



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

EVALUACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA DEFINIR CRITERIOS DE EVACUACIÓN FRENTE A TSUNAMIS EN NUEVE CIUDADES COSTERAS DE CHILE

Memoria de Título presentada por

Lautaro Zamora Quitral

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Catalán Mondaca

Julio de 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

**CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO**

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: EVALUACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA DEFINIR CRITERIOS DE EVACUACIÓN FRENTE A TSUNAMIS EN NUEVE CIUDADES COSTERAS DE CHILE

Nombre del candidato(a): Lautaro Zamora Quitral

Carrera / Grado: Ingeniería Civil / Ingeniero Civil Obras Civiles

Campus: San Joaquín

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Patricio Catalán, en mi calidad de profesor(a)

guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02-09-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02-09-2026

Firma:



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

**EVALUACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA DEFINIR CRITERIOS DE
EVACUACIÓN FRENTE A TSUNAMIS EN NUEVE CIUDADES COSTERAS DE CHILE**

AUTOR:

Lautaro Zamora Quitral

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de
INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Patricio Catalán Mondaca.	
Miembro 1 Comisión	Miguel Lagos Zúñiga.....	
Miembro 2 Comisión		

Santiago, Chile, Julio de 2026



EVALUACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA DEFINIR CRITERIOS DE EVACUACIÓN FRENTE A TSUNAMIS EN NUEVE CIUDADES COSTERAS DE CHILE

Lautaro Zamora Quitral¹, Patricio Catalán Mondaca²

¹ UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Resumen

Chile cuenta con el Sistema Integrado de Pronóstico y Alerta de Tsunamis (SIPAT), que clasifica la costa en cuatro niveles de alerta según la amplitud del tsunami registrada en el mareógrafo (PCA). Con el objetivo de aportar a su mejora continua, esta memoria evaluó una nueva metodología para definir criterios de evacuación más específicos, adaptados a la morfología de cada localidad, en nueve ciudades costeras de Chile (Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio, Constitución y Talcahuano), a partir de 40.500 escenarios sísmicos simulados.

Se analizó la relación entre el PCA y el área de inundación estimada en cada ciudad, identificando tres patrones de comportamiento morfológico: ciudades con mayor vulnerabilidad relativa (Arica, Coquimbo, San Antonio), ciudades con respuesta lineal y predecible (Iquique, Antofagasta, Quintero), y ciudades con cambios abruptos asociados a barreras topográficas (Valparaíso y Talcahuano). Asimismo, se identificó el rol de esteros y cuerpos de agua interiores, como el Estero Marga Marga, entre otros.

A partir de estos hallazgos, se propuso ampliar el primer umbral de evacuación (estado de Precaución) para seis de las nueve ciudades, manteniendo un máximo de 10% de área inundada dentro de la franja de evacuación, sin comprometer la seguridad de la población. La investigación constituye un aporte práctico a la mejora del SIPAT, al proponer una metodología replicable y cuantitativa para ajustar los criterios de evacuación a escala local.

Palabras clave: Tsunami, SIPAT, Alerta temprana, Evacuación, Inundación, Morfología costera, PCA, Chile.



1. Contextualización

Los tsunamis son fenómenos oceánicos de gran escala caracterizados por la propagación de ondas de gran longitud que pueden recorrer miles de kilómetros y aumentar su altura al acercarse a la costa debido a la disminución de la profundidad del mar. Estos eventos pueden ser generados por terremotos submarinos en zonas de subducción, deslizamientos de tierra o erupciones volcánicas. Su velocidad y fuerza son las características que los convierten en amenazas altamente destructivas para la vida humana (SENAPRED 2023).

A nivel global, los tsunamis constituyen un riesgo permanente para las poblaciones costeras, debido a su naturaleza impredecible y a su capacidad de causar pérdidas humanas y económicas. Los tsunamis del Océano Índico de 2004 y de Tohoku, Japón, en 2011 causaron aproximadamente 230.000 y 22.000 víctimas fatales respectivamente, y motivaron un esfuerzo global por mejorar el monitoreo, la alerta temprana y la evaluación del peligro de tsunami (Mori et al., 2022). Si bien se conocen tsunamis que han alcanzado alturas cercanas a los 30 metros, olas de entre 3 y 6 metros mucho más frecuentes, han demostrado ser igualmente destructivas, generando pérdidas económicas significativas.

El terremoto (Mw 8,8) y tsunami del Maule, Chile, del 27 de febrero de 2010, demostró que el país no estaba preparado para un evento de esta magnitud. El procedimiento vigente en ese entonces consideraba únicamente información sísmica básica, como lo es la magnitud y la ubicación del epicentro, para alimentar un diagrama de flujo de decisión que estimaba una única categoría de peligro para todo el país, sin considerar la distancia relativa a la fuente desde cada punto costero ni efectos locales como resonancia o actividad de ondas de borde. En base a esta categoría única, se emitía una única orden de evacuar o no evacuar para todo el territorio.

Durante el tsunami de Maule 2010, el peligro fue subestimado. En cambio, en los terremotos de Pisagua 2014 e Illapel 2015, aunque el peligro fue correctamente estimado, la orden de evacuación de todo el país resultó una respuesta desproporcionada, evacuándose zonas que no iban a recibir un tsunami capaz de generar daños significativos. En ambos casos, la imprecisión de la orden puede afectar la confianza pública en el sistema de decisión.

Como consecuencia, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), única institución responsable de la evaluación del peligro de tsunami en el país identificó la necesidad de actualizar sus sistemas y procedimientos. Entre las medidas adoptadas se fortaleció la capacidad instrumental: al 27 de febrero de 2010, la red de nivel del mar contaba con solo 18 estaciones de sensor único a lo largo del país, que recopilaban datos cada 2 minutos, pero los reportaban solo cada hora. Para julio de 2019, la red había sido expandida a 45 estaciones que reportaban cada minuto.

Frente a esta amenaza latente y a las limitaciones evidenciadas por el procedimiento anterior, Chile desarrolló un sistema de alerta temprana operado por el SHOA en coordinación con el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED): el Sistema Integrado de Pronóstico y Alerta de Tsunamis (SIPAT). Este es un sistema de soporte y ayuda a la decisión basado en una extensa base de datos de escenarios de tsunamis precomputados, que evalúa el peligro para 21 bloques costeros y clasifica la costa en cuatro niveles de alerta (Informativo, Precaución, Alerta y Vigilancia) según la amplitud del tsunami estimada en la costa (Catalán et al., 2020).

En la línea de aportar a la mejora del SIPAT es que nace la idea de esta memoria, se requiere desarrollar criterios de evacuación más precisos y adaptados a cada zona. Los criterios generales pueden inducir evacuaciones innecesarias y disminuir la confianza en las alertas. Mejorar su precisión permitirá optimizar la respuesta y fortalecer la resiliencia de las comunidades costeras ante futuros tsunamis.

2. Marco teórico

2.1 Máxima Amplitud en Costa (PCA)

La Amplitud máxima del tsunami en la costa (Peak Coastal Amplitude, PCA), corresponde a la máxima altura de ola que un tsunami registra al aproximarse a la costa, este parámetro es fundamental para poder caracterizar un tsunami, ya que su potencial destructivo depende en gran medida de la altura alcanzada por la ola en la línea de costa.

A continuación, se muestra un esquema que ilustra el PCA:

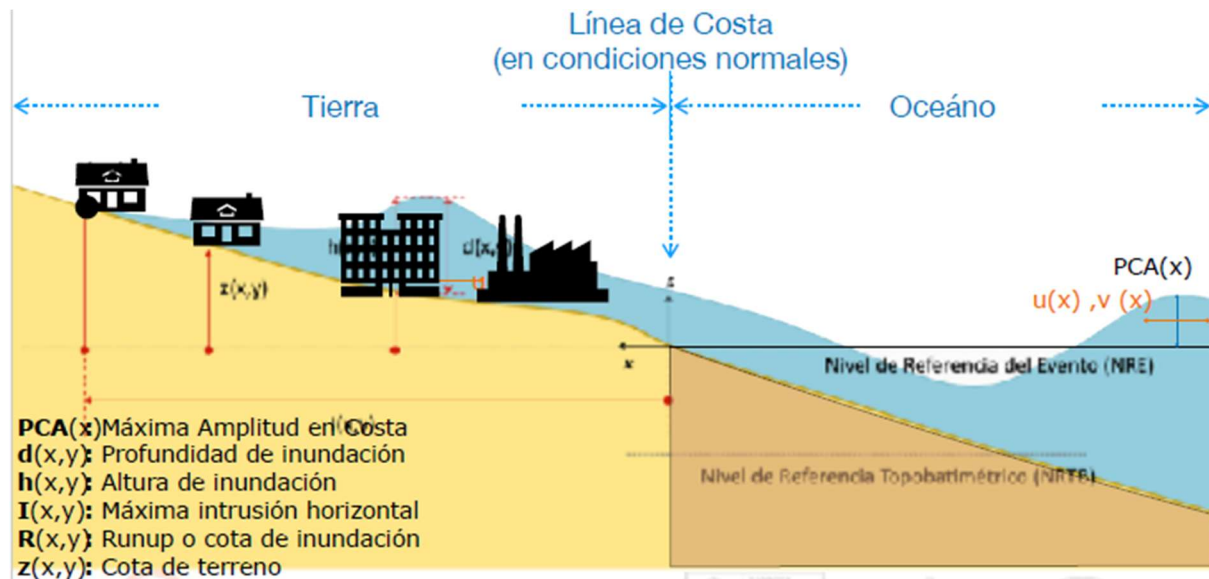


Fig 1. Esquema ilustrativo PCA. Fuente: Catalán, 2024.

En la figura se puede observar un perfil transversal de la zona costera, donde se puede distinguir el continente y el océano en condiciones normales, el valor del PCA se determina en el océano como la máxima amplitud alcanzada por la ola por sobre el nivel de referencia del mar. Además, en él se definen otras variables asociadas al fenómeno de tsunami dentro de las cuales está la Profundidad de inundación $d(x,y)$, Altura de inundación $h(x,y)$, Máxima intrusión horizontal $I(x,y)$ y Run up $R(x,y)$.

El PCA corresponde al dato de entrada para la toma de decisiones según el protocolo de alerta vigente, ya que a partir de su valor registrado o estimado se determina el estado de alerta correspondiente y las medidas de evacuación asociadas. En el contexto de esta memoria, el PCA se estima en la ubicación de los mareógrafos considerados para cada una de las 9 ciudades analizadas.

Es importante distinguir el PCA de la magnitud del sismo (M_w), si bien ambas variables están relacionadas, un mismo valor de magnitud puede generar valores de PCA muy distintos según la ubicación de la falla y la forma en que ésta rompe, es por este motivo que el PCA es un indicador más directo que la magnitud.

2.2 Monitoreo de tsunamis

El monitoreo en tiempo real constituye un componente fundamental dentro de los sistemas de alerta temprana de tsunamis. Para ello, se utilizan instrumentos como mareógrafos y boyas de presión que permiten registrar las variaciones del nivel del mar asociadas tanto a la marea astronómica como perturbaciones de origen sísmico. En Chile, la institución encargada de la vigilancia del mar y de la generación de alertas de tsunamis en el territorio nacional es el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

En el contexto de este estudio, los mareógrafos corresponden a los puntos donde se estima el PCA definido en la sección anterior, para cada uno de los escenarios sísmicos.

La tabla a continuación presenta las ubicaciones geográficas de los puntos de mareógrafos considerados en este estudio:

Tabla 1. Ubicación Mareógrafos de 9 ciudades de Chile.

Ciudad	Latitud	Longitud
Arica	-18.471224	-70.323578
Iquique	-20.204578	-70.147827
Antofagasta	-23.653133	-70.404449
Coquimbo	-29.950066	-71.335297
Quintero	-32.775555	-71.525269
San Antonio	-33.581627	-71.618195
Valparaíso	-33.027309	-71.625946
Constitución	-35.355919	-72.458099
Talcahuano	-36.695381	-73.106232

2.3 Sistemas de Alerta Temprana

En Chile, la gestión de la alerta de tsunamis está regulada por el Protocolo ONEMI-SHOA (2016), que establece distintos estados de alerta según la Amplitud Máxima de Tsunami en la Costa (Peak Coastal Tsunami Amplitude, PCA) prevista o registrada. Este protocolo define cuatro categorías: Informativo, Precaución, Alerta y Vigilancia, cada una asociada a medidas de evacuación que deben ser implementadas por la población y las autoridades.

A continuación, se muestran los estados de alerta establecidos en el protocolo vigente:

Tabla 2. Fuente: Protocolo ONEMI-SHOA (2016).

Estado de alerta	PCA (Amplitud máxima en costa)	Acción requerida
Informativo	< 0.3 m	No se requiere acción
Precaución	0.3 – 1.0 m	La población debe evacuar 80 m tierra adentro desde cualquier línea de costa o ribera de ríos
Alerta	1.0 – 3.0 m	La población debe evacuar hacia la zona segura
Vigilancia	> 3.0 m	La población debe evacuar hacia la zona segura

Este esquema busca proporcionar una respuesta uniforme y estandarizada para todo el territorio nacional, permitiendo que la población reciba instrucciones claras en función de la magnitud estimada de la amenaza.

No obstante, la aplicación uniforme de un mismo umbral de altura puede llevar a evacuaciones excesivas en ciertas localidades o, por el contrario, a una subestimación del peligro en otras, afectando la confianza de la población en el sistema de alerta.

Catalán et al. (2020) plantean la necesidad de avanzar hacia criterios de alerta más específicos, adaptados a escala regional o local, que no solo consideraren la altura de la ola registrada en el mareógrafo (PCA), sino que también la morfología costera y cómo esta influye en la inundación generada por el tsunami, bajo este enfoque, sería posible desarrollar protocolos de evacuación más realistas y específicos para cada ciudad, incrementando la efectividad del sistema de alerta temprana.



2.4 Modelación y simulación de tsunamis

Con el fin de caracterizar el comportamiento de la inundación costera ante distintos escenarios sísmicos, el presente estudio considera un total de nueve ciudades: Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio, Constitución y Talcahuano. Esta selección abarca una amplia diversidad de morfologías costeras, lo que permitirá ver si existe una diferencia entre lo relevante que puede ser la morfología costera en el comportamiento de la inundación.

Para cada ciudad se obtuvieron 20 magnitudes sísmicas, comprendidas en el rango de Mw 7.5 a Mw 9.4, con incrementos de 0.1 unidades en la escala de momento. A su vez, cada magnitud está representada por 225 escenarios independientes, lo que da lugar a un total de 4.500 escenarios por ciudad. Considerando las 9 ciudades estudiadas, el conjunto completo de simulaciones es de 40.500 escenarios, los cuales constituyen la base del análisis desarrollado en este trabajo.

Además, cada simulación numérica responde 3 preguntas a la hora de ser realizada:

- ¿Qué magnitud tiene el terremoto a modelar?
- ¿Dónde se produce la falla?
- ¿De qué manera se produce la falla?

Estos son los inputs que generan distintos escenarios de inundación para cada magnitud en cada ciudad. Cada escenario está compuesto por un conjunto de archivos que almacenan la información necesaria para reconstruir tanto el mapa de la zona de estudio como la inundación generada en la ciudad correspondiente, los archivos son los siguientes:

- **Flowdepth:** Representa la altura del agua sobre el terreno en cada celda de la grilla, es decir, la inundación que genera el tsunami en un escenario específico. A partir de esta variable, el área inundada se calcula contabilizando la superficie total de aquellas celdas de la grilla cuyo flowdepth presenta valores positivos.
- **Surge:** Representa la elevación del mar con respecto al nivel medio inicial, es decir, indica cual es el valor de la altura de la ola en el mar, de este archivo se obtiene el valor de PCA en la ubicación que le corresponde al mareógrafo de cada ciudad.
- **Deformación:** Representa el cambio en la batimetría producto del terremoto que genera el tsunami.

La resolución espacial de la grilla varía según la ciudad modelada, reflejando la zona de interés geográfica de cada zona costera. El número de celdas oscila entre 55.552, correspondiente a Quintero que tiene 224 pixeles de latitud y 248 longitud y 603.136 celdas, correspondiente a Talcahuano, que tiene 608 pixeles de latitud y 992 pixeles de longitud. Esta variabilidad responde a la amplitud del área inundable que se quiere estudiar, por ejemplo, Talcahuano y Arica tienen dominios espaciales considerablemente mayores a Quintero y San Antonio.

La grilla es idéntica entre los 3 archivos (Flowdepth, Surge y Deformación) que se utilizan para reconstruir el mapa de inundación, esto garantiza la coherencia espacial de los mapas de inundación.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Proponer y evaluar una actualización de los criterios de caracterización de la amenaza para evacuación ante tsunamis.

3.2 Objetivos Específicos

OE 1: Analizar la correlación entre métricas de inundación ante tsunamis con métricas disponibles en mar abierto (profundidad de inundación), para nueve ciudades de Chile.

OE 2: Evaluar estadísticamente si es factible proponer nuevos criterios.

OE 3: Definir criterios de evacuación específicos para la zona de estudio, a partir de los resultados de la modelación y la caracterización local.



4. Metodología

4.1 Etapa 1:

Actividades:

- Definir métricas de inundación relevantes para el estudio, considerando el valor del PCA y área inundada como principales indicadores.
- Recopilar datos de simulaciones, Incluyendo los datos de PCA en los puntos asociados a los mareógrafos de interés.
- Preparar y organizar las bases de datos en formato NetCDF compatible con Python.

Métodos: Uso de herramientas de procesamiento de datos en Python (bibliotecas *xarray*, *numpy* y *matplotlib*) para la lectura y almacenamiento de archivos NetCDF. La batimetría y las alturas del nivel del mar se integraron en un mismo dominio espacial, garantizando coherencia en la resolución y extensión geográfica de los datos.

4.2 Etapa 2

Actividades:

- Determinar el valor del PCA en el punto asociado a los mareógrafos de interés, ubicando dichos mareógrafos en la grilla simulada.
- Aplicar una máscara de inundación sobre los campos de altura máxima del nivel del mar, con el fin de identificar el área afectada en cada escenario.
- Calcular el área inundada para cada escenario de estudio.
- Gráficos individuales por ciudad: Realizar gráficos que relacionen el área de inundación con el valor de PCA en el mareógrafo de interés para cada ciudad de estudio.
- Gráficos comparativos entre ciudades: Elaborar gráficos que permitan comparar el comportamiento de la inundación entre las distintas ciudades analizadas. En estos gráficos, la ciudad de interés se representa en azul, mientras que las demás ciudades se muestran en gris.
- Gráficos de porcentaje de inundación: Evaluar el primer umbral de evacuación según el porcentaje de inundación a 80 m de cualquier cuerpo de agua.

Métodos: Modelación numérica mediante Python, almacenamiento de resultados, elaboración de mapas de inundación y generación de gráficos individuales y comparativos entre ciudades mediante Python.

4.3 Etapa 3

Actividades:

- Analizar los resultados obtenidos para evaluar la inundación frente a variaciones en el valor de PCA registrado en el mareógrafo.
- Comparar las tendencias observadas con los criterios actuales del protocolo ONEMI-SHOA (2016), identificando posibles ajustes o mejoras a nivel local.
- Proponer un criterio de umbrales de evacuación adaptados a las características morfológicas de los sitios de interés.

Métodos: Análisis comparativo y evaluación estadística de resultados simulados. Integración de los hallazgos con la normativa vigente, con miras a desarrollar criterios de alerta y evacuación más específicos y realistas para la costa de Chile.

5. Resultados

5.1 Mapas de inundación

A partir del procesamiento de las simulaciones numéricas de tsunamis para diferentes magnitudes sísmicas (rango desde 7.5 a 9.4 Mw), se generaron máscaras de inundación que permiten identificar las zonas afectadas por el ascenso del nivel del mar.

Estas máscaras se construyeron aplicando un umbral sobre el campo de altura máxima, eliminando valores negativos o correspondientes a zonas oceánicas. El resultado es un mapa que distingue entre celdas inundadas y celdas no inundadas, en color rojo se puede observar las celdas inundadas, el color celeste corresponde al mar y en color beige se puede observar la tierra no afectada por la inundación, además, se puede observar la línea que divide tierra y mar, junto con el punto asociado al mareógrafo de cada ciudad en color azul.

Dado el volumen total de 40.500 escenarios simulados, se seleccionaron tres mapas representativos para cada una de las nueve ciudades estudiadas (Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, San Antonio, Valparaíso, Constitución y Talcahuano), correspondientes a las magnitudes Mw 7.5, Mw 8.3 y Mw 9.2. En todos los casos se utilizó el escenario número 20 del conjunto de 225 simulaciones disponibles por magnitud. Esta selección permite ilustrar de manera progresiva el comportamiento de la inundación en función de la magnitud del terremoto, de este modo, se facilita la identificación de las zonas costeras con mayor susceptibilidad a ser inundadas en cada ciudad.

Para el caso de Valparaíso, fue necesario dejar fuera del análisis al Estero Marga Marga, un cauce que se interna hacia el interior de la ciudad y que presenta un comportamiento de inundación distinto al que se observa en el resto de la costa de Valparaíso, ya que corresponde a una zona fácilmente inundable. Incluirlo en el análisis genera valores anómalos de inundación que no representan el comportamiento del resto de la ciudad. Por este motivo, se presentan tanto el mapa que considera el estero como el mapa que lo excluye, con el fin de comparar el efecto de esta exclusión sobre los resultados. Para realizar el corte se utilizó la coordenada de longitud 71,587964° O, punto que corresponde al límite que separa Valparaíso de Viña del Mar.

A continuación, se muestran los mapas de inundación de las 9 ciudades estudiadas:

Resultados mapas de inundación Arica:

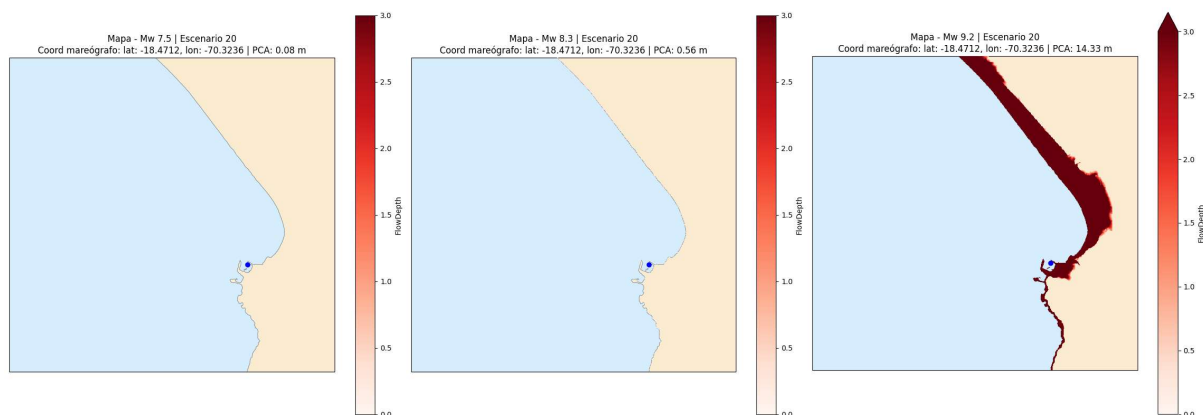


Fig 2. Mapas ciudad de Arica

Resultados mapas de inundación Iquique:

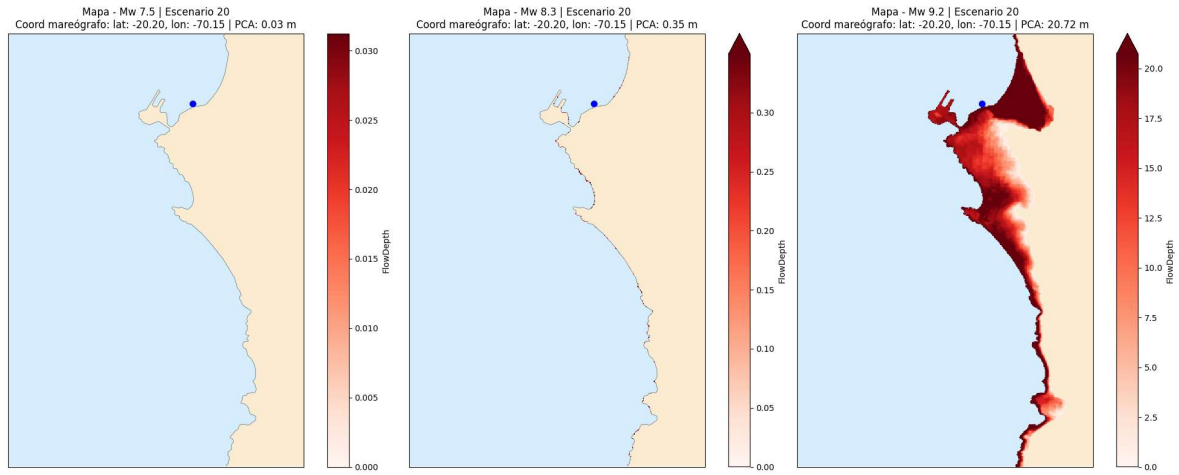


Fig 3. Mapas ciudad de Iquique

Resultados mapas de inundación Antofagasta:

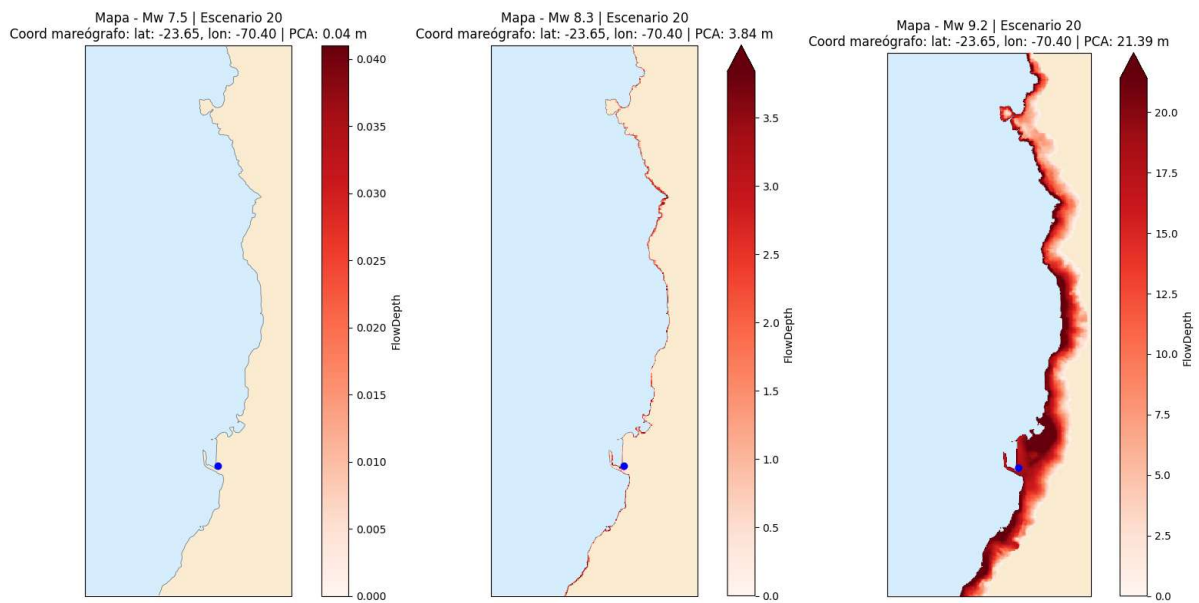


Fig 4. Mapas ciudad de Antofagasta

Resultados mapas de inundación Coquimbo:

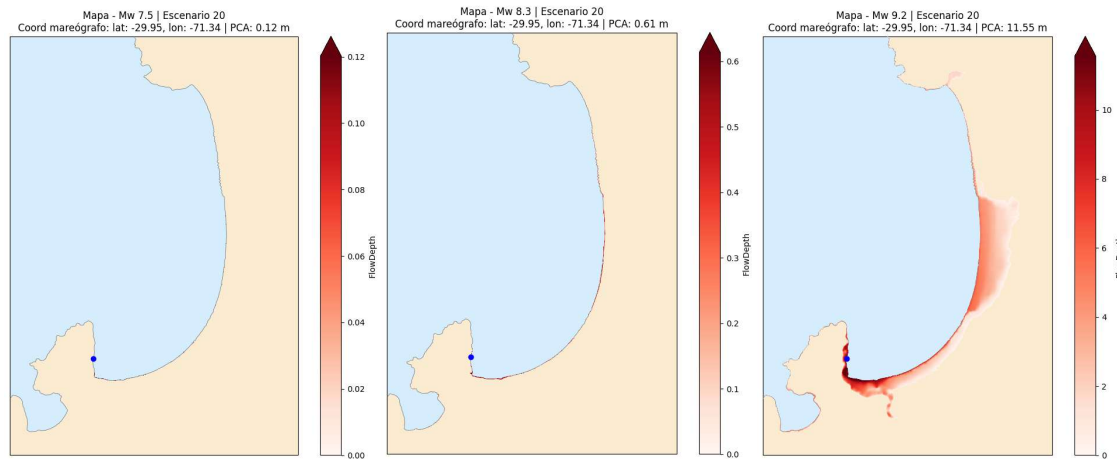


Fig 5. Mapas ciudad de Coquimbo

Resultados mapas de inundación Quintero:

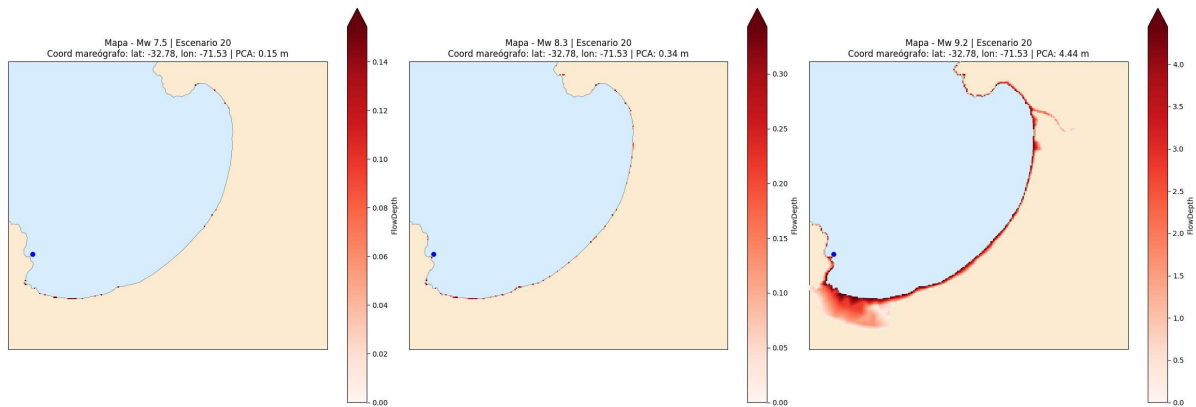


Fig 6. Mapas ciudad de Quintero

Resultados mapas de inundación San Antonio:

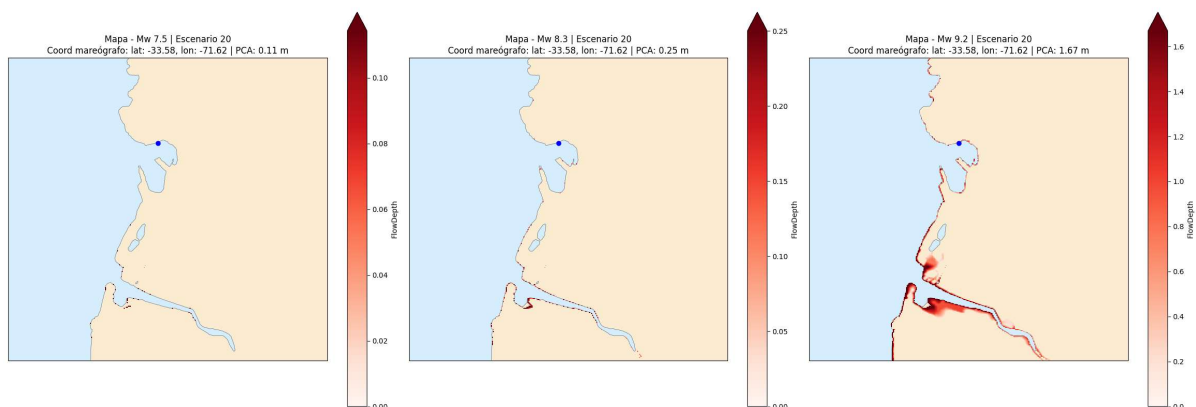


Fig 7. Mapas ciudad de San Antonio

Resultados mapas de inundación Valparaíso:

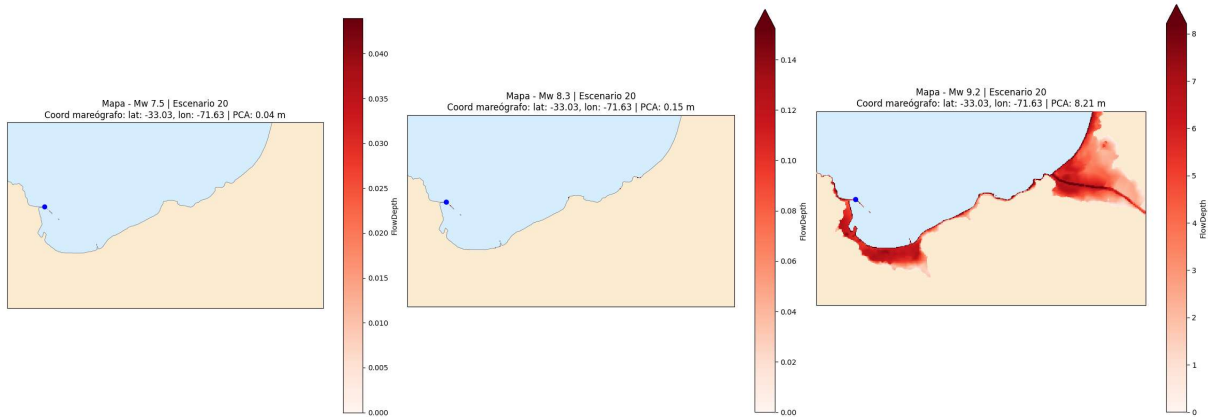


Fig 8. Mapas ciudad de Valparaíso incluyendo el Estero Marga Marga.

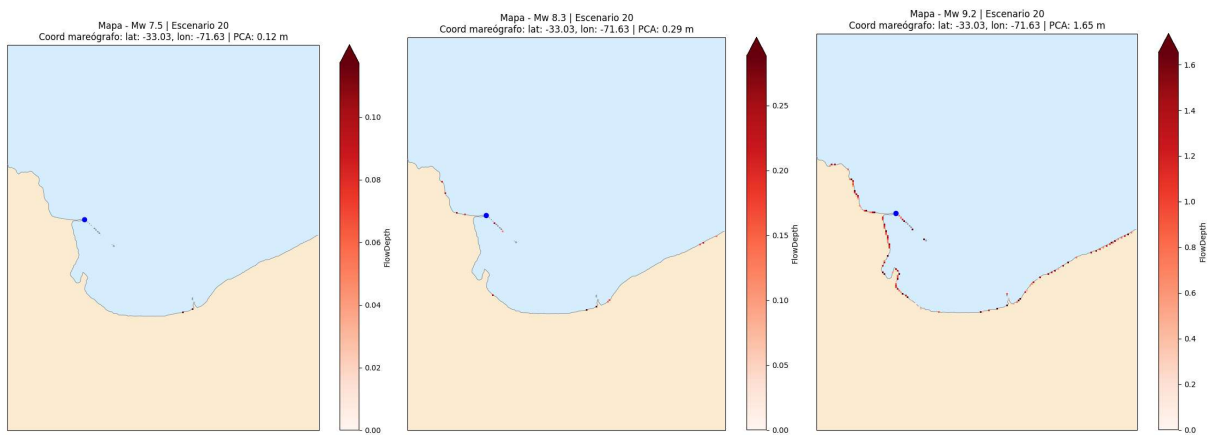


Fig 9. Mapas ciudad de Valparaíso excluyendo el Estero Marga Marga

Resultados mapas de inundación Constitución:

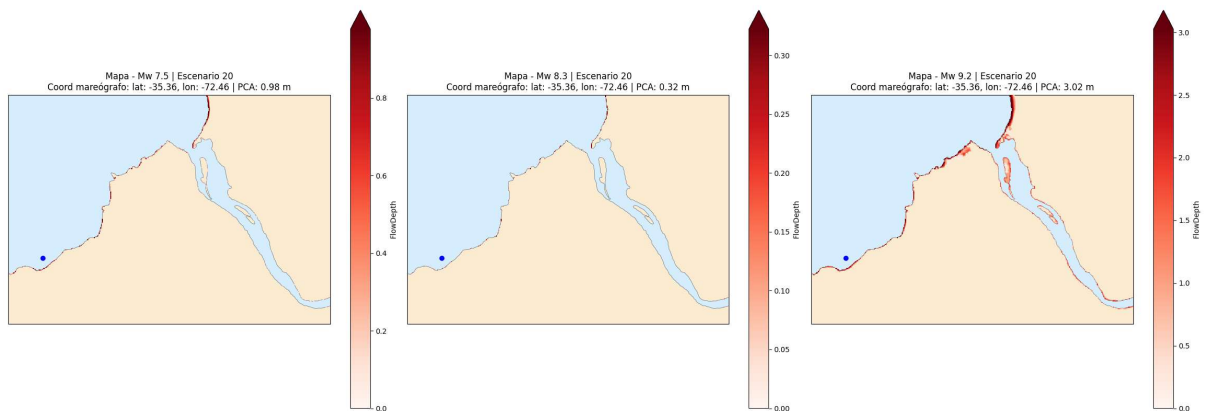


Fig 10. Mapas ciudad de Constitución

Resultados mapas de inundación Talcahuano:

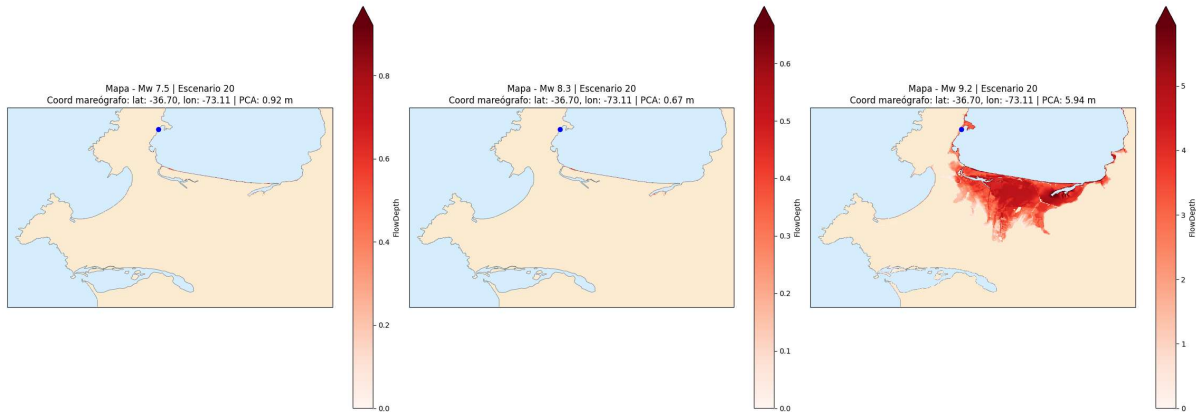


Fig 11. Mapas ciudad de Talcahuano

5.2 Relación entre la altura de la ola y el área inundada

Posteriormente, se analizó la relación entre la Máxima amplitud en costa (PCA) registrada en el punto asociado a la ubicación del mareógrafo y el área total de inundación estimada a partir de la máscara de inundación generada en cada simulación. Ambos ejes se presentan en escala logarítmica, lo que permite visualizar el comportamiento de la relación a lo largo de varios órdenes de magnitud.

Cada punto en el gráfico corresponde a una simulación con distinto valor de PCA y magnitud de área inundada, lo que permite visualizar una correlación positiva entre ambas variables. Se observa además que los puntos se agrupan progresivamente según la magnitud del evento sísmico, representada mediante una escala de colores que va desde azul claro para las magnitudes menores (Mw 7.5) hasta azul oscuro para las magnitudes mayores (Mw 9.4). Este comportamiento es consistente con lo esperado físicamente, a mayor magnitud sísmica, mayor es la energía liberada y, por tanto, mayor es el valor de PCA registrado en el mareógrafo y de área inundada.

Adicionalmente, se incluyen tres líneas verticales que marcan los umbrales de PCA de interés según el sistema de alerta temprana: 30 cm, 1 m y 3 m. Estas líneas permiten visualizar y estimar el área de inundación generada para una ciudad en particular. Se puede observar también que, si bien se sigue una tendencia clara mencionada anteriormente, existe un rango acotado de área inundada que le corresponde a un cierto valor de PCA, lo cual es producto de las diferencias entre las distintas simulaciones realizadas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las 9 ciudades. Para Valparaíso en particular, se presentan dos versiones del gráfico, un gráfico incluyendo el estero Marga Marga y otra excluyéndolo mediante el corte descrito en la sección 5.1, esta exclusión permite ver cómo se ve afectada la relación entre PCA y el área inundada.

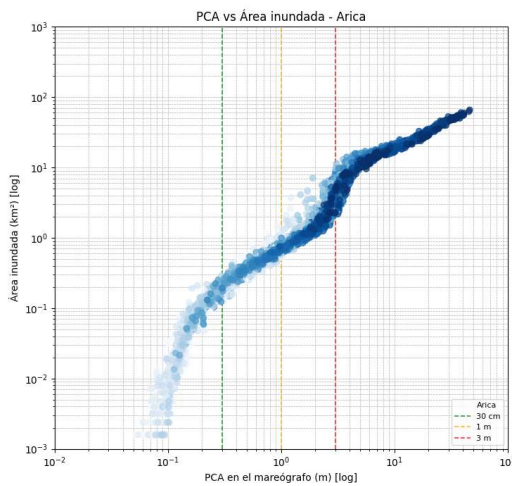


Fig 12: PCA vs Área inundada Arica

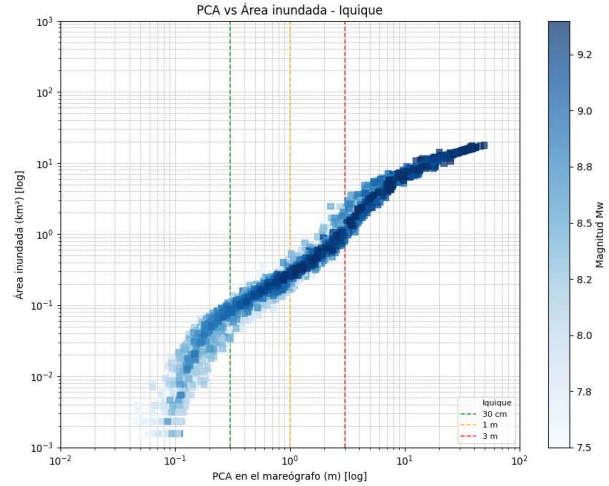


Fig 13: PCA vs Área inundada Iquique

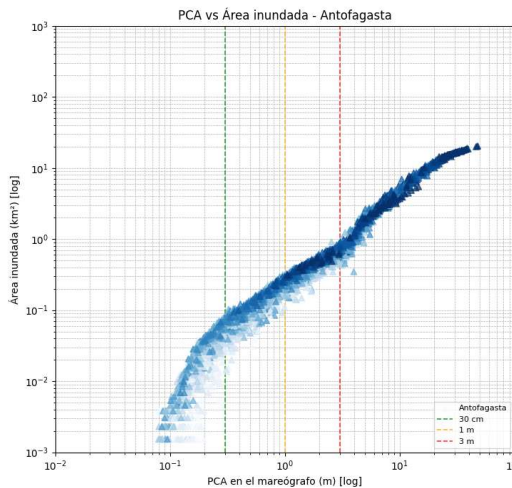


Fig 14: PCA vs Área inundada Antofagasta

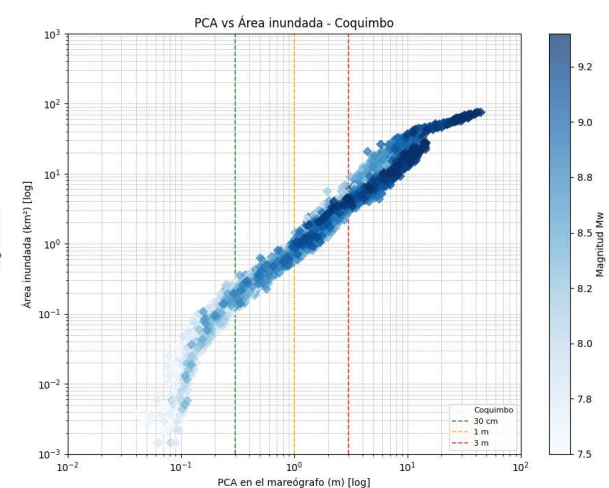


Fig 15: PCA vs Área inundada Coquimbo

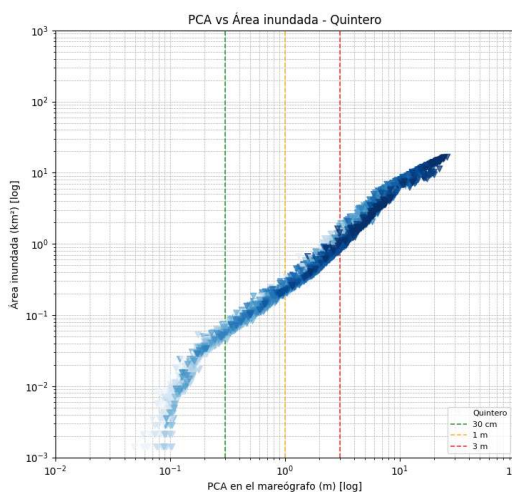


Fig 16. PCA vs Área inundada Quintero

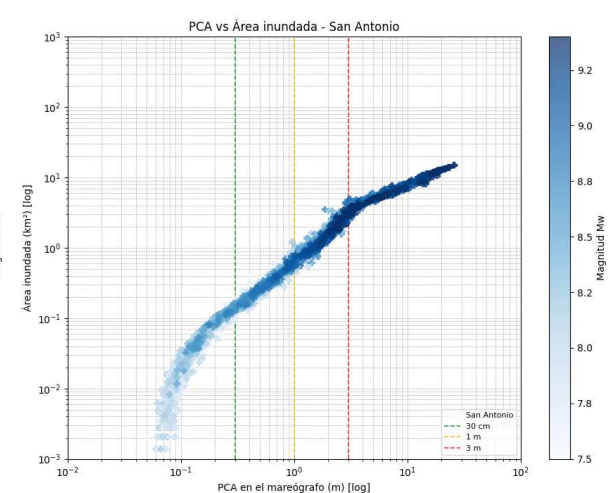


Fig 17. PCA vs Área inundada San Antonio

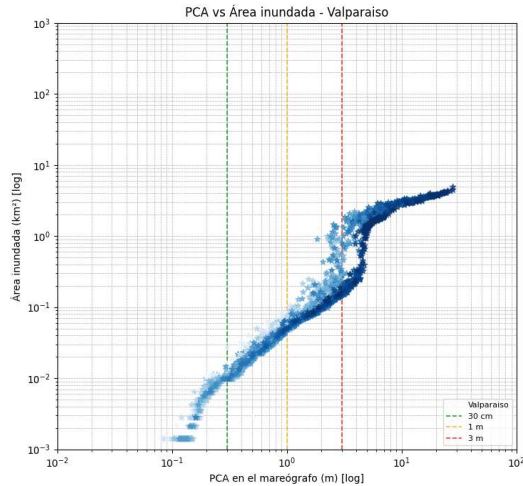


Fig 18. PCA vs Área inundada Valparaíso sin Estero

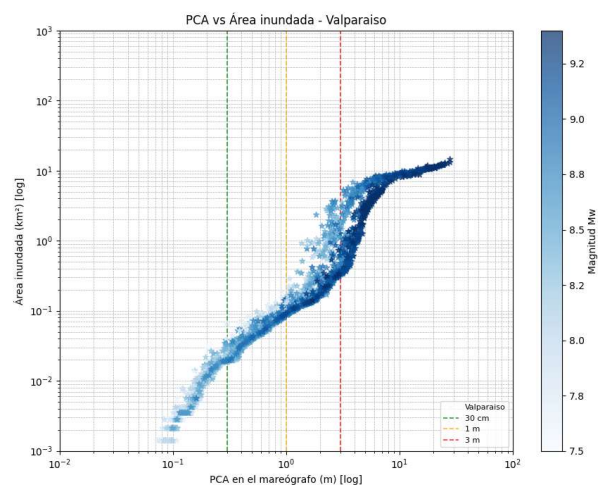


Fig 19. PCA vs Área inundada Valparaíso

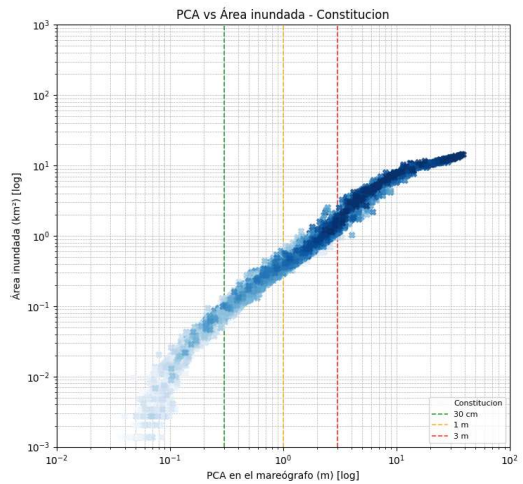


Fig 20. PCA vs Área inundada Constitución

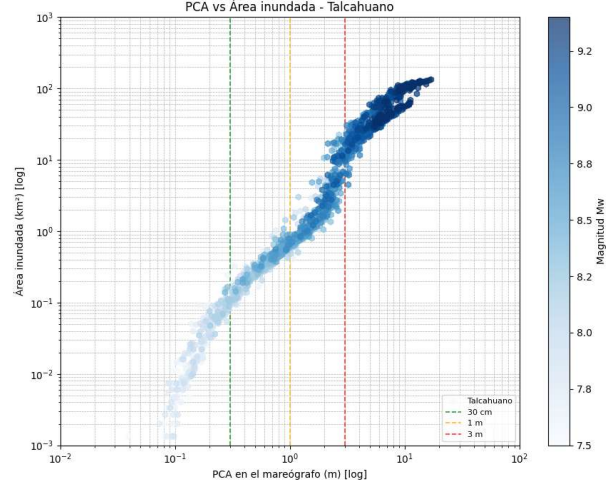


Fig 21. PCA vs Área inundada Talcahuano

5.3 Comparación entre ciudades

A continuación, para poder realizar la comparación entre ciudades, se escogió condensar toda la información de las 9 ciudades en un solo gráfico, resaltando en color azul una sola ciudad y los demás gráficos en gris por detrás de la ciudad de interés, con el objetivo de poder realizar una comparación de las curvas de inundación de la ciudad de interés frente a las demás ciudades. Además de mantener los umbrales correspondientes al sistema de alerta temprana.

Para realizar el análisis correspondiente a estos gráficos, se utilizan como criterios la posición relativa de cada ciudad respecto a la media del conjunto, es decir, si su curva de inundación se encuentra por encima, por debajo o dentro de la media de las 9 ciudades para el rango de PCA obtenido y la presencia de cambios de pendiente en la curva, evaluando su posible causa y su ubicación en función de los umbrales del sistema de alerta temprana. A partir de estos criterios se identifican las diferencias relevantes en el comportamiento de cada ciudad frente al resto de las ciudades estudiadas. A continuación, se muestran dichos gráficos:

Arica: presenta inundaciones mayores a la media de las demás ciudades entre 0 y 3 m de PCA, siendo una de las ciudades con mayores valores de área inundada. Cerca de los 3 m de PCA presenta un aumento de pendiente significativo, lo que indica que se sobrepasa una meseta que abarca una gran área inundable, de modo que un pequeño cambio en el valor de PCA representa una gran variación en el área inundada. Luego de este aumento de pendiente, la curva asciende con una pendiente menor respecto a las demás ciudades y se mantiene dentro de la media.

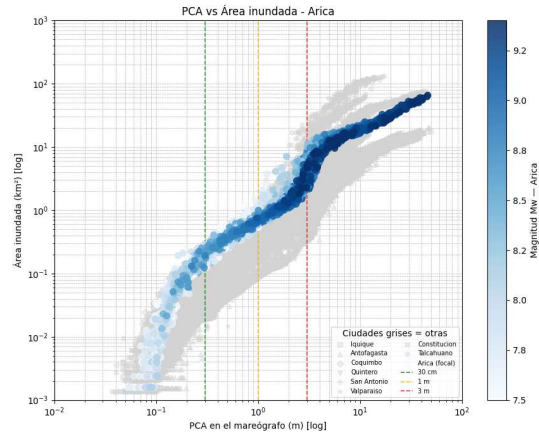


Fig 22. Comparación entre ciudades Arica

Iquique: se mantiene dentro de la media del conjunto de ciudades en la mayor parte del rango analizado, sin presentar cambios abruptos de pendiente en ninguno de los tres umbrales definidos, también posee una alta dispersión de valores de área inundada por debajo de un valor de PCA de 30 cm.

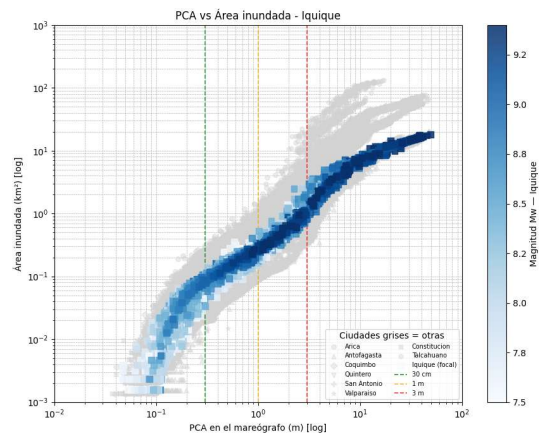


Fig 23. Comparación entre ciudades Iquique

Antofagasta: destaca por presentar uno de los comportamientos más lineales y con menor dispersión de todas las ciudades. La pendiente constante que va por debajo de la media da cuenta de una morfología que asciende de manera progresiva.

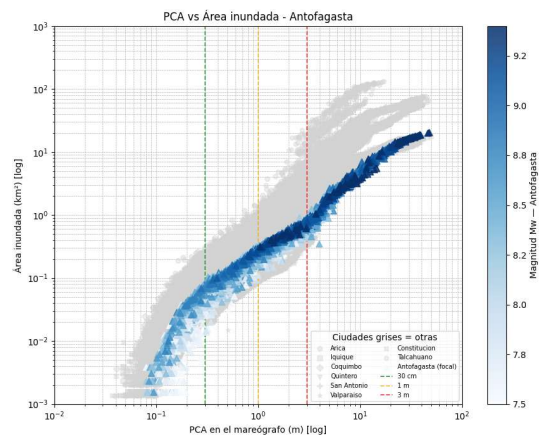


Fig 24. Comparación entre ciudades Antofagasta

Coquimbo: presenta valores de inundación superiores a la media de las demás ciudades entre 0 y 3 m de PCA, sin presentar un cambio abrupto en la pendiente a medida que aumenta el valor de PCA, sin embargo, luego de los 3 m, presenta valores de inundación dentro de la media. Al observar los mapas de inundación de Coquimbo se puede notar que hay un área importante que se inunda en la mayoría de los escenarios, este corresponde al Río Elqui, ubicado en La Serena, debido a la inundación de este humedal, se presenta una dispersión en los valores de área inundada.

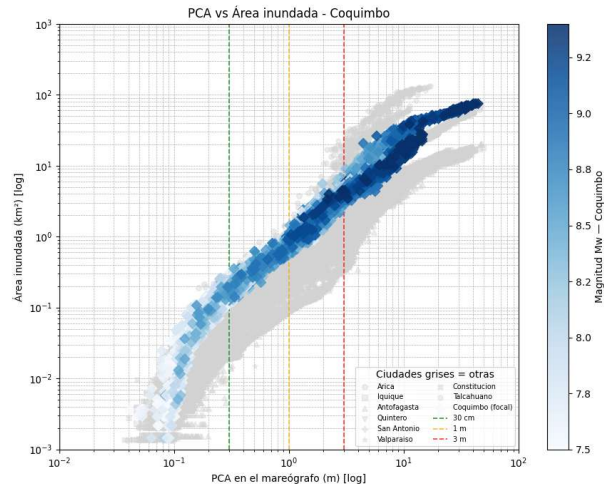


Fig 25. Comparación entre ciudades Coquimbo

Quintero: presenta un comportamiento similar al de Antofagasta, manteniéndose por debajo de la media del conjunto en los 3 umbrales del sistema de alerta temprana, sin cambios de pendiente significativos.

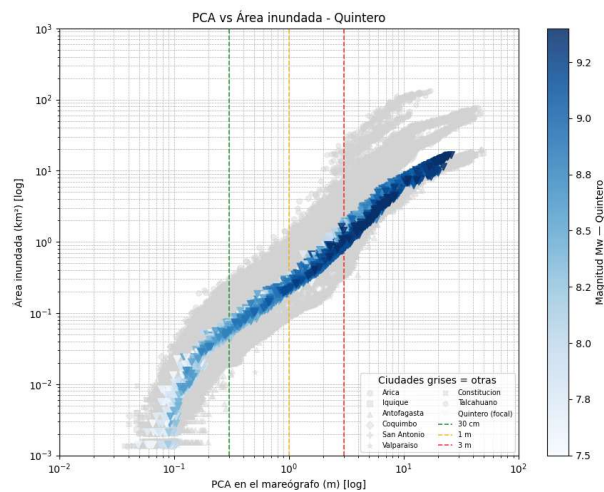


Fig 26. Comparación entre ciudades Quintero

San Antonio: presenta valores de inundación que se encuentran dentro de la media entre valores PCA de 0 a 3 metros, luego del umbral de 3 metros de PCA, presenta un descenso en la pendiente que mantiene los valores por debajo de la media de las demás ciudades estudiadas.

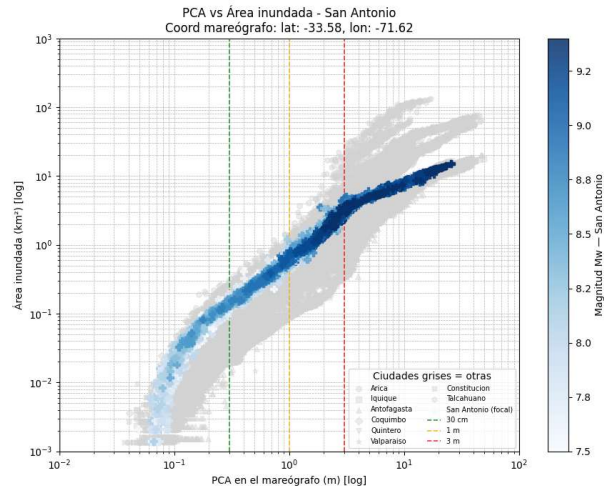


Fig 27. Comparación entre ciudades San Antonio

Valparaíso: presenta un caso relevante a considerar, ya que para valores de PCA inferiores a 3 m es la ciudad que presenta los menores valores de área inundada de las nueve estudiadas. Esto se debe a que, desde la línea de costa hacia el interior de la ciudad (Avenida España), existe una diferencia de cota de 3 m, y el área correspondiente a esta diferencia de cota son las diferentes playas de Valparaíso. Luego del umbral de 3 m ocurre un cambio abrupto en el pendiente producto de la topografía, debido a que el tsunami sobrepasa la barrera topográfica de la playa e inunda zonas urbanas que presentan mayores extensiones de terreno. Además, excluir de este gráfico el Estero Marga Marga genera se represente de manera más realista el comportamiento de la ciudad frente a la inundación, aunque sigue existiendo una dispersión en torno a un valor de PCA de 3 m.

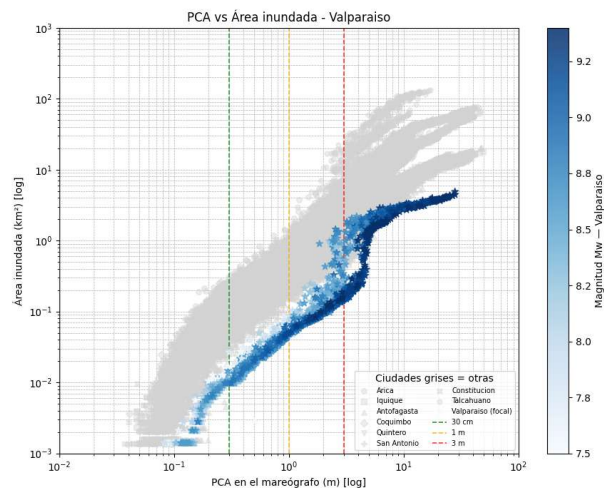


Fig 28. Comparación entre ciudades Valparaíso

Constitución: posee un comportamiento dentro de la media de las ciudades dentro de todo el rango de PCA, junto con una dispersión de valores moderada, además no presenta cambios de pendiente significativos, es la ciudad que se encuentra en la media del conjunto.

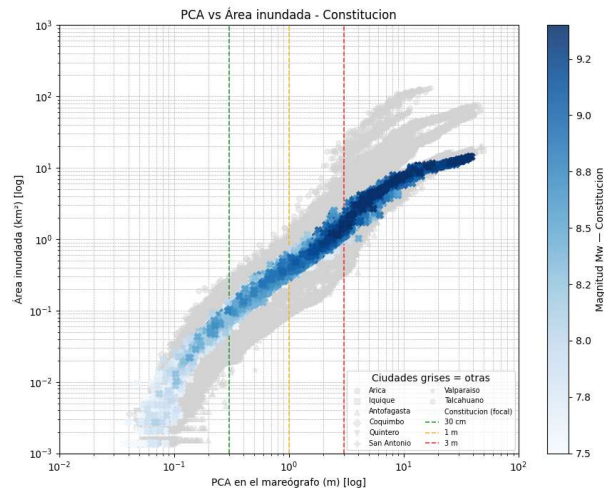


Fig 29. Comparación entre ciudades Constitución

Talcahuano: presenta el comportamiento más extremo en cuanto a cambios de pendiente. Entre 0 y 2 m presenta valores ligeramente superiores a la media, sin embargo, para valores de PCA superiores a 2 m presenta el comportamiento más extremo de las ciudades estudiadas, produciéndose un aumento de pendiente muy abrupto que sobrepasa a todas las ciudades analizadas. Esto indica que existe una gran área inundable que se ve afectada a partir de un valor de PCA superior a 2 m en adelante.

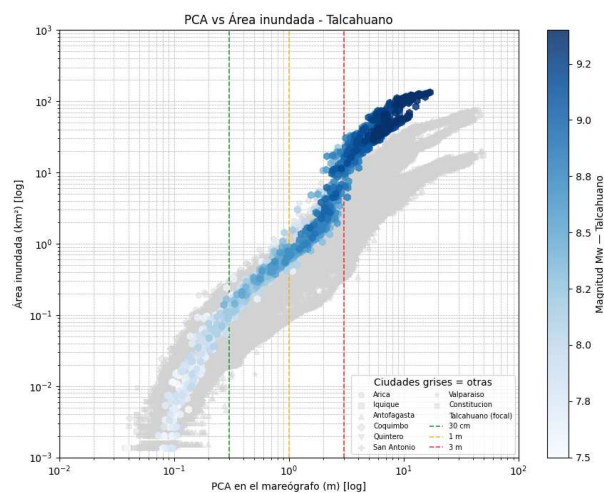


Fig 30. Comparación entre ciudades Talcahuano

Observando el conjunto de ciudades podemos observar algunas similitudes entre ciudades, Arica, Coquimbo y San Antonio presentan curvas de inundación superiores a la media del conjunto de ciudades. Por otro lado Iquique, Antofagasta, Quintero, Valparaíso, Constitución y Talcahuano presentan curvas de inundación que si bien tienen particularidades, se mantienen dentro del promedio o por debajo del conjunto. Valparaíso presenta un comportamiento particular, ya que posee valores de inundación bajo la media de las ciudades entre 0 y 3 m de PCA, luego de eso, presenta un cambio de pendiente significativo, esta cualidad la comparte con Talcahuano, que presenta una pendiente pronunciada cuando alcanza un valor de PCA de 2 m.

Encontrar estas similitudes en las ciudades es fundamental para poder agruparlas y comprender que si bien cada ciudad tiene morfologías distintas, pueden presentar comportamientos similares en cuanto al valor de PCA y el valor de área inundada.

5.4 Evaluación del primer umbral

Para continuar con el análisis, se determinó evaluar el primer umbral del protocolo de alerta temprana, correspondiente al rango de PCA entre 30 cm y 1 m. Según la Tabla 2, donde se muestra el protocolo de evacuación, en este estado de alerta la población debe evacuar hasta una distancia de 80 m desde la línea de costa. En este contexto, la idea es evaluar el comportamiento de las ciudades dentro de este umbral y determinar si existe la posibilidad de ajustarlo, de modo de proponer de manera objetiva un primer umbral para cada ciudad.

Para evaluar este primer umbral, se delimitó una línea punteada de color azul, que está ubicada a 80 m de cualquier cuerpo de agua, y se calculó el porcentaje de inundación del área comprendida entre la costa y dicha línea.

A continuación, se presentan los mapas que muestran esta línea de referencia junto el porcentaje de área inundada para ciertos escenarios de cada ciudad:

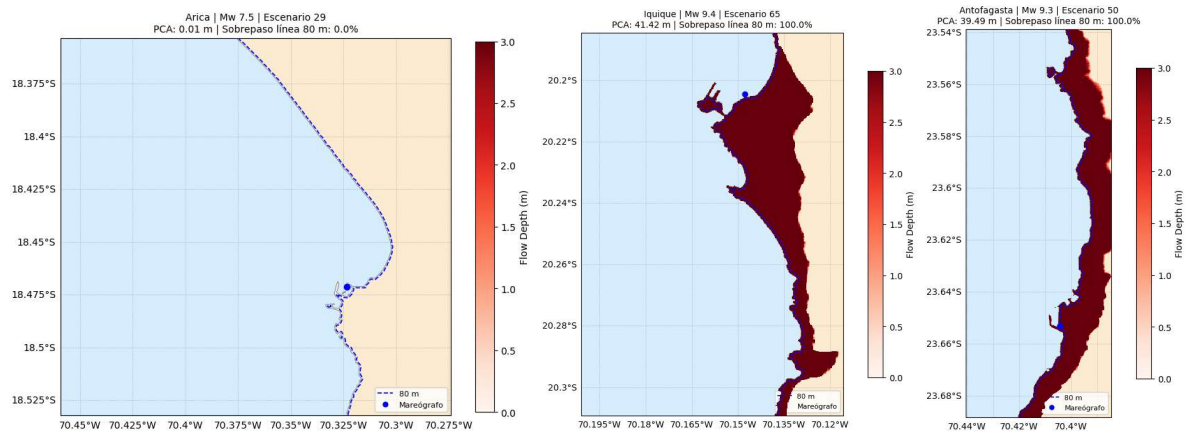


Fig 31. Mapas porcentaje de inundación Arica, Iquique y Antofagasta.

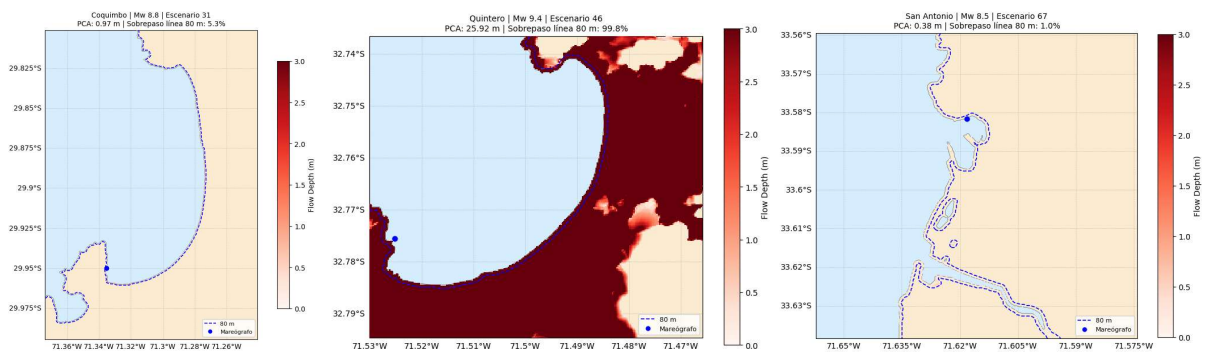


Fig 32. Mapas porcentaje de inundación Coquimbo, Quintero, San Antonio.

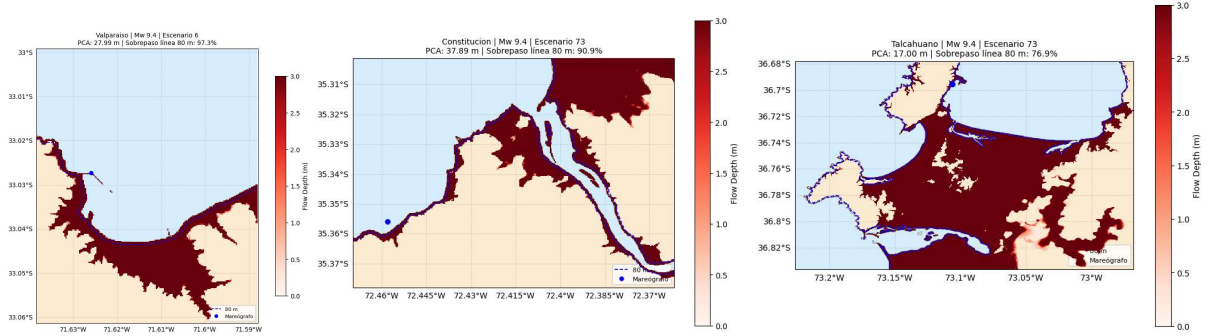


Fig 33. Mapas porcentaje de inundación Valparaíso, Constitución y Talcahuano.

Posteriormente, se evaluó para todos los escenarios la relación entre el valor de PCA medido en el mareógrafo correspondiente a cada ciudad y el porcentaje de área inundada dentro de esta zona. Además, se realizó un acotamiento del rango de PCA de 0 a 3.5 m, con el fin de poder observar de mejor manera que sucede entre rango. A continuación, se presentan los gráficos obtenidos para las 9 ciudades del estudio.

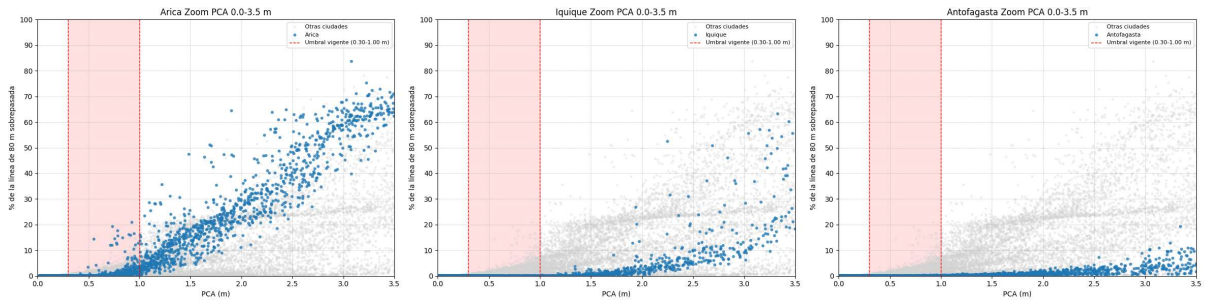


Fig 34. Gráficos porcentaje de inundación Arica, Iquique y Antofagasta.

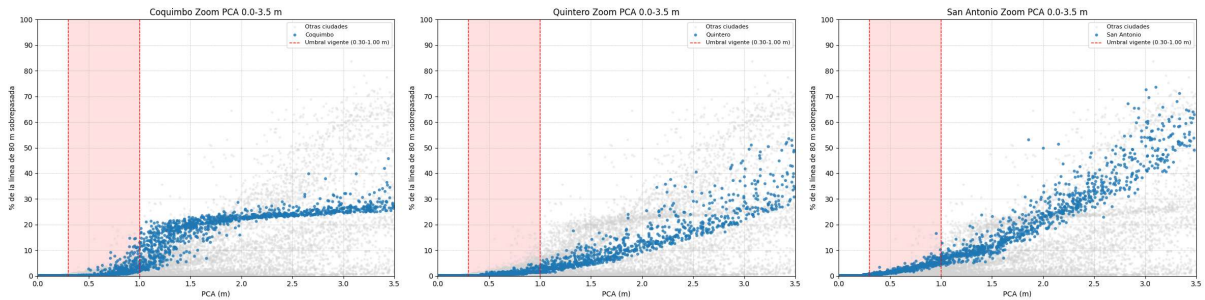


Fig 35. Gráficos porcentaje de inundación Coquimbo, Quintero y San Antonio.

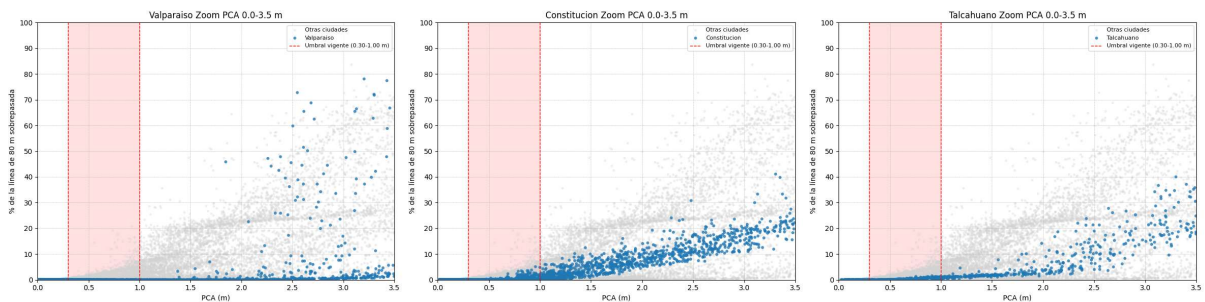


Fig 36. Gráficos porcentaje de inundación Valparaíso, Constitución y Talcahuano.

Para determinar un nuevo umbral propuesto para cada ciudad, se estableció como criterio el promedio de los primeros tres escenarios que superan el 10% de área inundada dentro de la zona definida a 80 metros de la costa. El límite inferior de este umbral se mantuvo en 30 cm de PCA, ya que una ola de esta altura, si presenta la velocidad suficiente, puede desestabilizar a una persona y suponer un peligro para su integridad física. El límite superior, en cambio, se redefinió en función del criterio antes mencionado, de modo de asegurar que dentro de este rango de PCA la alerta de evacuación se emita cuando, como máximo, un 10% de la zona definida se vea afectada por la inundación. Este criterio sigue siendo conservador, ya que prioriza la seguridad de la población, pero pone el foco en evitar evacuaciones más extensas de lo necesario. Esto resulta particularmente relevante si se considera que, en caso de que el evento escale al siguiente estado de alerta (Alerta), la población debe evacuar hacia una zona segura definida como el terreno ubicado por sobre los 30 m sobre el nivel del mar, una exigencia considerablemente mayor que la evacuación a 80 m de la costa.

Bajo este criterio, se identificaron ciertas ciudades en las que es posible mejorar el primer umbral. Entre ellas se encuentran Iquique, Antofagasta, Quintero, Valparaíso, Constitución y Talcahuano, ya que sus curvas de porcentaje de inundación dentro de la zona de 80 m se mantienen cercanas al 5% a lo largo de gran parte del rango de PCA analizado. Además, este grupo de ciudades se condice con los grupos observados en la comparación realizada en el punto anterior. A continuación, se muestran los nuevos umbrales propuestos para estas ciudades:

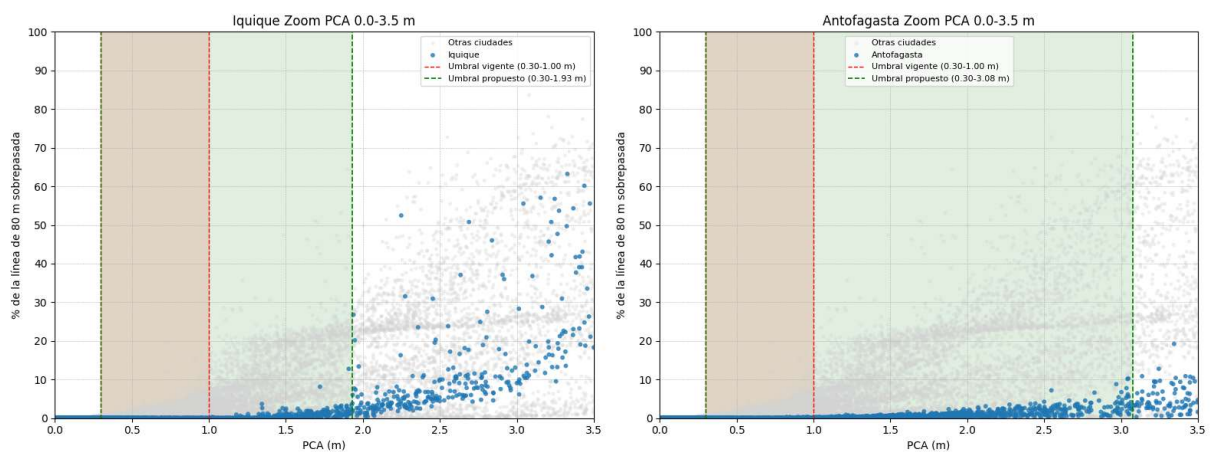


Fig 37. Gráficos Umbrales propuestos Iquique y Antofagasta.

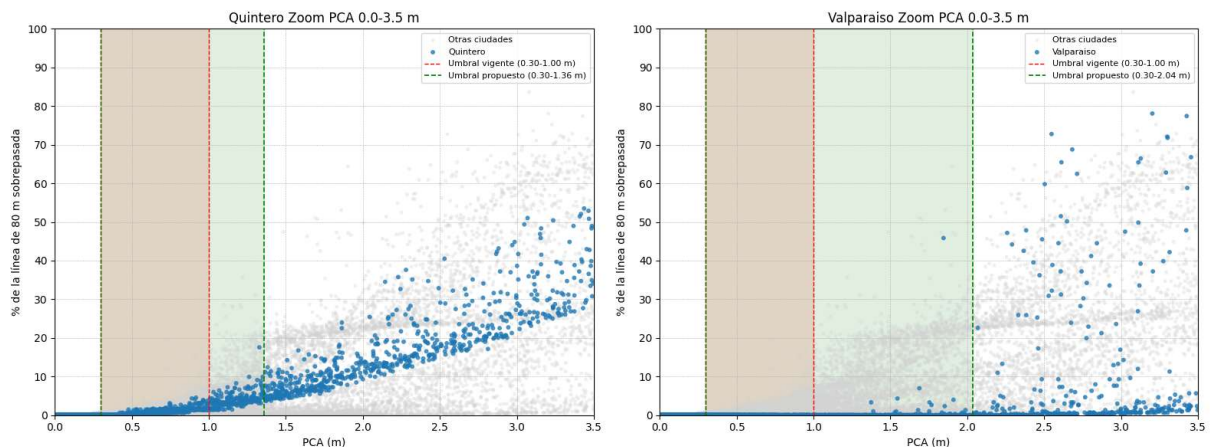


Fig 38. Gráficos Umbrales propuestos Quintero y Valparaíso.

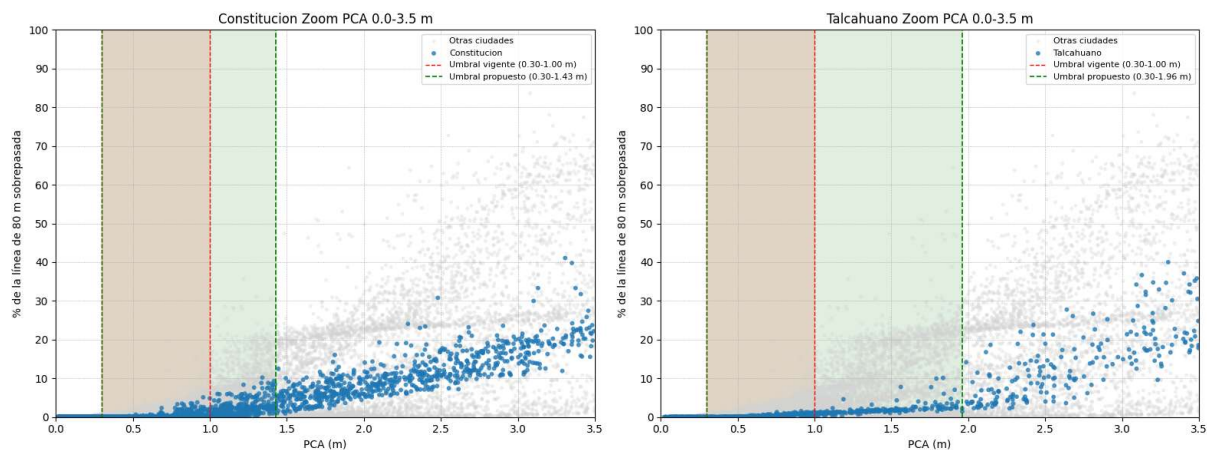


Fig 39. Gráficos Umbrales propuestos Constitución y Talcahuano.

Observando la cantidad de escenarios que se agregan en cada ciudad, se puede dar cuenta de escenarios que siguen manteniendo la tendencia de ser bajos, por lo tanto, se amplía el margen del primer umbral sin que esto suponga aumentar considerablemente el porcentaje de área que verá afectada por la inundación

A continuación se presenta una tabla para las 6 ciudades con los nuevos umbrales propuestos:

Tabla 4: Umbrales propuestos para el Estado Precaución.

Ciudad	PCA (amplitud máxima en costa)	Acción requerida
Iquique	0.3 - 1.9 m	La población debe evacuar 80 m tierra adentro desde cualquier línea de costa o ribera de ríos
Antofagasta	0.3 - 3.0 m	
Quintero	0.3 - 1.3 m	
Valparaíso	0.3 - 2.0 m	
Constitución	0.3 - 1.4 m	
Talcahuano	0.3 - 1.9 m	



6. Análisis y discusión

6.1 Relación entre el PCA y el área inundada

Los resultados muestran que, para las nueve ciudades estudiadas, existe una relación directa entre el PCA registrado en el mareógrafo y el área de inundación estimada, confirmando que el PCA es un buen predictor del impacto de un tsunami en cada localidad. Sin embargo, la forma de la curva de inundación varía de manera importante entre ciudades, lo que indica que la morfología costera local modula significativamente la respuesta de cada sitio ante un mismo valor de PCA, respondiendo directamente al OE1. La dispersión observada en los gráficos de PCA vs. área inundada se explica principalmente por la variabilidad entre los distintos escenarios sísmicos (magnitud, ubicación y mecanismo de falla), que distribuyen la energía del tsunami de forma distinta sobre la costa. Esto sugiere que, si bien el PCA es un buen indicador general, existe un margen de incertidumbre inherente al fenómeno que debe considerarse al definir umbrales de evacuación.

6.2 Comparación entre ciudades

Al evaluar el comportamiento de las nueve ciudades respecto a la media del conjunto, se identifican tres grupos. Arica, Coquimbo y San Antonio presentan áreas de inundación sistemáticamente superiores a la media para valores bajos e intermedios de PCA, indicando una mayor vulnerabilidad relativa. Iquique, Antofagasta y Quintero se mantienen dentro de la media o levemente por debajo, sin cambios abruptos de pendiente, reflejando una respuesta más lineal y predecible, donde los umbrales vigentes parecen ajustarse razonablemente. Valparaíso y Talcahuano presentan un cambio abrupto de pendiente asociado a una barrera topográfica (Avenida España, en el caso de Valparaíso) que, una vez superada, expone zonas urbanas extensas a la inundación, consistente con el OE1 y el OE2 al evidenciar umbrales topográficos propios de cada ciudad. Constitución se comporta de manera consistente con la media en todo el rango analizado, sin cambios de pendiente relevantes, constituyendo un caso intermedio entre los tres grupos. Esta agrupación sugiere que es posible avanzar hacia criterios sectorizados por tipo de comportamiento morfológico, en lugar de desarrollar un criterio independiente para cada ciudad, simplificando la aplicación de la metodología a otras localidades de la costa chilena.

6.3 Estero Marga Marga y otras entradas de agua naturales

Las zonas asociadas a esteros y cuerpos de agua naturales, particularmente el Estero Marga-Marga en Valparaíso y, en menor medida, el sector del Río Elqui en Coquimbo, presentan un comportamiento distintivo: actúan como canales preferentes de ingreso del mar hacia el interior de la ciudad, debido a que su perfil batimétrico es más bajo que el del entorno urbano circundante. Esto genera valores de inundación anómalamente altos y mayor dispersión en la relación PCA-área inundada, lo que motivó excluir el estero del cálculo del criterio propuesto para Valparaíso. Este resultado muestra que los criterios de evacuación deben identificar explícitamente los cuerpos de agua interiores que actúan como rutas de inundación preferentes, dado que concentran el riesgo de forma desproporcionada respecto al resto de la ciudad.

6.4 Evaluación y propuesta de ajuste del primer umbral

La evaluación del primer umbral de evacuación (PCA entre 30 cm y 1 m, asociado a evacuar una franja de 80 m desde cualquier cuerpo de agua) permitió identificar que, en seis de las nueve ciudades (Iquique, Antofagasta, Quintero, Valparaíso, Constitución y Talcahuano), el porcentaje de área inundada dentro de dicha franja se mantiene consistentemente bajo (en torno al 5%) a lo largo de gran parte del rango de PCA analizado. Esto indica que el límite superior del primer umbral podría ampliarse sin comprometer la seguridad de la población, ya que el criterio propuesto (máximo 10% de área inundada) se mantiene conservador incluso al ampliar dicho rango. Estas ciudades coinciden, en gran medida, con el segundo



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



grupo de comportamiento identificado en 6.2, reforzando la coherencia de la metodología. En contraste, en Arica, Coquimbo y San Antonio no se identificó margen para flexibilizar el criterio, consistente con su mayor vulnerabilidad relativa. El límite inferior de 30 cm se mantiene sin modificaciones, dado que corresponde a un umbral de seguridad física de la persona frente al tsunami y no a uno asociado a la extensión de la inundación.



7. Conclusiones

El presente trabajo evaluó una nueva metodología para definir criterios de evacuación frente a tsunamis en nueve ciudades costeras de Chile, en respuesta a las limitaciones del protocolo ONEMI-SHOA (2016), que define umbrales de alerta uniformes a nivel nacional sin considerar la morfología costera local. A partir de 40.500 escenarios sísmicos simulados para Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio, Constitución y Talcahuano, se buscó determinar si es posible definir criterios de evacuación más específicos para cada localidad, sin comprometer la seguridad de la población.

Los resultados confirman una correlación positiva entre el PCA registrado en el mareógrafo y las métricas de inundación en tierra, aunque no uniforme entre ciudades: Arica, Coquimbo y San Antonio presentan una vulnerabilidad relativa mayor que la media, mientras que Valparaíso y Talcahuano muestran cambios abruptos de comportamiento asociados a barreras topográficas específicas. A partir de este comportamiento, se demostró que es estadísticamente factible ampliar el primer umbral de evacuación (Precaución) para seis de las nueve ciudades (Iquique, Antofagasta, Quintero, Valparaíso, Constitución y Talcahuano), manteniendo un máximo de 10% de área inundada dentro de la franja de evacuación. En Arica, Coquimbo y San Antonio, en cambio, no se identificó margen para flexibilizar el criterio, dado que su porcentaje de inundación supera la media desde valores bajos de PCA. Con ello, se da cumplimiento al objetivo general, proponiendo una actualización de los criterios de caracterización de la amenaza para evacuación.

Entre los hallazgos principales destaca la identificación de tres patrones de comportamiento morfológico entre las ciudades, que sugiere la posibilidad de sectorizar la costa chilena según su respuesta ante tsunamis. Asimismo, resulta relevante el rol de esteros y cuerpos de agua interiores (Estero Marga-Marga en Valparaíso y Río Elqui en Coquimbo), zonas de fácil inundación que concentran el riesgo de forma desproporcionada y deben tratarse como zonas críticas independientes.

Esta investigación aporta al estado de la práctica de la ingeniería civil al proponer una metodología replicable para ajustar criterios de evacuación por tsunami a escala local. A diferencia del enfoque actual, que asigna umbrales rígidos en función de un valor de PCA, la metodología permite cuantificar, ciudad por ciudad, el porcentaje de área afectada ante distintos escenarios, constituyendo un aporte práctico directo a la mejora del SIPAT.

Como principales limitaciones, el análisis se centró solo en el estado de Precaución sin evaluar Alerta y Vigilancia, además se restringe sólo a nueve ciudades, por lo que sus patrones morfológicos no son extrapolables sin validación adicional, de ahí que se sugiera extender la metodología a otras localidades y replicar el análisis para los demás estados de alerta.

Se concluye que la incorporación de la morfología costera local mediante simulaciones numéricas de inundación constituye un aporte concreto y viable para actualizar los criterios de evacuación ante tsunamis en Chile, fortaleciendo la confianza de la población en las decisiones que de él se derivan. Por último, se recuerda a los futuros lectores que, ante un sismo en zona costera lo suficientemente fuerte como para impedir mantenerse en pie o si dura más de 30 segundos, deben evacuar hacia lugares altos, la prevención ante desastres es tarea de todos.



8. Referencias

Catalán, P. A., Gubler, A., Cañas, J., Zuñiga, C., Zelaya, C., Pizarro, L., Valdés, C., Mena, R., Toledo, E., & Cienfuegos, R. (2020). Design and operational implementation of the integrated tsunami forecast and warning system in Chile (SIPAT). *Coastal Engineering Journal*, 62(3), 373–388.

Mori, N., Satake, K., Cox, D., Goda, K., Catalán, P. A., Ho, T.-C., Imamura, F., Tomiczek, T., Lynett, P., Miyashita, T., Muhari, A., Titov, V., & Wilson, R. (2022). Giant tsunami monitoring, early warning and hazard assessment. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 557–572.

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). (2023). *Planes de emergencia y evacuación en caso de tsunami*. Gobierno de Chile.