

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE TSUNAMIS BASADO EN CURVAS DE
INTENSIDAD DE MERCALLI**

JOSÉ LUIS BAQUEDANO C.¹
PATRICIO CATALÁN M.^{2,3}
YUTAKA HAYASHI⁴

RESUMEN

Los recientes eventos sísmicos de gran magnitud que han ocasionado tsunamis (2010, 2014, 2015) han evidenciado debilidades en el sistema de alerta de estos eventos, permitiendo una rápida evolución de este y mejorado la capacidad predictiva de las instituciones responsables en el último tiempo. Sin embargo, aún se presentan ciertas falencias, especialmente en lo relacionado con el flujo de la información, tiempos de espera y área potencial afectada.

Para intentar cubrir estas falencias, en este trabajo se busca obtener una relación empírica entre intensidad y el nivel de peligro de tsunami. Para ello se dispone de datos de sismos ocurridos entre 2011 y 2015. Con esta información se construyen curvas que relacionan magnitud y distancia hipocentral con la intensidad sísmica percibida. Para incluir la evaluación del nivel de peligro de tsunami, se ejecutan escenarios sísmicos para generar simulaciones numéricas que determinen la amplitud de tsunami esperada para nueve ciudades del país y así construir curvas que delimiten los niveles de peligro existentes. Esto se basa en la hipótesis de que un tsunami presentará altas variaciones en función de las características de la costa a la que se enfrenta.

Con los resultados obtenidos se espera añadir una capa de redundancia adicional al sistema, que permita una evaluación preliminar del nivel de peligro de tsunami esperado, a partir de los reportes de intensidad, entregando una noción de la magnitud potencial del evento.

¹Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, UTFSM – jose.baquedano@alumnos.usm.cl

²Profesor Adjunto, Departamento de Obras Civiles, UTFSM – patricio.catalan@usm.cl

³Investigador Asociado, Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN)

⁴Senior Researcher, Seismology and Tsunami Research Dept., MRI, Japón - yhayashi@mri-jma.go.jp

1. INTRODUCCIÓN

El estado del arte de los sistemas de alerta temprana de tsunamis apunta hacia la medición de la amplitud de un tsunami en función de la energía que este es capaz de transportar, para medir adecuadamente el daño potencial que pueden ocasionar en la costa (Bernard y Titov, 2015). Esto representa una evolución respecto de los sistemas originales que se basaban únicamente en los parámetros sísmicos precedentes, donde en múltiples casos ocurrieron tanto subestimaciones como sobreestimaciones del valor de amplitud del tsunami observado en la costa.

Hoy en día, el sistema chileno de alerta de tsunamis es manejado por tres entidades independientes. El Centro Sismológico Nacional (CSN) determina y proporciona la información básica acerca de los sismos ocurridos en el territorio nacional (e.g. coordenadas del epicentro, hora de ocurrencia y magnitud, entre otros), información que se envía tanto al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), como a la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI). SHOA es responsable de evaluar y determinar el peligro de tsunami, incluyendo amplitudes esperadas y tiempos de arribo, e informar a ONEMI, institución encargada de definir la necesidad de evacuación y ejecutar los protocolos correspondientes de acuerdo al nivel de alerta presente (Protocolo ONEMI-SHOA para evento de Tsunami en las costas de Chile). Sin embargo, existe un período importante de tiempo (superior a cinco minutos) entre la ocurrencia del sismo, y la evaluación del potencial tsunamigénico en el que ONEMI no tiene mayor información de la situación acontecida.

Es por esto que el objetivo principal de este trabajo es incorporar una alternativa para que ONEMI posea la capacidad de evaluar preliminarmente si un sismo es capaz de generar un tsunami, de modo tal que sea capaz de afrontar de mejor manera la emergencia. Esto se encuentra ligeramente basado en una metodología empleada hasta 1999 en Japón, que evaluaba combinaciones de distancia y magnitud para evaluar peligro de tsunami, con dos diferencias principales. La primera consiste en el uso de la intensidad modificada de Mercalli (IMM) como punto de inicio de la evaluación, aprovechando que es un parámetro que ONEMI recibe directa e inmediatamente con posterioridad a un sismo, y que actualmente no presenta mayor utilidad. La segunda diferencia tiene que ver con la especificidad de las curvas de evaluación de tsunami, dado que se pretende obtener curvas locales, en contraposición a las curvas japonesas, que eran únicas para todo el territorio.

La principal hipótesis para el desarrollo de este trabajo es que es posible utilizar la IMM para construir un sistema de curvas que relacionen este parámetro con la magnitud del sismo y la distancia desde el punto de evaluación al hipocentro. Es más, es posible superponer estas curvas con el potencial tsunamigénico, que también depende fuertemente de la magnitud del sismo. Todo esto considerando las limitaciones y posibilidades que el contexto del país y de su sistema actual para continuar avanzando en la confiabilidad del sistema.

Los objetivos principales de este trabajo son dos. En primer lugar, analizar el uso de IMM como una herramienta confiable de predicción. Esto se hace a través de la creación de curvas que relacionen este parámetro con magnitud y distancia, recurriendo a modelos empíricos existentes, información histórica disponible y nuevos modelos en caso de ser necesario. Y segundo, construir gráficas de predicción del peligro de tsunami para nueve ciudades costeras chilenas, y así

demostrar que los efectos de sitio son de relevancia considerable. Este resultado final permite la evaluación rápida preliminar del peligro de tsunami.

2. METODOLOGÍA

Curvas IMM- Δ -Mw

El primer paso consiste en la determinación de la relación existente entre la intensidad modificada de Mercalli, la distancia hipocentral y la magnitud de momento sísmico. Para esto, se procesa información recibida de eventos sísmicos ocurridos entre 2011 y 2014 en la costa del país y clasificados de acuerdo a su intensidad y magnitud. Los reportes de intensidad ubicados en comunas no costeras, son descartados.

Uno de los parámetros relevantes es la distancia mínima al hipocentro, definida como la distancia desde el punto de interés al punto más cercano perteneciente al plano de falla del sismo. Esta distancia se calcula mediante un modelo geométrico simplificado que toma en consideración si la proyección del punto de interés queda dentro o fuera del plano de falla. Estas dimensiones se estiman a partir de la ley de escalamiento de Papazachos et al. (2004). Para ello son necesarios los valores de ángulos de dip y strike del plano, que se extraen de la página web de Global Centroid-Moment-Tensor (CMT). Cuando el sismo tiene una magnitud inferior a 6.7, las dimensiones de la ruptura pueden ser ignoradas, con lo que la distancia al hipocentro es estimada como la hipotenusa del triángulo formado por la distancia al epicentro (en superficie) y la profundidad del foco. Esta última es registrada por el CSN y la ONEMI al momento de cada evento. Con esto, para cada evento y dependiendo de la cantidad de reportes disponibles, se tiene una serie de vectores consistentes en IMM, Mw y distancia hipocentral.

Para cada valor de IMM, una relación preliminar entre magnitud y distancia hipocentral se obtiene utilizando un ajuste de mínimos cuadrados. No obstante, debido a la alta dispersión de los datos de cada registro, las rectas construidas se intersectan. Para rectificar esto, un conjunto de curvas se construye mediante la combinación de un modelo que estima la aceleración máxima del suelo (PGA) con parámetros sísmicos, con uno que relaciona PGA con IMM, válido para todo el país. Los modelos seleccionados para estos efectos corresponden a la ecuación de Boroschek y Contreras (2012), construida a partir de datos correspondientes al sismo de Mw 8.8 ocurrido en el Maule en 2010, y la ecuación de Wald et al. (1999). Sin embargo, la ecuación determinada por Wald se basó en sismos ocurridos en el estado de California, y por lo tanto un nuevo modelo IMM-PGA se construye para ser adaptado a los datos chilenos disponibles.

Para construir este modelo se sigue el siguiente esquema. En primer lugar se obtiene una relación entre intensidad y aceleración máxima del suelo basada en Wald et al. (1999), como se muestra en la ecuación (1)

$$IMM = f(PGA) \quad (1)$$

Luego de obtenida esta relación, se aplica la ecuación desarrollada por Boroschek y Contreras (2011), que permite establecer un vínculo entre parámetros sísmicos (magnitud, profundidad, distancia, tipo de suelo) y la aceleración máxima del suelo, como indica la ecuación (2).

$$PGA = g(\text{Parámetros Sísmicos}) \quad (2)$$

Combinando las ecuaciones (1) y (2), se obtiene una ecuación que relaciona directamente intensidad con los parámetros que definen el sismo, como muestra la ecuación (3)

$$IMM = f(g(\text{Parámetros Sísmicos})) \quad (3)$$

Como resultado, un grupo de curvas paralelas que relacionan distancia hipocentral y magnitud es obtenido. Estas curvas son construidas mediante la resolución de la ecuación (3) en forma independiente para cada valor de intensidad y validadas usando información adicional, compuesta por eventos ocurridos entre enero y octubre de 2015. Estas incluyen, por ejemplo el sismo de Mw 8.3 ocurrido el 16 de septiembre de 2015.

Selección de escenarios de tsunami y propagación.

Dado que se busca vincular la intensidad de Mercalli con el nivel de alerta de tsunami a través de curvas que vinculen magnitud, distancia y nivel de peligro, es necesario determinar la amplitud máxima que tendrá el tsunami en distintos puntos de la costa, para definir el nivel de peligro asociado, de acuerdo a lo establecido por SHOA.

La clasificación actual de tsunamis de acuerdo a su amplitud máxima esperada es: tsunami mayor, si la amplitud esperada es mayor a 3 metros (alarma de tsunami); intermedio, para amplitudes entre 1 y 3 m (alerta de tsunami); menor, si la amplitud supera los 30 cm, pero es inferior a 1 m (estado de precaución); e instrumental; si la amplitud máxima esperada es inferior a 30 cm (estado informativo).

Desafortunadamente, no existe una base de datos lo suficientemente amplia como para generar curvas específicas por ciudad. Es por esto que se recurre a la modelación numérica de tsunamis, obteniendo así la cantidad de información necesaria para construir curvas robustas.

En primer lugar, un conjunto de escenarios sísmicos es seleccionado de tal manera que se tenga cubierto un espacio uniforme tanto en magnitudes como en distribución espacial. Considerando que, a partir de experiencias previas, sismos pequeños ($M_w < 7.0$) pueden generar tsunamis solo bajo condiciones muy particulares, y que sismos mayores ($M_w > 8.5$) con certeza causarán un tsunami, se opta por seleccionar aquellos escenarios que representen una mayor incertidumbre respecto de su potencial tsunamigénico. Esto implica la selección de eventos con magnitudes entre 7.5 y 8.5, y profundidades entre los 15 y 35 km. La profundidad está dada por la forma de la falla, de tal modo que hipocentros más profundos se encuentran más cercanos al continente. Los escenarios se extrajeron de un catálogo existente que contiene un total de 3056 escenarios de diferentes características y número de subfallas (Riquelme y Mocanu, 2012).

Los escenarios seleccionados se distribuyen en forma uniforme a lo largo de la costa con una separación de aproximadamente dos grados de latitud, además de escenarios adicionales cercanos a cada ciudad elegida. Una selección de puntos de interés ubicados cerca de las ciudades seleccionadas se utiliza para estimar el nivel de peligro, a través del cálculo de la serie de tiempo que describe la amplitud del tsunami para cada uno de los escenarios simulados. Los puntos de interés coinciden con la ubicación de los mareógrafos existentes actualmente, más una serie de puntos ubicados a 50 m de profundidad (mareógrafos virtuales). El modelo de propagación de tsunamis se ejecuta con el software *EasyWave* (Babeyko, 2012), obteniendo series de tiempo de la evolución de la amplitud del tsunami en puntos de interés a través de *Linear Shallow Water Equations*. La amplitud en la costa se determina mediante la Ley de Green, en caso tal que la ecuación inicial salga de su rango de validez (e.g. si la profundidad se reduce excesivamente). Este software emplea como condiciones iniciales las deformaciones en superficie calculadas a partir de las características del sismo, de acuerdo al modelo planteado por Okada (1985). El software permite la inclusión de múltiples rupturas uniformes, para aproximarse a una distribución no uniforme de la ruptura de la placa (que es lo que se aplicó en este caso), o bien permite incorporar una deformación inicial de la superficie marina directamente. La decisión de emplear *EasyWave* surge producto de su rápido tiempo de ejecución, que si bien sacrifica precisión en la modelación, esta pierde relevancia al requerir una estimación del nivel de peligro y no una amplitud exacta del tsunami.

Curvas IMM- Δ -Nivel de Peligro

Las series de tiempo de tsunami extraídas a partir del software se reducen únicamente al valor de amplitud máxima, que a su vez se traduce en un nivel de peligro asociado. Un gráfico de cada nivel de peligro respecto de la distancia al hipocentro es construido para cada una de las nueve ciudades elegidas. Debido a la dispersión de los datos, se determina una recta de mejor ajuste mediante la selección de un punto para cada magnitud (7.5, 8.0, 8.5) que reúna las siguientes condiciones: i) produce tsunami mayor, ii) está ubicado a la mayor distancia entre el grupo de puntos de la misma magnitud y tipo de tsunami y iii) no constituye un *outlier*.

Para establecer el máximo nivel de calidad posible de las rectas construidas, se calculan cuatro porcentajes que permiten determinar la mejor posición posible de estas rectas. Estos porcentajes son: i) eventos mayores bajo la recta que divide mayor e intermedio sobre el total de eventos mayores (subestimación), ii) intermedio sobre la recta mayor-intermedio (sobreestimación), iii) intermedio bajo recta intermedio-menor, y iv) menor sobre la recta intermedio-menor.

Se define una función objetivo en la ecuación (4), en función de estos parámetros

$$f = \frac{\sum_{i=1}^4 q_i P_i d_i}{\sum_{i=1}^4 d_i} \quad (4)$$

Donde q_i es el peso asociado a cada porcentaje, P_i es el porcentaje de datos fuera del rango que les corresponde, y d_i es el número de eventos totales en cada una de las cuatro categorías. Se privilegia que los eventos de tsunami mayor sean correctamente evaluados por lo que a ellos se les asigna un peso mayor.

Para minimizar la ecuación (4), se calcula un valor ponderado de la pendiente entre las dos primeras rectas delimitadoras (mayor-intermedio e intermedio-menor), como se muestra en la ecuación (5).

$$avg_{slope} = w_1s_1 + w_2s_2 \quad (5)$$

Donde w_i es el peso asociado a cada pendiente y s_i son las pendientes iniciales.

Con esto, diferentes pesos se prueban para obtener el menor valor de la función objetivo posible. Además, el coeficiente de posición de cada recta también es iterado, de tal manera que la posición cambia en conjunto con el cambio de pendiente. Se impone la restricción adicional de que la separación entre cada recta sea mayor que 0.5 unidades de magnitud, con el objetivo de mantener las rectas lo suficientemente separadas. Con la separación obtenida entre la primera y segunda recta, se crea la tercera (menor-instrumental). De este modo, las líneas dividen los distintos niveles de peligro con el mínimo de eventos evaluados incorrectamente. Se verifica que el porcentaje de eventos incorrectamente evaluados no supere el 30 % para la curva que divide eventos mayores de intermedios y no más de un 40 % para el caso de las otras dos rectas.

3. RESULTADOS

Curvas IMM- Δ -Mw

Un total de 2417 reportes de intensidad, clasificados según muestra la Tabla 1, son usados para validar las curvas construidas.

Tabla 1. Reportes de intensidad recopilados de eventos ocurridos entre 2011 y 2014

| IMM | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | Total |
|----------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|------|-------|
| N° de Reportes | 666 | 948 | 550 | 194 | 43 | 7 | 9 | 2417 |

Estos datos se emplean con el objeto de justificar y validar la creación de nuevas ecuaciones que describan la relación entre intensidad y aceleración máxima del suelo. Para estos efectos, se sigue el mismo método empleado por Wald et al. (1999). Esto es, empleando medias geométricas por intensidad, y dividiendo la función en dos tramos, dado que se observa una tendencia similar. Las ecuaciones (6) y (7) muestran el resultado obtenido.

$$IMM = 5.095 \log(PGA) - 1.342, IMM < IV \quad (6)$$

$$IMM = 2.998 \log(PGA) + 0.779, IMM \geq IV \quad (7)$$

Mediante la incorporación de las ecuaciones (6) y (7) a la ecuación (3), se obtiene el conjunto de curvas de la Figura 1. Es importante destacar que el método garantiza que las distintas curvas no se intersecten en el rango de interés. Lo que esta gráfica sugiere es que dado un reporte de intensidad ubicado a una distancia Δ del hipocentro, se puede estimar su magnitud de momento Mw.

Para validar estas curvas se recurre a datos registrados entre enero y octubre de 2015, presentados en la Tabla 2, constituida por 268 eventos y un total de 1031 reportes. La validación de las curvas con esta información se muestra en la Figura 2.

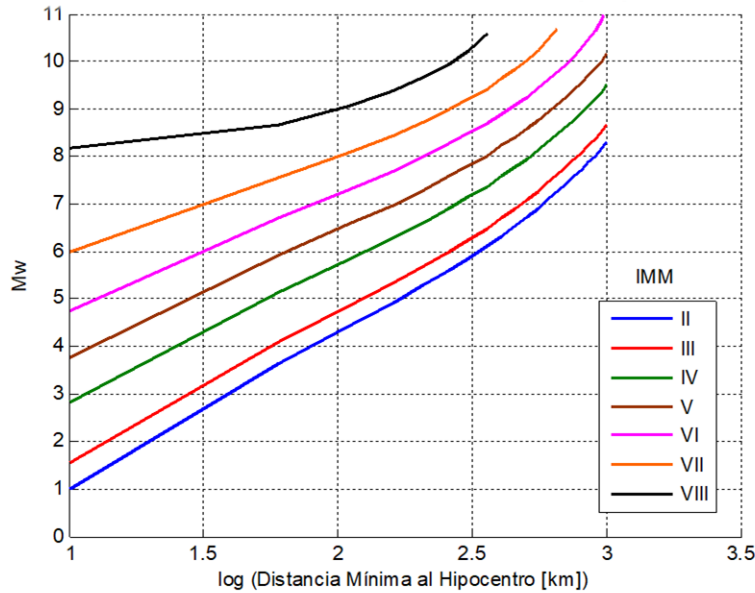


Figura 1. Curvas IMM- Δ -Mw

Tabla 2. Reportes recopilados entre enero y octubre de 2015.

| IMM | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | Total |
|----------------|-----|-----|-----|----|----|-----|------|-------|
| N° de Reportes | 159 | 475 | 258 | 89 | 41 | 6 | 3 | 1031 |

Selección de escenarios de tsunami y propagación.

Los escenarios seleccionados comprenden un total de 136 eventos distribuidos uniformemente a lo largo de la costa chilena, y concentrados alrededor de nueve ciudades. De estos escenarios, 36 poseen una magnitud de 7.5; 68 de 8.0; y 32 de 8.5. En la Tabla 3 se presenta la ubicación de las nueve ciudades junto a la cantidad de puntos de observación (POI) desde donde se registran y extraen las amplitudes máximas respectivas.

Tabla 3. Ubicación ciudades y cantidad de puntos de observación en cada una.

| Ciudad | Latitud | Longitud | POIs |
|--------------|---------|----------|------|
| Arica | -18.475 | -70.314 | 4 |
| Iquique | -20.217 | -70.167 | 7 |
| Antofagasta | -23.633 | -70.400 | 11 |
| Coquimbo | -29.950 | -71.333 | 10 |
| Valparaíso | -33.067 | -71.633 | 10 |
| San Antonio | -33.600 | -71.617 | 9 |
| Constitución | -35.333 | -72.417 | 7 |
| Talcahuano | -36.717 | -73.117 | 6 |
| Ancud | -41.867 | -73.833 | 7 |

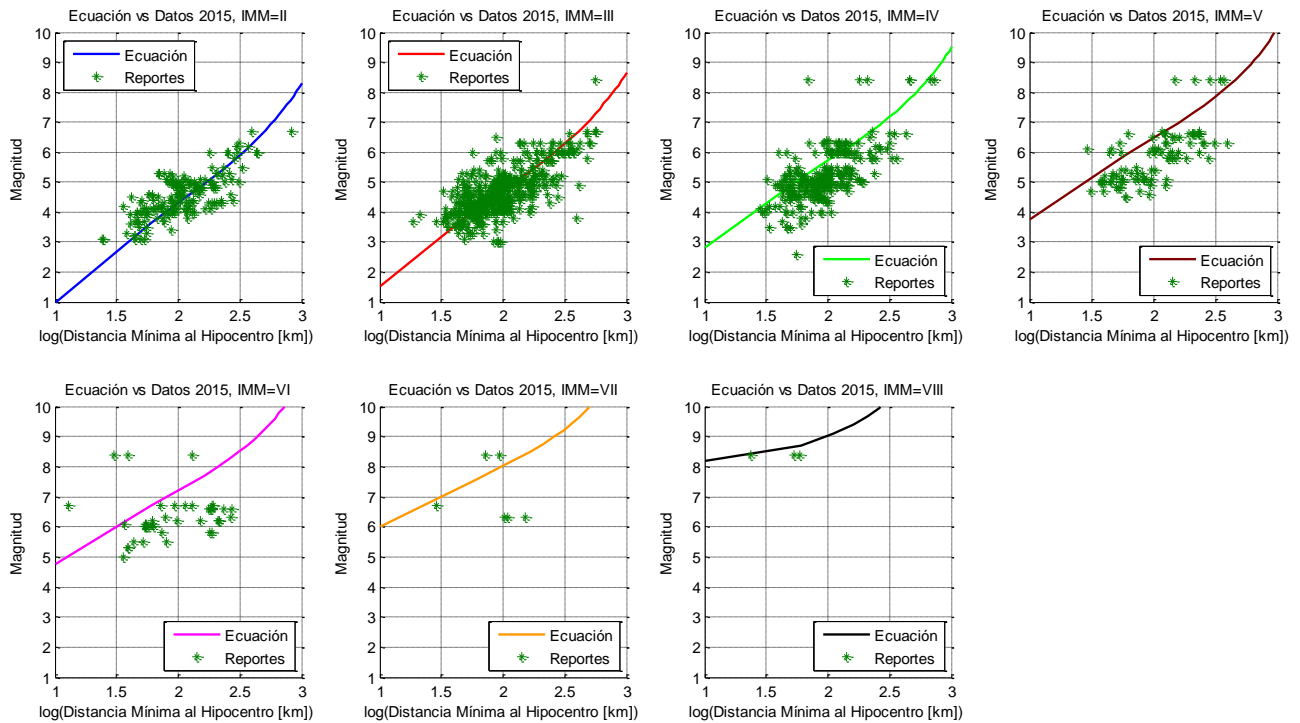


Figura 2. Validación Curvas IMM- Δ -Mw.

Para cada escenario seleccionado se ejecuta *EasyWave* y se extrae el valor máximo de amplitud del tsunami, el cual se clasifica de acuerdo a los niveles definidos por SHOA, definidos con anterioridad. El resumen de la clasificación de estas extracciones se muestra en la Tabla 4. Además, en la Figura 3 se muestra un ejemplo de serie de tiempo obtenida mediante el software.

Tabla 4. Distribución de los resultados de amplitud máxima extraídos para cada ciudad.

| Ciudad | Observaciones | Mayor (%) | Intermedio (%) | Menor (%) | Instrumental (%) |
|--------------|---------------|-----------|----------------|-----------|------------------|
| Arica | 544 | 9.38 | 21.51 | 33.46 | 35.65 |
| Iquique | 952 | 6.41 | 14.08 | 22.90 | 56.61 |
| Antofagasta | 1496 | 4.75 | 11.97 | 28.28 | 55.00 |
| Coquimbo | 1360 | 7.06 | 17.28 | 26.91 | 48.75 |
| Valparaíso | 1360 | 5.74 | 17.79 | 26.19 | 50.28 |
| San Antonio | 1224 | 6.13 | 19.44 | 26.39 | 48.04 |
| Constitución | 952 | 13.34 | 24.47 | 34.03 | 28.16 |
| Talcahuano | 816 | 13.48 | 27.21 | 31.25 | 28.06 |
| Ancud | 952 | 3.78 | 11.97 | 27.11 | 57.14 |

La Tabla 4 sugiere que los efectos locales son relevantes, dado que la distribución del peligro de tsunami varía notablemente en cada sitio. Por ejemplo, Talcahuano es más propenso a presentar tsunamis mayores e intermedios, presentando uno de estos casos en el 40.69% de las veces, mientras que Ancud se encuentra mayormente protegido con un 84.25% de los eventos en categoría menor o instrumental.

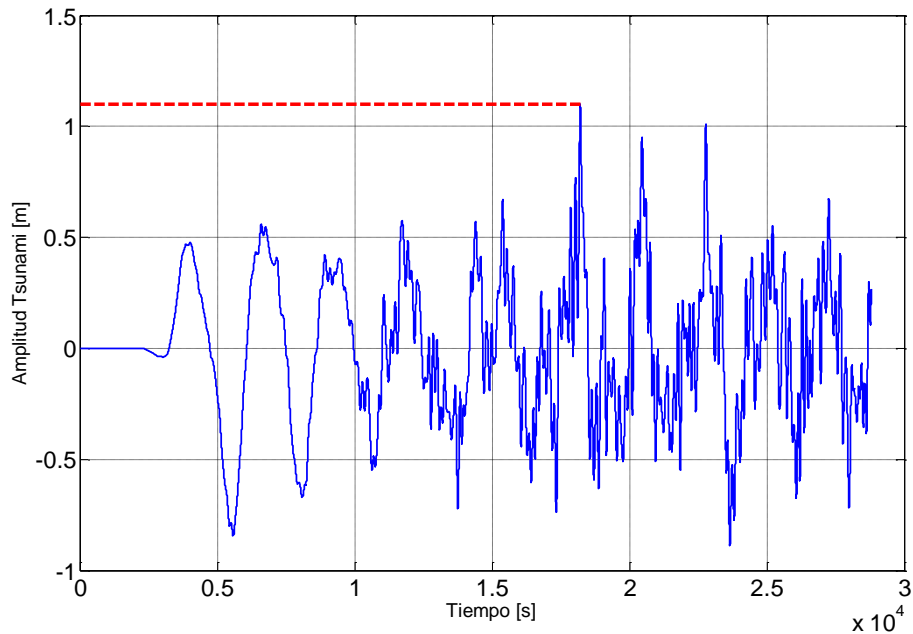


Figura 3. Ejemplo escenario de Mw 8.5, latitud: -30.43° , longitud: -71.92° (frente a Ovalle), profundidad: 17.83 km, evaluado en Antofagasta. Amplitud máxima: 1.1 m (tsunami intermedio)

Mediante la aplicación del algoritmo descrito para la separación de las curvas delimitadoras de nivel de peligro de tsunami, se obtienen los resultados de pendientes e interceptos de la Tabla 5. A modo de ejemplo, se muestra el conjunto de puntos y las rectas correspondientes a la ciudad de Coquimbo en la Figura 3.

Tabla 5. Pendientes e interceptos de las rectas delimitadoras de niveles de peligro de tsunami. (CP: coeficiente de posición)

| Ciudad | Pendiente | CP1 | CP2 | CP3 |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|
| Arica | 0.865 | 6.200 | 5.663 | 5.126 |
| Iquique | 0.732 | 6.773 | 6.253 | 5.729 |
| Antofagasta | 0.794 | 6.697 | 6.196 | 5.696 |
| Coquimbo | 0.719 | 6.833 | 6.325 | 5.819 |
| Valparaíso | 0.710 | 6.984 | 6.463 | 5.942 |
| San Antonio | 0.831 | 6.838 | 6.300 | 5.762 |
| Constitución | 0.574 | 6.987 | 6.469 | 5.951 |
| Talcahuano | 0.632 | 6.744 | 6.296 | 5.848 |
| Ancud | 1.023 | 6.478 | 5.691 | 4.905 |

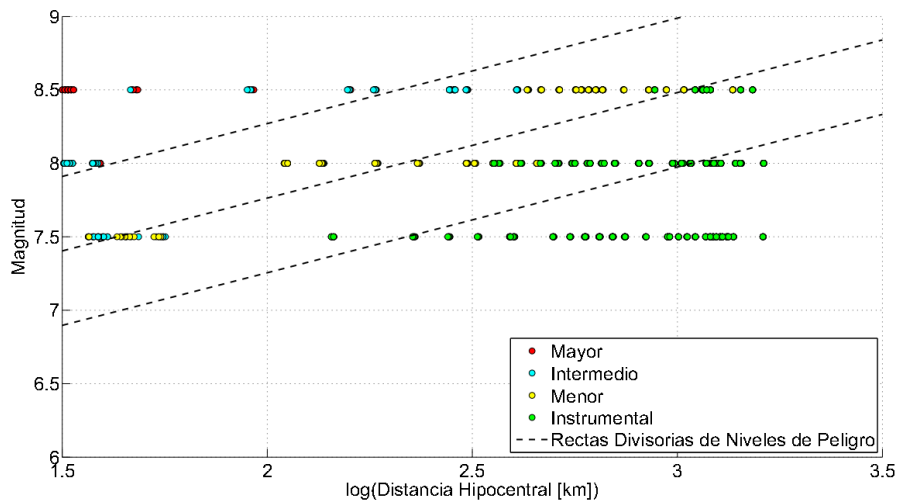


Figura 4. Ejemplo curvas delimitadoras para la ciudad de Coquimbo.

De la Tabla 5 se desprende que las pendientes e interceptos (coeficientes de posición), pueden asociarse al potencial peligro que presenta un determinado lugar frente a un tsunami. Una menor pendiente implica que un tsunami mayor posee una probabilidad de ocurrencia más alta, debido a un rango más amplio de distancias en las que un sismo reuniría las condiciones para generarlo en aquella costa en particular. Además, un coeficiente de posición más bajo produce este mismo efecto, ya que una intensidad o magnitud inferior puede significar que existe una posibilidad de que ocurra un tsunami mayor, debido nuevamente a una amplitud mayor de escenarios que pueden generar estas condiciones.

Comparando estos resultados con la distribución preliminar de las simulaciones, se nota que aquellos sitios indicados como más proclives a tsunamis mayores (Constitución, Talcahuano), poseen las menores pendientes entre las nueve ciudades consideradas. Al mismo tiempo, Arica, que es tercera en términos del porcentaje de eventos intermedios y mayores combinados (30.89 %) posee el coeficiente de posición más bajo para las tres rectas divisorias, a pesar de presentar la segunda pendiente más alta del grupo. Esta información se interpreta como que tanto Talcahuano y Constitución poseen una alta propensión a presentar grandes tsunamis, para un amplio rango de ubicaciones de epicentros, mientras que Arica puede ser altamente sensible a sismos de magnitud inferior pero a escala más bien local.

Por otro lado, la ciudad con mayor protección es Ancud, que alcanza solo un 15.75 % de eventos mayores o intermedios, presentando la mayor pendiente y los menores interceptos del grupo. Esto sugiere que Ancud es relativamente insensible a tsunamis lejanos, pero podría verse potencialmente afectada por tsunamis locales.

4. DISCUSIÓN

Uno de los objetivos principales de este trabajo es incrementar la capacidad para determinar el nivel de peligro de tsunami. A modo de ejemplo se analiza el sismo de magnitud Mw 6.9 ocurrido el 24 de abril de 2017. Los datos de aquel sismo se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros sismo 24/04/2017

| Parámetro | Mw | Latitud [°] | Longitud [°] | Profundidad [km] | Dip [°] | Strike [°] |
|-----------|-----|-------------|--------------|------------------|---------|------------|
| Valor | 6.9 | -33.13 | -72.07 | 26 | 16 | 3 |

Todos los parámetros se asumen como conocidos, a excepción de la magnitud, valor que se busca estimar mediante la evaluación de las curvas construidas. La información de los reportes se ha extraído desde la página web del Centro Sismológico Nacional. Los reportes utilizados para el análisis se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Detalle reportes de IMM, sismo 24/04/2017

| Localidad | IMM | Localidad | IMM |
|-----------|-----|--------------|-----|
| Canela | V | Navidad | VII |
| Coquimbo | V | Paredones | IV |
| La Serena | V | Pichilemu | IV |
| Los Vilos | V | Constitución | IV |
| Ovalle | V | Concepción | III |
| Litueche | IV | | |

A través del uso de las curvas Mw- Δ -IMM, se ingresan los reportes obtenidos una vez calculadas las distancias correspondientes. Con esto se obtienen los resultados exhibidos en la Figura 5, donde las “X” representan la evaluación de cada uno de los reportes. Dada la dispersión de los datos, y como criterio para reducir el rango estimativo de magnitudes probables, se consideran solo aquellos reportes ubicados entre los percentiles 25 y 75 de magnitudes con la finalidad de reducir la potencial variabilidad de los reportes recibidos, con se obtiene un rango probable de entre Mw 6.5 y 8.0, conteniendo el valor real de magnitud del evento bajo análisis.

Mediante la combinación de este rango con las gráficas Mw- Δ -Nivel de Peligro de Tsunami para cada una de las nueve ciudades, se obtiene un rango de niveles probables de peligro de tsunami que se espera puedan ser alcanzados en cada una de ellas (Figura 6).

El análisis de la Figura 6 indica que para Arica, Iquique, Antofagasta y Ancud el tsunami es de tipo instrumental, por lo que solo se genera un estado informativo. Para Coquimbo y Talcahuano se alcanza un nivel menor de tsunami, por lo que se presenta un estado preliminar de precaución. Finalmente para los casos de Valparaíso, San Antonio y Constitución se alcanza un nivel de tsunami intermedio, lo cual genera alerta de tsunami. Si bien esto supera el nivel real alcanzado por la amplitud del tsunami en aquel evento, donde no hubo amplitudes que requirieran emitir una alerta de tsunami, es importante destacar que en ningún caso de los presentados se subestima el nivel esperado de tsunami, situación deseable dado que se busca evitar generar alertas o alarmas tardías. Por este motivo es preferible sobreestimar, tal como ocurre en el presente caso. Se valida el método como herramienta de apoyo, que no busca demasiada precisión, sino que pretende entregar una evaluación inicial a ONEMI, antes de recibir información más concreta por parte del SHOA. Por otro lado, se destaca que se presenta una situación similar a la acontecida aquel día, donde en un primer minuto se emitió alerta de tsunami, por lo que se obligaba a la población a evacuar a sitios seguros, sin embargo, esta fue revocada a los pocos minutos, desestimando la emergencia.

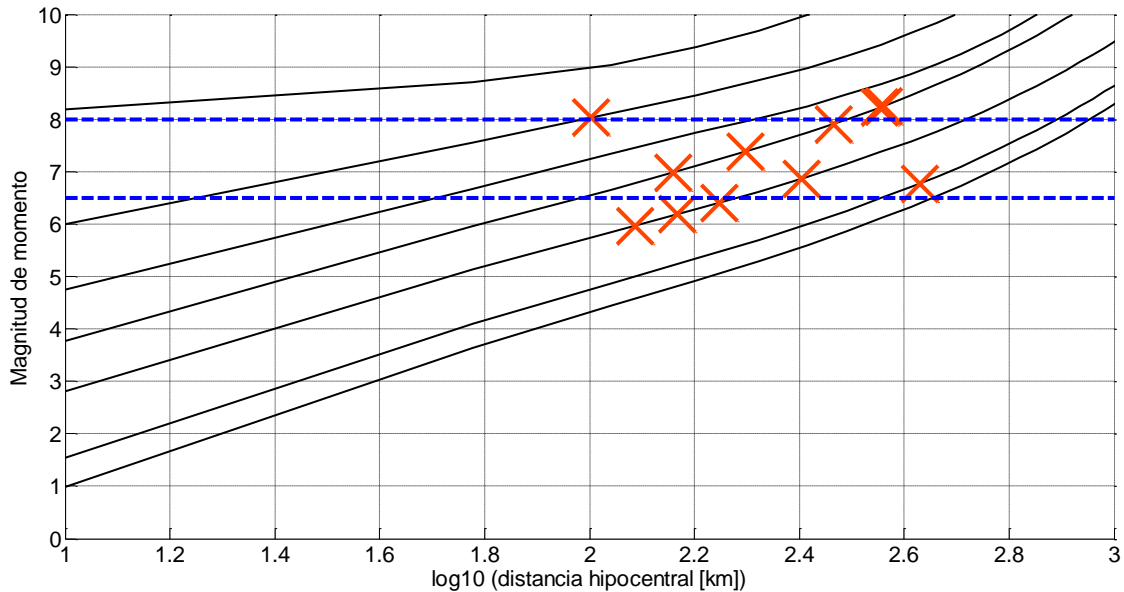


Figura 5. Evaluación de los reportes asociados al sismo del 24 de abril de 2017.

5. CONCLUSIONES

La posibilidad de utilizar la escala modificada de Mercalli como una herramienta que permita estudiar el peligro de tsunamis, ha sido evaluada con resultados satisfactorios. Mediante la superposición de las curvas de intensidad con los eventos de tsunamis se ha logrado la construcción de nueve cartas de evaluación de tsunamis, una por cada ciudad elegida para el estudio inicial. Desde el punto de vista de la metodología propuesta, los resultados aparentan ser coherentes con el peligro mayor que algunos sitios han presentado históricamente.

Como trabajo futuro, se requiere de un análisis más acabado, mediante la incorporación del método a un proceso de marcha blanca donde se evalúen las curvas obtenidas ante nuevos eventos que ocurran en un futuro cercano, y efectuar las correcciones que sean necesarias. Además, se espera que se estandarice la determinación de la intensidad por parte de quienes se encarguen de entregar los reportes, reduciendo la subjetividad de la escala de Mercalli. Para ello se requiere que ONEMI implemente nuevas metodologías, ya sea a través de la capacitación y localización establecida de informantes, o a través de la instrumentalización del proceso de evaluación de la intensidad sísmica. Esto permitiría tanto mejorar el método en su conjunto, como refinar su construcción una vez se tenga información suficiente como para revalidar las curvas de intensidad construidas.

A pesar de esto, los resultados sugieren ser apropiados para ser usados en el futuro, incluso como una forma de evaluación inversa, es decir, que permita definir la intensidad del sismo en algún sitio en particular, dadas la magnitud y la distancia al hipocentro, y así, estimar potenciales daños antes de que estos sean evaluados, por ejemplo.

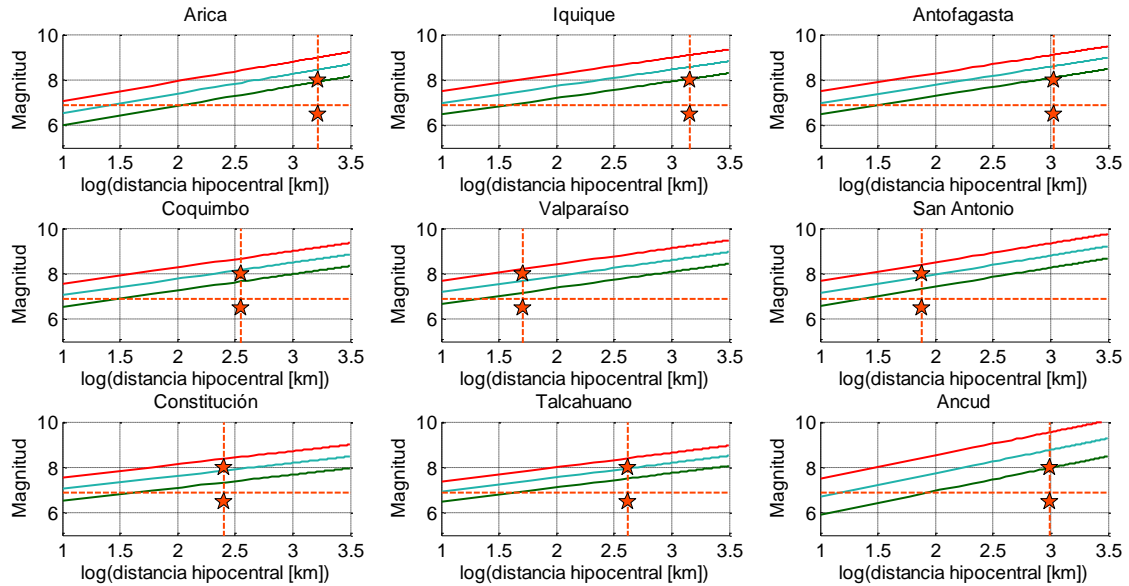


Figura 6. Evaluación del rango de niveles de peligro obtenido para cada ciudad bajo estudio para el sismo del 24 de abril de 2017.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a CONICYT, por financiar al autor principal a través de su Programa de Capital Humano Avanzado, específicamente mediante la Beca Magíster Nacional 2015 – N° 22150320.

También agradecen la colaboración de JICA (Japan International Cooperation Agency) y JST (Japan Science and Technology Agency) en el contexto del proyecto conjunto entre Chile y Japón para el desarrollo de comunidades resilientes ante tsunamis (Chile-Japan Joint Project on Enhancement of Technology to Develop Tsunami Resilient Communities). Esto principalmente a través del trabajo del Dr. Yutaka Hayashi, del Meteorological Research Institute (MRI) japonés.

REFERENCIAS

Babeyko, A., 2012, *EasyWave: Fast Tsunami Simulation Tool for Early Warning*.

Bernard E., Titov V., 2015. *Evolution of tsunami warning systems and products*. Phil. Trans. R. Soc. A 373, 20140371.

Boroschek R., Contreras V., 2012. *Strong Ground Motion from the 2010 Mw 8.8 Maule Chile Earthquake and Attenuation Relations for Chilean Subduction Zone Interface Earthquakes*. Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan

Catalán P. A, Aránguiz R., González G., Tomita T., Cienfuegos R., González J., Shrivastava M., Kumagai K., Mokrani C., Cortés P. *The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling*, Geophys. Res. Lett., 42, doi: 10.1002/2015GL063333.

Goto C., Ogawa Y., Shuto M., Imamura F., 1997. IUGG/IOC Time Project: *Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme*. International Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides No. 35-

Okada, Y., 1985. *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. Bull. Seism. Soc. Am. 75, 1135-1154.

Papazachos B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., Papazachos C. B., Karakaisis G. F., 2004. *Global Relations Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes*. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI, 2004.

Protocolo ONEMI-SHOA para evento de Tsunami en las costas de Chile.

Riquelme S., Mocanu M., 2012. *Informe Técnico: Desarrollo de una base de datos de fuentes tsunamigénicas para Chile*. Proyecto SHOA-Universidad de Chile.

Wald D., Quitoriano V., Heaton T., Kanamori H., 1999. *Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California*. *Earthquake Spectra*. August 1999, Vol. 15, No. 3, pp. 557-564.