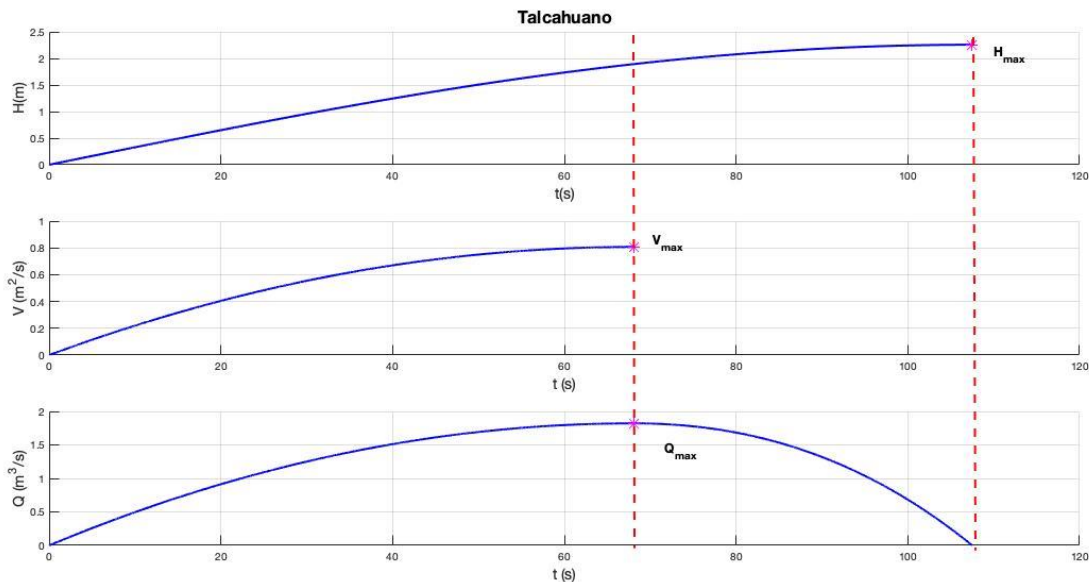


Figura 10. Curvas altura de ola máxima de tsunami (H_{max}), velocidad máxima (V_{max}) y caudal máximo (Q_{max}) asociado a esa ola en el tiempo que alcanza la altura máxima de la localidad Talcahuano a partir de resultados de simulación numérica. Fuente: Elaboración Propia.

La curva de altura máxima (H_{\max}) respecto al tiempo (t) está en el gráfico superior de la **Figura 10**, del cual se usó la ecuación de $H_{\max} * \sin(\omega t)$, para un tiempo T_m , que corresponde al $\frac{1}{4}$ del período de la ola máxima (T). En el segundo gráfico de la velocidad máxima (V_{\max}) respecto al tiempo (t) se usó la ecuación parabólica $-V_{\max} * t^2 + 2 * V_{\max} * t$. Finalmente, para el último gráfico del caudal máximo (Q_{\max}) respecto al tiempo (t) se obtuvo mediante la multiplicación de ambas gráficas. Estos cálculos y los gráficos de la **Figura 10**, se realizaron mediante el Software MATLAB.

Dado que, lo que se busca en esta investigación es escalar tsunamis para generarlos en el canal de olas de la UCSC, a estos datos de H_{\max} , T , V_{\max} , y Q_{\max} de la localidad de Talcahuano se les aplicó escala Froude con las ecuaciones Ec. (4) y Ec. (5), para las escalas de 1:100, 1:50, 1:40, 1:30 y 1:20. Los resultados de estos cálculos se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Valores escalados de los parámetros característicos.

Localidad	Escala	H máx. [m]	T [s]	V máx. [m ² /s]	Q máx. [m ³ /s]
Talcahuano	1:100	0.02	43.0	8.07e-04	1.82e-05
	1:50	0.04	60.81	0.0023	1.03e-04
	1:40	0.06	67.99	0.0032	1.80e-04
	1:30	0.07	78.51	0.0049	3.70e-04
	1:20	0.11	96.15	0.0090	0.0010

De la tabla se observa que, para generar una ola de 0.11 [m] en escala 1:20 su período T es de máximo 96.15 [s], es decir 1.6 [min] y que requiere para alcanzar estos datos de una velocidad de 0.009 [m/s] y un caudal de 0.001 [m³/s].

Las longitudes de ondas escalas se muestran en la **Tabla 9** y se calcularon con la Ec. (2).

Tabla 9. Valores escalados de la Longitud de onda.

Localidad	Escala	L [m]
Talcahuano	1:100	73.77
	1:50	104.32
	1:40	116.64
	1:30	134.68
	1:20	164.95

Por lo tanto, tampoco podrían ser generadas estas ondas de tsunami escalados dadas las condiciones del canal existente en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UCSC, ya que como se observa en los valores de la **Tabla 9**, si quiero generar la ola escalada con 1:20 para un H_{\max} de 0.11 [m] su longitud de onda (L) es de 164.95 [m] y el canal solo permite para la formación de la ola 17 [m].

4. DISCUSIÓN

Esta investigación caracteriza las variables hidrodinámicas de un tsunami para experimentos de laboratorio evaluando la generación de ondas de tsunami a escala en el canal de olas de la UCSC con generador de pistón, mediante registros de tsunamis reales y datos simulados de eventos de inundación por tsunami.

Los valores de altura máxima H y período T obtenidos de los registros reales son mucho más grandes que los que se obtuvieron a partir de los datos de simulaciones estocásticas. Del registro real se tiene a Dichato con una escala de 1:100 obteniendo una altura H de 0.7 [m] con 180 [s] de período T , a diferencia de Talcahuano de los datos estocásticos con un H de 0.23 [m] con 43.002 [s] de período T . Esta diferencia de los valores se da por la forma en que se registraron los datos, a pesar de que ambos cuentan con registros mediante mareógrafos, la ubicación del real y el virtual es diferente. El mareógrafo virtual cumple con lo propuesto por Madsen (2008) el cual propone tomar las series temporales de entrada en el límite de la costa, ya que son datos más representativos y no se verían afectados por los fenómenos de refracción, reflexión, entre otros., de la ola una vez que inunde la costa, como es el caso de los datos registrados por el mareógrafo real.

Para generar ondas a escala en un canal de pistón, las olas deben tener un período de 15 a 20 segundos, que son muy cortos para el período de tsunami. El generador de ondas del tipo pistón presenta la ventaja de representar tsunamis a escala en un entorno controlado usando datos de las variables características, además de presentar la capacidad de repetir los experimentos bajo diferentes escenarios. Las desventajas que presenta es la de tener la longitud de onda y el período de la ola limitados por la longitud de la carrera (Stroke), lo que implicaría en un alto costo de construcción, operación y mantenimiento. Algunos estudios han señalado desafíos en la reproducción precisa de condiciones de oleaje complejas con sistemas basados en pistones debido a la inercia y retrasos en la respuesta del sistema (Chen et al., 2017).

Los mecanismos de generación de ondas mencionadas en esta investigación, excepto el de generación por bombas, no pueden ser aplicados en el canal. El mecanismo de rotura de presa aplica mejor a modelos de representación de perforaciones en tierra, el método de la tabla es más aplicable a la región fuente de un tsunami tectónico y el generador neumático incluye en el proceso de generación el aire que queda atrapado resultando en una superficie de agua no suave ni continua (Goseberg et al., 2013).

Los canales de olas accionados por bombas permiten un control preciso sobre la altura, período y forma de las olas generadas (Goseberg et al., 2013) mismos parámetros que se pueden obtener a través de los datos de simulaciones numéricas de tsunamis a partir de escenarios estocásticos. La ventaja de implementar este modelo es que permite la reproducción de ondas de largos períodos o longitudes de ondas independiente de la longitud de las instalaciones. Estudios muestran la eficacia de los canales de olas accionados por bombas en la generación de olas de baja y alta frecuencia con una alta precisión (Zhang et al., 2019). Otras eficacias que presenta es la generación precisa, estabilidad del sistema mediante el uso de técnicas de diseño de control que aseguran la estabilidad (Goseberg et al., 2020). Este método es una herramienta adecuada en la ingeniería de costas para estudiar el movimiento de ondas largas en la costa y la dinámica de aceleración en modelos físicos a escala, como en la aplicación del avance de la ola en la playa y su interacción con obstáculos. Un estudio reciente aplicó este modelo para estudiar las olas de largos períodos producidas por barcos y cómo las cargas de los buques inducen a impactos causando daños en terraplenes y estructuras a escala de laboratorio, utilizando un canal de olas de similares dimensiones al existente en el laboratorio de la universidad (Carstensen et al., 2023).

5. CONCLUSIÓN

Esta investigación desarrolló un análisis caracterizando los parámetros de ola de un tsunami, a partir de datos reales de los tsunamis ocurridos en Chile en los años 2010, 2014 y 2015. Además, de los datos otorgados por una base de datos generada mediante eventos de inundación por tsunami simulados numéricamente, la cual se realizó con topografía de alta resolución. El fin de esta investigación es el de generar tsunamis reales escalados en el canal de olas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción cuyo método de generación de olas es el accionado por pistón. A partir de esto, las principales conclusiones son las siguientes:

- La generación de tsunamis reales escalados usando sólo los parámetros de ola como altura (H) y período (T) no es posible de ser realizados en el canal, ya que los resultados indican que para generar esas ondas la longitud de onda (L) calculada es extremadamente grande necesitando una gran distancia de desplazamiento, siendo imposible de generarse en el laboratorio dadas las condiciones de longitud del canal.
- El factor K resultante del análisis de la base de datos de eventos simulados, es un valor representativo para los datos de todas las localidades costeras analizadas, el cual sirve para determinar la diferencia de tiempo (dt), período de la altura de la ola máxima ($T_{H_{max}}$) y período del caudal máximo ($T_{Q_{max}}$), teniendo los parámetros de ola como la H_{max} , T_{max} y Q_{max} .
- Los datos otorgados por la simulación numérica al ser diseñada considerando una topografía de alta resolución y posicionar el mareógrafo virtual en la línea de costa, entrega valores más cercano a la realidad en cuanto al proceso de inundación por tsunami, ya que, los datos reales son tomados por mareógrafos que se encuentran a una corta distancia de la costa, pero posicionados en el mar. Por lo tanto, los períodos de ola de los registros reales se ven afectados por el fondo marino produciéndose fenómenos físicos como: reflexión, refracción y difracción.

Por lo tanto, es posible generar un tsunami escalado bajo condiciones controladas y con el equipo adecuado, pero requiere de un diseño óptimo, una implementación precisa, un enfoque metódico para garantizar la seguridad y la precisión de los resultados obtenidos, dado que, estas variables analizadas mediante la base de datos simulados sirven como datos de entrada para generar el tsunami escalado en el canal. Por lo que, el método de generación de olas adecuado, para implementar en el laboratorio de la Facultad de ingeniería de la UCSC es el propuesto por Goseberg (2013). Ya que, es una técnica de generación de olas accionada por bombas la cual intenta modelar el impacto de tsunami en la costa, siendo útil para estudios posteriores como el de socavación alrededor de estructuras.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó mediante el apoyo y financiamiento en el marco del proyecto FONDECYT 1210496.

7. REFERENCIAS

- An, C., Sepúlveda, I., & Liu, P. L.-F. (2014). Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, earthquake. *Geophysical Research Letters*, *41*(11), 3988–3994. <https://doi.org/10.1002/2014GL060567>
- Aránguiz, R. (2018). *Tsunamis en la Región del Biobío: Desde una mirada multidisciplinaria*. Ediciones UCSC.
- Aránguiz, R., Ramos, M., Sepúlveda, I., & Villagra, P. (2024). A new generation of tsunami inundation maps of Chilean cities: Tsunami source database and probabilistic hazard analysis. *Coastal Engineering Journal*, *66*(2), 361–379. <https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2326269>
- Aránguiz, R., Urra, L., Okuwaki, R., & Yagi, Y. (2018). Development and application of a tsunami fragility curve of the 2015 tsunami in Coquimbo, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *18*(8), 2143–2160. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2143-2018>
- Bobadilla, I., Muñoz, R. A., & Carrasco, J. G. (2022). Características de las ondas de tsunami en San Antonio, Chile. [Tesis pregrado]. *Universidad Católica de la Santísima Concepción*.
- Bravo, V., Aránguiz, R., & Villagrán, M. (2023). Análisis de las limitaciones del canal de olas de la UCSC para la generación de Tsunamis y olas regulares. [Tesis pregrado]. *Universidad Católica de la Santísima Concepción*.
- Carstensen, C., Melling, G., Kondziella, B., & Tretau, L. (2023). *Pump-Driven Generation of Long-Period Ship Waves in Experimental Flumes*. 3367–3375. https://doi.org/10.3850/978-90-833476-1-5_jahr40wc-p1563-cd
- Chanson, H., & Aoki, S. (2003). AN EXPERIMENTAL STUDY OF TSUNAMI RUNUP ON DRY AND WET HORIZONTAL COASTLINES. *Science of Tsunami Hazards*, *20*(5), 278.
- Chen, M., Chen, K., & You, Y.-X. (2017). Experimental investigation of internal solitary wave forces on a semi-submersible. *Ocean Engineering*, *141*, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.027>
- CIGIDEN. (2018). Guía para la Estimación de Peligro de Tsunami. *Proyecto SATREPS Tsunami*, *1*, 29. <https://www.cigiden.cl/wp-content/uploads/2018/12/GUIA-PELIGRO-TSUNAMI-HZ.pdf>
- Costas de Chile: Medio natural, cambio climático, ingeniería oceánica, gestión costera* (with Wincker, P., & Herrera Araya, M.). (2019). Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- Goring, D. G. (1979). Tsunamis-The propagation of long waves onto a shelf. *Pasadena: California Institute of Technology*, 337.
- Goseberg, N., Hafen, H. V., Ballesteros, P., Kerpen, N. B., & Schlurmann, T. (2020). ARBITRARY GENERATION OF VERY LONG, AND TSUNAMI-LIKE WAVES USING AN OPTIMIZED PUMP-DRIVEN METHOD. *Coastal Engineering Proceedings*, *36v*, 17. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.currents.17>
- Goseberg, N., Wurpts, A., & Schlurmann, T. (2013). Laboratory-scale generation of tsunami and long waves. *Coastal Engineering*, *79*, 57–74. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.04.006>
- Madsen, P. A., Fuhrman, D. R., & Schäffer, H. A. (2008). On the solitary wave paradigm for tsunamis: ON THE SOLITARY WAVE PARADIGM FOR TSUNAMIS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *113*(C12). <https://doi.org/10.1029/2008JC004932>
- Martínez, C., Rojas, O., Aránguiz, R., Belmonte, A., Altamirano, Á., & Flores, P. (2012). Riesgo de tsunami en caleta Tubul, Región del Biobío: Escenarios extremos y transformaciones territoriales posterremoto. *Revista de geografía Norte Grande*, *53*, 85–106. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000300006>
- Martínez, C., Rojas, O., Villagra, P., Aránguiz, R., & Sáez-Carrillo, K. (2017). Risk factors and perceived restoration in a town destroyed by the 2010 Chile tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *17*(5), 721–734. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-721-2017>
- McGovern, D. J., Chandler, I. D., Allsop, W. H., & Granged, I. B. (2016). *UNDERSTANDING WAVE GENERATION IN PNEUMATIC TSUNAMI SIMULATORS*.



- Monaghan, J. J., & Kos, A. (2000). Scott Russell's wave generator. *Physics of Fluids*, 12(3), 622–630. <https://doi.org/10.1063/1.870269>
- NOAA Center for Tsunami Research. (2010). *Tsunami Event—February 27, 2010 Chile Local Valparaiso Modeling Results* (Modeling Results Tsunami Event-February 27, 2010 Chile Local Valparaiso). <https://nctr.pmel.noaa.gov/chile20100227/chile20100227-valparaiso.html>
- Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I., & Robinson, D. I. (2011). Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator. *Coastal Engineering*, 58(6), 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.012>
- Zhang, H., Liu, S., Li, J., & Wang, L. (2019). Establishment of Numerical Wave Flume Based on the Second-Order Wave-Maker Theory. *China Ocean Engineering*, 33(2), 160–171. <https://doi.org/10.1007/s13344-019-0016-6>