

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**MEJORAS A CRITERIOS DE SELECCIÓN Y MANEJO
DE LA INCERTIDUMBRE EN EL SISTEMA INTEGRADO
DE PREDICCIÓN Y ALERTA DE TSUNAMIS (SIPAT)**

Memoria de Título presentada por
CARLOS RODRIGO MOZÓ SOTO

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Dr. Patricio Andrés Catalán Mondaca

Abril de 2017

RESUMEN

En la actualidad Chile cuenta con el Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis (SIPAT). Este sistema está constituido por una base de datos de escenarios sísmicos y de tsunamis premodelados. La filosofía de operación es que ante la ocurrencia de un sismo, se consulta a la base de datos con los parámetros sísmicos preliminares (ubicación del epicentro y magnitud), con la finalidad generar una evaluación del riesgo de tsunami de forma sectorizada a lo largo de toda la costa del territorio de Chile (continental, antártico e insular). Dada la incertidumbre inherente al proceso de ruptura sísmica, SIPAT adoptó un proceso conservativo inicialmente, lo que requería de ser evaluado con mayor profundidad. En la actualidad y dependiendo de la magnitud del sismo reportado, se pueden generar sobreestimaciones o subestimaciones de las amplitudes máximas del tsunami que podrían conllevar a evaluaciones por exceso o por defecto.

El objetivo de este trabajo es mejorar el manejo de la incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro en área de ruptura y la incertidumbre debida a la distribución aleatoria de deslizamiento. Estas son atacadas por SIPAT desde dos perspectivas, la incertidumbre respecto a la ubicación del epicentro es atacada mediante la aplicación de el método de máximo riesgo también llamado filtro por ubicación. Mientras que la distribución de deslizamientos es manejada por el filtro de magnitudes aplicado a los escenarios contenidos en la base de datos.

Para mejorar el manejo de la incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro se realizó un análisis de sensibilidad de las áreas de incertidumbre utilizadas para el método de máximo riesgo en SIPAT, por medio de Curvas de Excedencia de Amplitud Máxima de Tsunami (CEAMT). Para esto se analizaron cuatro áreas distintas, una de las cuales coincide con el área de utilizada por la JMA.

El sistema antiguo consideraba un área de incertidumbre $2L \times 2W$, pero el presente trabajo concluye que un área de L por W , reduce el pronóstico de las amplitudes de tsunami, y obtiene niveles de alerta más cercanos a las mediciones reales de las estaciones de niveles de mar, para tsunamis recientes.

En segunda instancia y como forma mejorar el manejo de la incertidumbre debido a la distribución aleatoria de deslizamiento, se propone un método interpolación. Este método entrega un mejor criterio de selección de escenarios candidatos, que incluye un parámetro confiable y flexible para calibrar el sistema. El método fue validado satisfactoriamente comparando las amplitudes máximas generadas por el método con los tsunamis modelados con sus parámetros focales reales. Como resultado se obtuvo que al considerar una magnitud equivalente igual a $Mw + \Delta Mw$ en el método de interpolación, donde ΔMw fue considerado igual a 0.3 según los resultados de *Mueller et al.* (2015), se generan sobreestimaciones del riesgo.

Como investigación a futuro se recomienda realizar un análisis de sensibilidad o un análisis por modelos de deslizamiento estocásticos en el área de ruptura para calibrar el parámetro ΔMw para las costas de Chile.

ABSTRACT

At present, Chile has the Integrated System of Prediction and Alert of Tsunamis-(SIPAT). This system consists of a seismic database and pre-calculated tsunami. The methodology of operation is that at the occurrence of an earthquake, the database is consulted with the preliminary seismic parameters (location of the epicenter and magnitude), the purpose is generating a risk assessment of the tsunami in a sectorized way along the whole coast of the territory of Chile. Given the uncertainty inherent in the seismic rupture process, SIPAT initially adopted a conservative process, Which needs to be better evaluated. At present and depending on the magnitude of the reported earthquake, can be given overestimates or underestimates of the peak tsunami amplitudes.

The objective of this work is to improve the management of uncertainty regarding the location of the epicenter in the area of rupture and the uncertainty due to the random distribution of slip. These are faced by SIPAT from two perspectives, the uncertainty regarding the location of the epicenter is faced with the application of the maximum risk method also called location filter. While the slip distribution is handled by the magnitude filter applied to the scenarios contained in the database.

In order to improve the management of the uncertainty related to the location of the epicenter, a sensitivity analysis of the areas of uncertainty used for the maximum risk method in SIPAT was performed using Tsunami Maximum exceedance Curves (CEAMT). For this, four different areas were analyzed, one of which coincides with the area used by the JMA.

The old system considered an area of uncertainty $2L \times 2W$, but the present work concludes that an area of L by W reduces the forecast of tsunami amplitudes, and obtains alert levels closer to the actual measurements of the levels stations of sea, for recent tsunamis.

In the second instance and as a way to improve the handling of uncertainty due to random slip distribution, a method of interpolation is proposed. This method provides a better criterion for selection of candidate scenarios, which includes a reliable and flexible parameter to calibrate the system. The method was successfully validated by comparing the maximum amplitudes generated by the method with the tsunamis modeled with their actual focal parameters. As a result it was obtained that when considering an equivalent magnitude equal to $Mw + \Delta Mw$ in the interpolation method, where ΔMw was considered equal to 0.3

according to the results of *Mueller et al.* (2015), overestimates the risk.

As future research, it is recommended perform a sensitivity analysis or analysis by stochastic slip models in the rupture area to calibrate the ΔMw parameter for the Chilean coast.

GLOSARIO

CORFO	Corporación de Fomento de la Producción.
CSN	Centro Sismológico Nacional.
DSS	Sistema de Soporte de Decisiones.
FONDEF	Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico.
FP	Forecast Point (Punto de Pronóstico).
JMA	Japan Meteorological Agency.
L	Largo del área de ruptura.
Mw	Magnitud de momento sísmico.
SATT	Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis.
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.
SIPAT	Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis.
SNAM	Sistema Nacional de Alerta de Maremotos.
USGS	United Stated Geological Survey.
W	Ancho del área de ruptura.

CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT	IV
GLOSARIO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. Implementación operacional de SIPAT	5
1.1.1. Puntos de pronóstico	6
1.1.2. Niveles de Alerta	9
1.1.3. Bloques	9
1.2. Manejo de la incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento en el área de ruptura	11
1.2.1. Filtro de escenarios por magnitud	11
1.3. Manejo de la incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro	14
1.3.1. Método de Máximo Riesgo	14

1.4.	Resumen	16
1.4.1.	Incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento	16
1.4.2.	Incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro	17
2.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	20
2.1.	Introducción	20
2.2.	Datos Disponibles	22
2.3.	Análisis de sensibilidad para el Método de Máximo Riesgo	26
2.3.1.	Propuesta de áreas de incertidumbre	27
2.4.	Propuesta de un método de interpolación	31
2.4.1.	Método de interpolación aplicado por JMA	32
2.4.2.	Estructura de la base de datos de Chile	33
2.4.3.	Propuesta de un método de interpolación aplicable a la base de datos Chilena	35
2.4.4.	Modelación numérica de escenarios para la validación	37
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
3.1.	Resultados y validación de las áreas de incertidumbre para el método de máximo riesgo	39
3.2.	Validación del método de interpolación	45
3.3.	Interpolación propuesta para SIPAT	47
3.3.1.	Análisis de evento reciente (Terremoto de Melinka 2016)	50
4.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	52
	CONCLUSIONES	58
A.	Curvas de Excedencia de Amplitud Máxima de Tsunami	60

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Modelo de falla y parámetros focales.	5
1.2. Puntos de Pronóstico y series de tiempo de tsunami.	8
1.3. Bloques de subdivisión territorial de Chile.	10
1.4. Áreas y profundidad de inundación fallas de distinto deslizamiento.	12
1.5. Terremotos históricos en zona centro sur de Chile.	14
1.6. Áreas de incertidumbre que definen en Área de Búsqueda.	15
1.7. Esquema y ejemplo de filtro por magnitud aplicado en SIPAT	17
1.8. Deformaciones verticales iniciales para evento de Maule 2010.	18
1.9. Deformaciones verticales iniciales para evento de Maule 2010.	19
2.1. Registro de mareógrafos para terremoto de Talinay 2015 (Mw=8.4).	22
2.2. Método de validación del uso de CEAMT a partir de escenarios modelados.	27
2.3. Escenarios candidatos de la base de datos (Mw=9.0) para evento de Maule 2010.	29
2.4. Escenarios candidatos de la base de datos (Mw=8.5) para evento de Iquique 2014.	29
2.5. Escenarios candidatos de la base de datos (Mw=8.5) para evento de Talinay 2015.	30
2.6. Ubicación de hipocentros en base de datos Japonesa.	33
2.7. Ubicación de hipocentros en SIPAT.	34
2.8. Esquema y ejemplo de funcionamiento del método de interpolación propuesto.	36
3.1. CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona norte.	41
3.2. CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona centro.	42

3.3. CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona sur.	43
3.4. CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona insular.	44
3.5. Nuevos escenarios candidatos para la aplicación del método de interpolación.	45
3.6. Validación de la ecuación de interpolación.	46
3.7. Curvas de amplitud máxima de tsunami para metodo de interpolación propuesto.	47
3.8. Decisión final a nivel país para evento tipo Talinay 2015, aplicando método de interpolación con $\Delta Mw = 0.3$	48
3.9. Decisión final a nivel país para evento tipo Maule 2010, aplicando método de interpolación con $\Delta Mw = 0.3$	49
3.10. Decisión final a nivel país para evento tipo Melinka 2016, aplicando método de interpolación con $\Delta Mw = 0.3$	51
4.1. Decisión final a nivel país para evento tipo Talinay 2015.	53
4.2. Decisión final a nivel país para evento tipo Maule 2010.	54
4.3. Implementación operacional de la metodología de interpolación en SIPAT.	56
A.1. CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona norte.	61
A.2. CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona centro.	62
A.3. CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona sur.	63
A.4. CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona insular.	64
A.5. CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona norte.	65
A.6. CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona centro.	66
A.7. CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona sur.	67
A.8. CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona insular.	68

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Tipos de Puntos de Pronóstico utilizados en SIPAT.	7
1.2. Estados de Alerta usados por SNAM.	9
1.3. Número de Puntos de Pronóstico por Bloque Territorial.	10
2.1. Parámetros sísmicos preliminares de eventos.	21
2.2. Datos de mareógrafos para el terremoto de Talinay 2015 (Mw=8.4).	23
2.3. Datos de mareógrafos para el terremoto de Iquique 2014 (Mw=8.2).	24
2.4. Datos de mareógrafos para el terremoto de Maule 2010 (Mw=8.8).	25
2.5. Parámetros geométricos del Área de Ruptura.	28
2.6. Parámetros para la modelación de escenarios reales.	37

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversos sistemas de alerta temprana de tsunamis alrededor del mundo. Cada sistema funciona de forma diferente, dependiendo de las particularidades de las zonas en las que se implemente. Chile actualmente cuenta con el Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis (SIPAT), el cual es un Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis (SATT) que incluye un Sistema de Soporte de Decisiones (DSS), basado en el SATT de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA). Éste sistema está construido a partir de una base de datos de escenarios precalculados.

La gran dificultad para un SATT en países como Chile y Japón, es el corto tiempo que transcurre desde la generación del tsunami hasta su arribo a la costa. Tales fueron los casos de los eventos recientes ocurridos en Maule en 2010 (Mw8.8) y de Iquique en 2014 (Mw8.2), donde las ondas de tsunami llegaron a la costa dentro de los primeros 20 minutos después de ocurridos los respectivos terremotos (*Catalán et al.*, 2015b). Estos tsunamis son denominados tsunamis de campo cercano y su rápida ocurrencia es producto de la cercanía de la zona de contacto entre placas y la costa, lo que genera un tiempo de respuesta reducido para los SATT, donde se tiene que realizar una advertencia o alerta inicial dentro de un lapso de tiempo muy pequeño. Esto hace difícil la modelación con datos de observaciones de nivel del mar en tiempo real, debido al mayor costo computacional y demanda de tiempo que esto implica.

Ante la ocurrencia de un sismo real, SIPAT consulta a la base de datos con la información sísmica preliminar (ubicación del epicentro y magnitud) entregada por el Centro Sismológico Nacional (CSN), arrojando como resultado niveles de alerta asociados a distintos de niveles evacuación. La información es entregada de forma sectorizada para todo el territorio nacional incluyendo en territorio continental, insular y antártico. Este sistema busca evitar evacuaciones innecesarias en zonas que posiblemente no sean afectadas, lo cual no solo genera pérdidas monetarias, sino que también pondría en duda la reputación del sistema por parte de la población.

Dada la incertidumbre inherente al proceso de ruptura sísmica, SIPAT adoptó un proceso conservativo inicialmente, lo que requiere ser evaluado con mayor profundidad, ya que en la actualidad se podría estar generando niveles de alarma desmedidos en comparación con los registros de los mareógrafos para eventos históricos como Maule 2010, Iquique 2014 y Talinay 2015.

Uno de los desafíos más grandes para los sistemas de alerta temprana basado en escenarios premodelados es el manejo de la incertidumbre, que proviene principalmente de dos fuentes. La primera corresponde a la incertidumbre de la ubicación del epicentro respecto al área de ruptura, ya que no necesariamente el epicentro coincide con el centro geométrico de la falla, que es la ubicación de referencia en el proceso de modelado. La segunda corresponde a la complejidad de la zona de ruptura, debido a la aleatoriedad de la distribución del deslizamiento en la interfaz de ruptura. Es decir, una gran cantidad de diferentes distribuciones de deslizamiento son igualmente posibles, y deben ser consideradas en la evaluación del riesgo.

Estas dos fuentes de incertidumbre plantean la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad de los actuales criterios de selección de escenarios de SIPAT, que permita manejar de manera adecuada la incertidumbre del sistema, sin generar sobreestimaciones ni subestimaciones de los niveles de riesgo. Buscando que las alturas de tsunami se ajuste de mejor manera a lo medido en eventos reales.

Este trabajo utiliza la información de los escenarios actualmente modelados en los servidores del SNAM, para realizar un el análisis de sensibilidad de las áreas de incertidumbre utilizadas para el método de máximo riesgo en SIPAT. También se evaluará la opción de implementación de una metodología de interpolación para magnitudes de sismos que no se encuentren simulados en la base de datos de SIPAT.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Mejorar el manejo de la incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro en área de ruptura, realizando un análisis de sensibilidad de las áreas de incertidumbre utilizadas para el método de máximo riesgo en SIPAT.
- Proponer una metodología de interpolación para magnitudes de sismos que no se encuentren simulados en la base de datos de SIPAT, que considere la incertidumbre relativa a la distribución de deslizamientos en el área de ruptura.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis por curvas de excedencia de amplitud máxima de tsunami por bloque territorial.
- Establecer una metodología de interpolación acorde a las particularidades de la base de datos sísmicos de Chile.
- Proponer la implementación computacional del método de interpolación.
- Validar los resultados obtenidos mediante mediciones en terreno (Mareógrafos), distribuidos a lo largo de todo país, para los eventos de Talinay 2015 ($M_w=8.4$), Iquique 2014 ($M_w=8.2$) y Maule 2010 ($M_w=8.8$).
- Presentar los resultados de manera que facilite la comprensión, sin sacrificar la calidad y cobertura de la información.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente capítulo explica el funcionamiento del actual sistema SIPAT, que se encuentra implementado en el Sistema Nacional de Alerta de Maremotos (SNAM), el cual es operado, dirigido y controlado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

También se explica como se realiza el manejo de la incertidumbre inherente al proceso de ruptura sísmica, contrastando con las soluciones aplicadas por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA).

1.1. Implementación operacional de SIPAT

SIPAT utiliza la teoría de la dislocación elástica propuesta por *Okada* (1985). Este modelo permite calcular la deformación cosísmica de la corteza terrestre, asumiendo una falla de sección rectangular de largo de falla (L) y ancho de falla (W), con el centroide de la falla ubicado exactamente en el epicentro del sismo. La Figura 1.1 muestra un esquema del modelo de falla propuesto por *Okada* con todos los parámetros focales requeridos para obtener la deformación cosísmica.

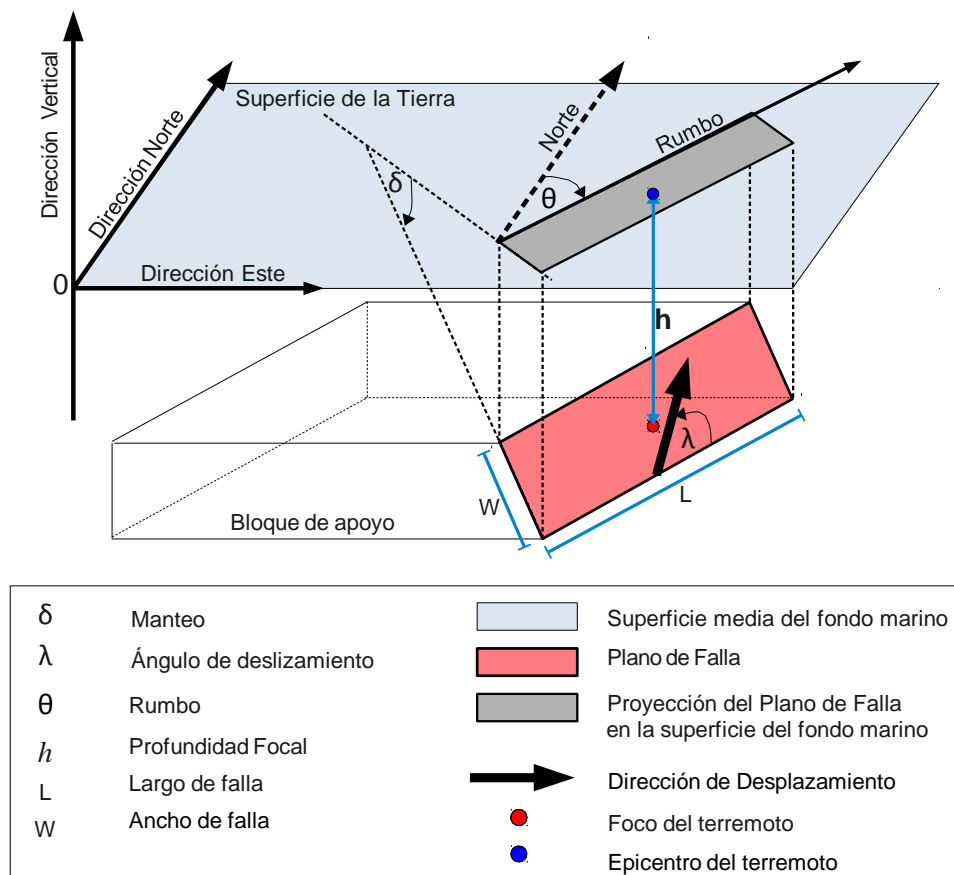


Figura 1.1: Modelo de falla y parámetros focales.

Fuente: *Wang et al.* (2011).

Generalmente en las bases de datos, la deformación inicial de la superficie libre se asume idéntica a la deformación cosísmica de la corteza terrestre (*Kajiura*, 1972), la cual se estima a partir del modelo de *Okada* (1985). SIPAT toma esta deformación inicial de la superficie libre y propaga el tsunami por todo el territorio nacional.

Para generar una modelación matemática de un tsunami que represente las características reales de la zona de subducción en las costas de Chile, se requiere caracterizar de manera adecuada todos los parámetros focales que permiten obtener la deformación inicial con el método de *Okada* (1985). Los parámetros δ , λ , θ y μ (módulo de rigidez) son estimados a partir de las características morfológicas de la zona de subducción, la cual varía según la zona del país que se requiera caracterizar. Mientras que la longitud de falla (L), el ancho (W) y el deslizamiento (D) son obtenidos a partir de la magnitud de momento (Mw) del terremoto, utilizando las denominadas Leyes de Escalamiento.

Para la zona de falla ubicada en las costas de Chile se utilizan 4 relaciones diferentes entre largo, ancho y deslizamiento, para 6 magnitudes Mw distintas: 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 y 9.5. Estas relaciones fueron determinadas en base a terremotos estudiados en el país por *Riquelme and Mocanu* (2015). Este informe técnico generó la base de datos sísmicos para SIPAT, que cuenta con un total de 7656 escenarios probables distribuidos a lo largo de toda la zona de subducción en las costas de Chile.

SIPAT realiza la propagación numérica de los tsunamis en COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model), un programa desarrollado por la Universidad de Cornell capaz de modelar un tsunami en su totalidad, es decir, en las etapas de generación, propagación, run-up e inundación. Además utiliza un sistema de grillas anidadas lo que balancea la precisión y eficiencia a la hora de obtener resultados, pudiendo usar tamaños de grillas más grandes para la propagación en el océano y grillas más finas para estudiar el impacto en las regiones costeras de interés (*Wang et al.*, 2011).

Como en SIPAT la deformación inicial se obtiene con la teoría de la dislocación elástica propuesta por *Okada* (1985), la utilización de COMCOT se reduce tan solo a la propagación del tsunami. SIPAT cuenta con una grilla batrimétrica de resolución de un minuto de arco, lo que genera un tiempo aproximado de cómputo de 8 horas por escenario.

1.1.1. Puntos de pronóstico

La modelación numérica contempla la obtención de series de tiempo de desplazamiento vertical de la superficie libre del mar, en los denominados puntos de pronóstico (FP, del inglés Forecast Point). Estos son puntos específicos en los cuales se caracteriza el tsunami para realizar la estimación del peligro.

El sistema cuenta con un total 962 FP de los cuales 636 son utilizados para el pronóstico, mientras que el resto se ubica en las posiciones de las Boyas DART, la Red de Estaciones de Nivel del Mar y cercanos a ellas, además de incluir algunos en las costas de Perú. Estos

últimos grupos de puntos no son utilizados para generar el pronóstico, y tienen la finalidad de que en un futuro puedan ser utilizados para investigación o implementar otras técnicas o modelos que tengan validez en la costa. El ordenamiento de estos puntos de pronóstico se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Tipos de Puntos de Pronóstico utilizados en SIPAT.

Tipo de FP	Sigla Identificadora	Rango de índices en base de datos	Cantidad
Mareógrafos de Chile	FPMR	1 al 39	39
Mareógrafos de Perú	FPMR	40 al 42	3
Boyas DART	FPBD	43 al 45	3
FP Para Pronóstico	FPAA	46 al 681	636
FP cercanos a mareógrafos	FPCMR	682 al 962	281
TOTAL			962

Fuente: FONDEF D11i1119, “Diseño e Implementación de una Base de Datos de Predicción de Tsunamis Para la Costa Chilena utilizando Modelación Computacional de Alto Rendimiento”, *Catalán et al.* (2015a)

El funcionamiento del sistema se basa en la estimación de las características del tsunami en puntos de pronóstico alejados de la costa (FPAA), a una profundidad cercana a los doscientos metros. Luego, para efectos de la estimación del peligro, los resultados obtenidos en los FPAA se transforman hacia la costa, escalando linealmente la amplitud obtenida mar adentro hacia puntos cercanos a la costa mediante la Ley de Green.

El utilizar puntos alejados de la costa y a poca profundidad, es debido a que los modelos que se están utilizando pueden presentar gran variabilidad en tiempos de arribo y amplitud debido a efectos de contorno (reflexión y refracción). Para modelar estos procesos se requiere de una batimetría con más detalle, que permita estimar de mejor manera en puntos más cercanos a la costa, lo que aumenta el costo computacional, haciéndolo poco práctico para un SATT. Es por esto y bajo el supuesto de que el tsunami es una onda larga que se propaga en aguas poco profundas, es posible aplicar la Ley de Green, la cual se presenta a continuación:

$$H_{coast} = H_{fp} \sqrt[4]{\frac{D_{fp}}{D_{coast}}} \quad (1.1.1)$$

Donde H_{coast} es la amplitud del tsunami estimado en la costa, H_{fp} es la amplitud del tsunami en el punto de pronóstico, D_{fp} la profundidad del océano en el punto de pronóstico, y D_{coast} la profundidad del punto ubicado en la costa. Todos los FP utilizados para el pronóstico están ubicados en el veril 200 (curva de nivel submarino de profundidad 200 metros), y la

profundidad de los puntos ubicados en la costa se toma constante e igual a 10 metros. Este valor de profundidad se basa en estudios de sensibilidad realizados previamente (Gubler, 2016), comprobándose que caracteriza de buena manera las alturas de tsunami en la costa.

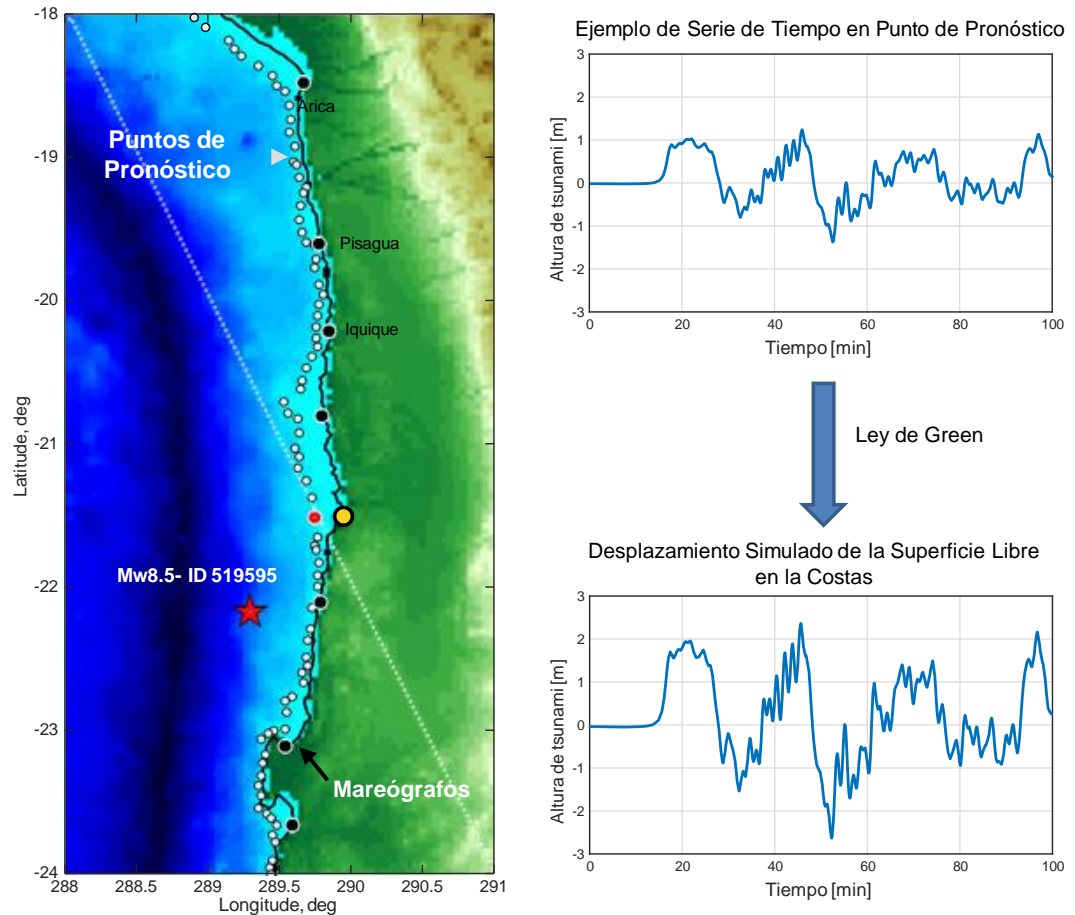


Figura 1.2: Puntos de Pronóstico y series de tiempo de tsunami.

Fuente: “Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis”, *Catalán et al.* (2015b)

A la izquierda de la Figura 1.2 se observa la ubicación de los FP utilizados para el pronóstico (círculos blancos), todos ellos ubicados en el veril 200, estos puntos se encuentran repartidos en toda la costa del territorio continental e insular. A la derecha se muestra la serie de tiempo en uno de los puntos de pronósticos y su posterior propagación hacia la costa aplicando la Ley de Green.

De la serie de tiempo de la superficie libre en la costa se extrae la altura máxima. Esta amplitud máxima define los niveles de alerta, que posteriormente son utilizados para la toma de decisión según el nivel de peligro que representa dicha amplitud de tsunami para la población, según se explica a continuación.

1.1.2. Niveles de Alerta

Es natural asumir que un sistema de esta naturaleza podrá ofrecer una gran precisión en la estimación de la altura del tsunami. Sin embargo, la experiencia japonesa en el terremoto de Tohoku, 2011, demostró que tal nivel de detalle contribuye poco a la caracterización de la amenaza. Por ello, se optó por definir cuatro niveles de evaluación, los cuales son: Informativo, Precaución, Alerta y Alarma (*Catalán et al., 2015b*). Estos son utilizados para la determinación del nivel de evacuación en un punto de la costa. Para la evaluación del peligro en la costa se establecen umbrales de amplitud del tsunami de acuerdo al Protocolo Sismo-Tsunami del Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile, los cuales se presentan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Estados de Alerta usados por SNAM.

Amplitud máxima de tsunami en la costa [metros]	Significado	Acciones	Nivel de Alerta
mayor a 3 m	Peligro inminente de tsunami	Evacuar hacia zona de seguridad (cota > 30m)	Alarma
1 a 3 m	Alta probabilidad de ocurrencia de tsunami	Evacuar hacia zona de seguridad (cota > 30m)	Alerta
0.3 a 1 m	Tsunami menor	Evacuar el borde costero hacia zona de precaución (a 80 m de distancia de la costa o riberas de ríos)	Precaución
menor a 0.3 m	No se reúnen las condiciones para generar tsunami	Emisión de boletín informativo	Informativo

Fuente: Protocolo Sismo Tsunami, Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile.

1.1.3. Bloques

Con la finalidad de realizar un pronóstico sectorizado que movilice solamente a la población que se encuentre bajo riesgo, se subdivide territorialmente el país, en los denominados bloques. Estas divisiones concuerdan con las divisiones político administrativas que tiene el país (regiones). Sin embargo, algunas regiones de gran extensión se han subdividido (por ejemplo, Antofagasta), con la finalidad de generar una mejor caracterización del peligro. También se generaron divisiones independientes para la Isla de Pascua, Isla San Félix, Archipiélago de Juan Fernández y la Antártica Chilena. En la Figura 1.3 se observa el total de 21 bloques utilizados para la caracterización del peligro en las costas de país.

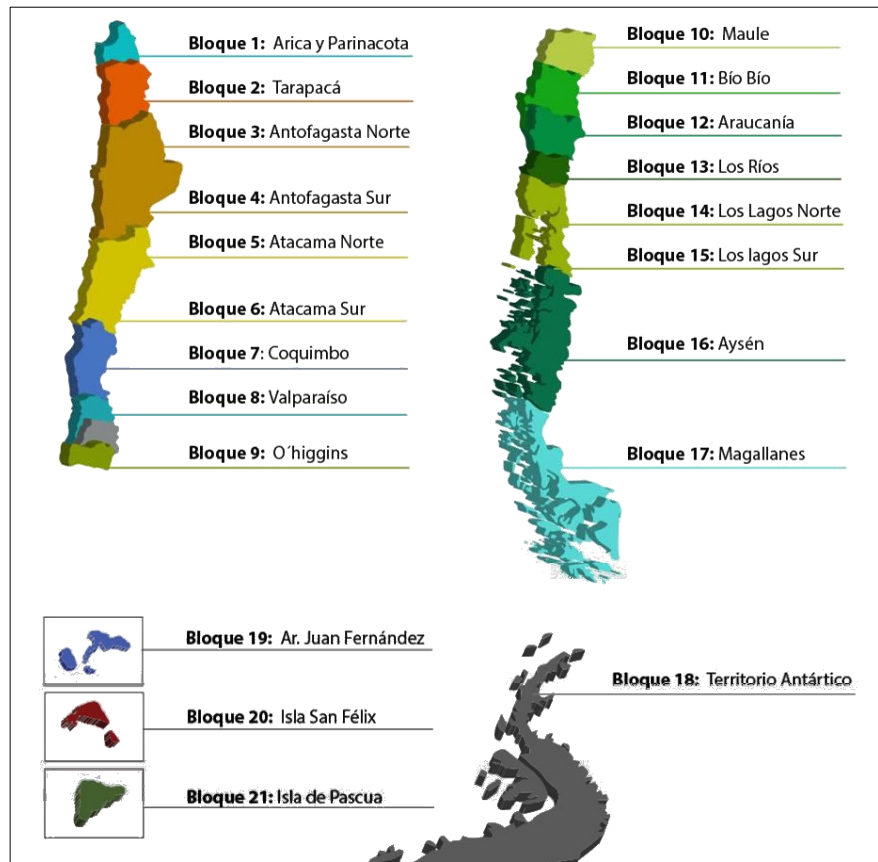


Figura 1.3: Bloques de subdivisión territorial de Chile.
Fuente: SHOA.

Cada bloque tiene asociado un número distinto de puntos de pronóstico en sus costas, como se puede observar en la Tabla 1.3. Para generar el nivel de alerta de un bloque se selecciona el peor caso, es decir se selecciona la amplitud de tsunami mayor de todos los puntos de pronóstico pertenecientes al bloque.

Tabla 1.3: Número de Puntos de Pronóstico por Bloque Territorial.

Bloque	Nombre	N° FP	Bloque	Nombre	N° FP	Bloque	Nombre	N° FP
Bloque 1	Arica y Parinacota	11	Bloque 8	Valparaíso	26	Bloque 15	Los Lagos Sur	33
Bloque 2	Tarapacá	29	Bloque 9	O'higgins	8	Bloque 16	Aysén	76
Bloque 3	Antofagasta Norte	24	Bloque 10	Maule	23	Bloque 17	Magallanes	80
Bloque 4	Antofagasta Sur	40	Bloque 11	Bío Bío	54	Bloque 18	Antártica	12
Bloque 5	Atacama Norte	23	Bloque 12	Araucanía	16	Bloque 19	Ar. Juan Fernández	22
Bloque 6	Atacama Sur	15	Bloque 13	Los Ríos	15	Bloque 20	Isla San Félix	14
Bloque 7	Coquimbo	32	Bloque 14	Los Lagos Norte	25	Bloque 21	Isla de Pascua	10

Fuente: Elaboración propia

1.2. Manejo de la incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento en el área de ruptura

1.2.1. Filtro de escenarios por magnitud

Los escenarios premodelados en la base de datos de SIPAT corresponden a fallas cuyo deslizamiento se presenta en términos de un deslizamiento medio (D) sobre el plano de falla, lo que resulta en una distribución uniforme del mismo, conocido como deslizamiento uniforme. La magnitud del deslizamiento (D), el largo de falla (L) y ancho (W), quedan determinados por las leyes de escalamiento definidas en el informe técnico “Desarrollo de una base de datos de fuentes tsunamigenicas para Chile” (*Riquelme and Mocanu, 2015*).

Sin embargo, los terremotos en la realidad presentan una gran variación del deslizamiento en la zona de ruptura. Tanto en dirección del manteo (δ) como del rumbo (θ), resultando en una distribución bidimensional del deslizamiento. Pero al no existir una forma de predecir el deslizamiento real en el área de ruptura, se considera la aproximación mediante un deslizamiento uniforme para todos los escenarios en base de datos de SIPAT. Al igual que en la base de datos de la JMA.

Los escenarios se encuentran discretizados según la magnitud, existiendo 6 distintas: Mw7.0, Mw7.5, Mw8.0, Mw8.5, Mw9.0 y Mw9.5. Ante la ocurrencia de un sismo se consulta a la base de datos con la magnitud preliminar informada por el CSN, y se seleccionan como escenarios candidatos para generar el pronóstico los que se encuentren dentro del intervalo $[Mw, Mw+0.5]$. Este filtro por magnitud viene a suplir las estimaciones que se generan al considerar una falla de deslizamiento uniforme en vez de una falla con deslizamiento real aleatorio. Ya que al suponer un deslizamiento uniforme en la interfaz de ruptura en los modelos de tsunami, se puede subestimar el impacto potencial y el alcance de la inundación (*Mueller et al., 2015*).

A modo de ejemplo, se analiza la modelación del área de inundación para la costa de Napier en Nueva Zelanda para dos escenarios de igual magnitud pero de distinta distribución de deslizamientos, como se observa en la Figura 1.4. En la parte superior se observa el área y profundidad de inundación debida a una falla plana de deslizamiento uniforme y magnitud Mw=8.4, mientras que en la parte inferior se observa una falla de deslizamiento aleatorio de magnitud Mw=8.4. A pesar que los escenarios de la Figura 1.4 tienen la misma magnitud de momento, la extensión de la inundación puede ser mayor para el deslizamiento no uniforme que para el deslizamiento uniforme.

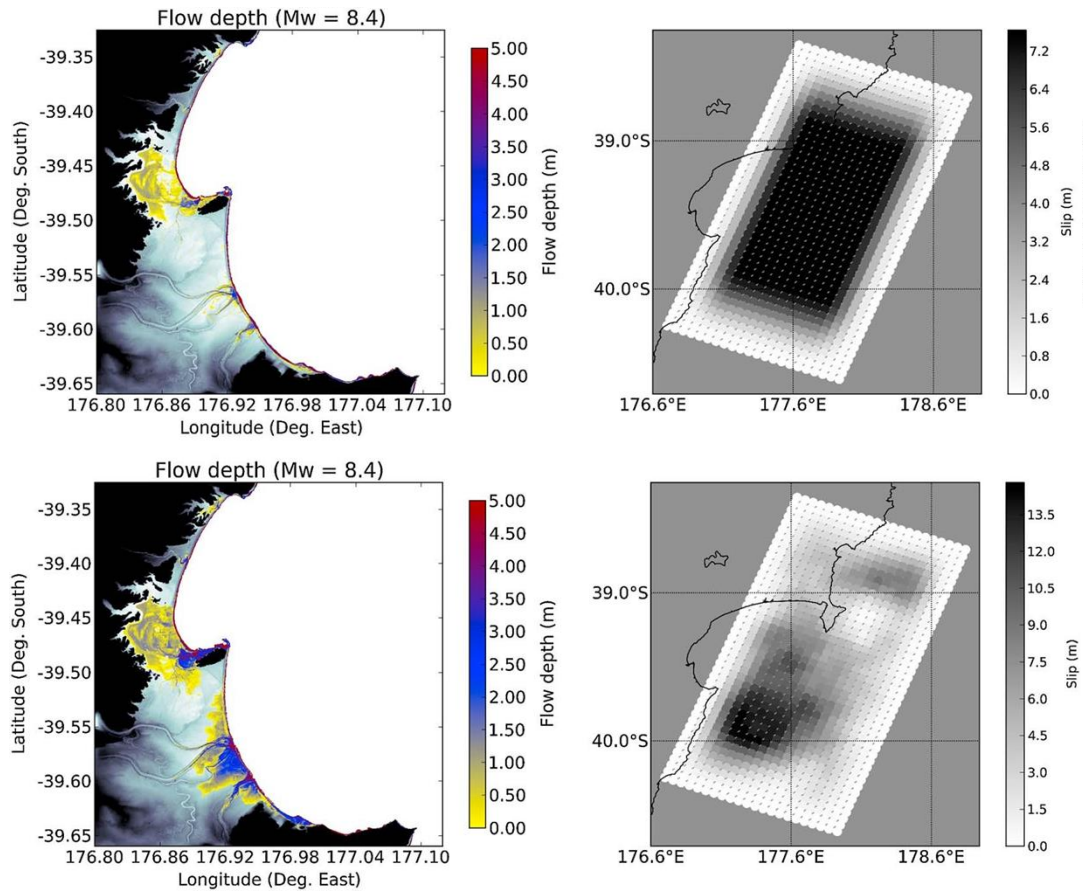


Figura 1.4: Áreas y profundidad de inundación fallas de distinto deslizamiento.

Fuente: *Mueller et al.* (2015).

En el estudio realizado por *Mueller et al.* (2015), se analizaron 100 escenarios con deslizamiento no uniforme asignados al azar, para la misma área objetivo, llegándose a la conclusión de que suponiendo un deslizamiento uniforme en la interfaz de ruptura, los modelos de tsunami pueden subestimar el impacto potencial y el alcance de la inundación. Por ejemplo, la simulación de un terremoto de Mw 8.7 a Mw 8.8 con deslizamiento uniforme reprodujo el área que podría ser inundada por eventos de deslizamiento no uniformes equivalentes de Mw 8.4. Esto quiere decir, que si se desea emular la posible inundación real producida por un terremoto de deslizamiento no uniforme con escenarios de deslizamiento uniforme, se debe considerar un diferencia de magnitud igual a $\Delta Mw = 0.3$ o $\Delta Mw = 0.4$.

Esto plantea un problema al actual filtro por magnitud (intervalo $]Mw, Mw+0.5]$), ya que este criterio de selección no es homogéneo al momento de considerar una diferencia de magnitud (ΔMw), debido a la discretización de magnitudes presentes en la base de datos (Mw7.0, Mw7.5, Mw8.0, Mw8.5, Mw9.0 y Mw9.5), se estará evaluando el riesgo considerando

ΔMw entre 0.1 a 0.5, dependiendo de la ubicación de la magnitud real del sismo dentro de la discretización de la base de datos. Por ejemplo para las magnitudes reales de terremotos de $Mw=8.0$, $Mw=8.1$, $Mw=8.2$, $Mw=8.3$ ó $Mw=8.4$, se estaría consultando a los escenarios de la base de datos de solo una magnitud ($Mw=8.5$). Así, para algunos casos está considerando una diferencia de magnitud $\Delta Mw = 0.1$, lo que generaría subestimaciones de la inundación de acuerdo a *Mueller et al.* (2015). Mientras que para otros casos se puede llegar a considerar una diferencia $\Delta Mw = 0.5$, lo que generaría sobreestimaciones de la inundación.

1.3. Manejo de la incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro

1.3.1. Método de Máximo Riesgo

Los recientes terremotos en Chile han puesto en evidencia que la ubicación del epicentro no está necesariamente centrada en la falla, a diferencia de lo propuesto por *Okada* (1985). Por ejemplo, el epicentro del terremoto de Valdivia (Mw9.5) en 1960 estuvo ubicado en el extremo al nor-este de la zona de ruptura (*Moreno et al.*, 2009). Por otra parte, el epicentro del evento de Maule de 2010 se encuentra muy cerca de la costa y un poco hacia el sur con respecto al centro de la zona de ruptura (*Vigny et al.*, 2011).

Simulaciones con el modelo de *Okada*, donde el epicentro se ubica en el centroide de la falla rectangular podría haber sobrestimado del peligro en Chile central para el evento de 1960. Caso contrario hubiese ocurrido para el evento de 2010, donde se hubiese subestimado el peligro en la zona central de Chile (*Gubler*, 2016). En la Figura 1.5 se muestra la ubicación del epicentro relativa al área de ruptura para los terremotos de Valdivia de 1960 y Maule 2010. Donde se puede ver que el epicentro del terremoto de Valdivia de 1960 posee su epicentro al norte del área de ruptura. Mientras que, para el terremoto del Maule de 2010 se encuentra levemente al sur de su centro geométrico.

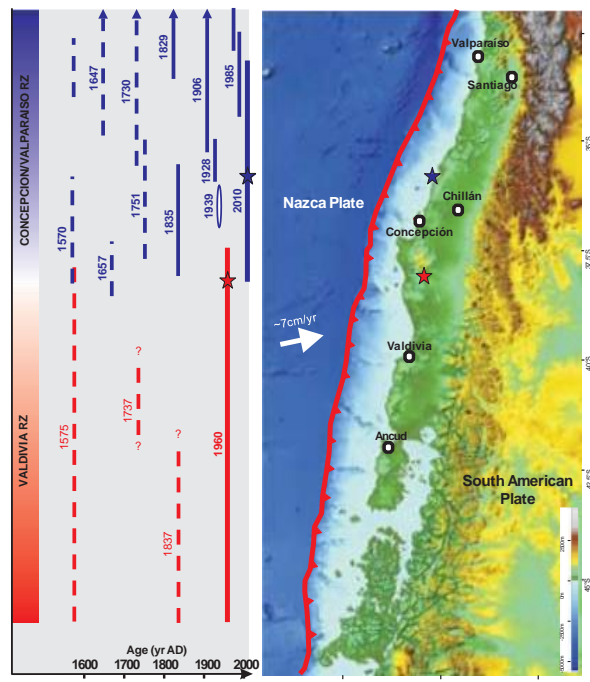


Figura 1.5: Terremotos históricos en zona centro sur de Chile.

Fuente: *Moernaut et al.* (2014).

Posterior a la aplicación del filtro por magnitud, y con la finalidad de considerar la incertidumbre de la ubicación relativa del epicentro en la zona de ruptura, SIPAT utiliza el método del máximo riesgo, el cual define como un escenario probable de tsunami a cualquier evento sísmico cuya zona de ruptura contenga el epicentro estimado (informado por el CSN). Esto significa que el epicentro estimado puede no estar necesariamente ubicado cerca del centro de la falla, siendo posible que se encuentre cerca de las fronteras de la falla. Las dimensiones del largo (L) y el ancho (W) del área de ruptura para el método de máximo riesgo, son obtenidas a partir de la Ley de Escalamiento propuesta por *Papazachos et al.* (2004).

En la Figura 1.6 a) se observan tres distintas posibilidades de ubicación del área de ruptura respecto al epicentro estimado, en una de ellas el epicentro coincide con el centro geométrico del área de ruptura, mientras las otras dos áreas contienen al epicentro en sus fronteras. Todas las combinaciones de áreas de ruptura, que contienen al epicentro como las de la Figura 1.6 a) forman un polígono con dimensiones $2L$ por $2W$ como se muestra en la Figura 1.6 b). Es por esto que SIPAT utiliza un área de incertidumbre de dimensiones $2L$ por $2W$ centrada en el epicentro estimado, con el fin de cubrir todos los escenarios posibles.

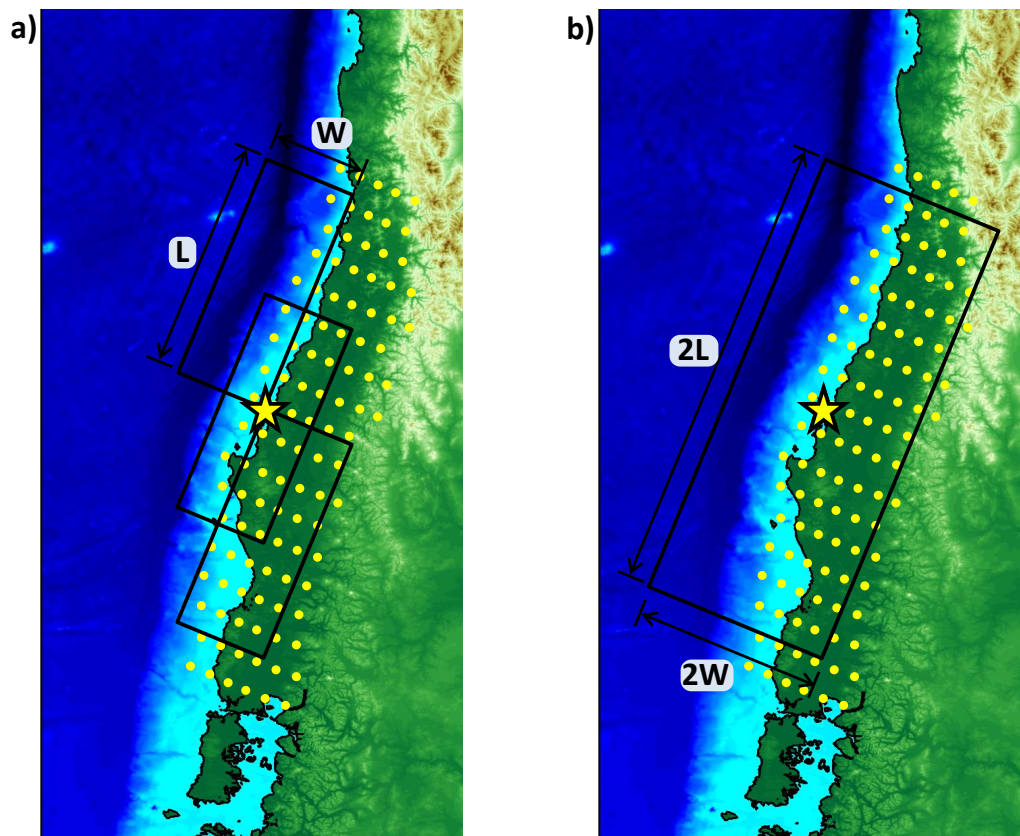


Figura 1.6: Áreas de incertidumbre que definen en Área de Búsqueda.

Fuente: Elaboración Propia.

El método selecciona como escenarios candidatos a todos los escenarios dentro de esta área de incertidumbre (2L por 2W), que corresponden a los puntos amarillos en la Figura 1.6). Para la evaluación final, se comparan los resultados de los escenarios individuales y se retiene la mayor amplitud por cada punto de pronóstico (peor caso para cada punto de predicción), para informar del nivel de alerta de un bloque se vuelve a retener la mayor altura entre los puntos de predicción pertenecientes al bloque (peor caso para cada bloque).

El sistema SIPAT se basa en el método de máximo riesgo utilizado por la JMA, con la diferencia de que el área del rectángulo de incertidumbre es aproximadamente cuatro veces mayor que el utilizado por Japón, ya que el sistema japonés utiliza un área de incertidumbre de L por W. La gran extensión territorial que cubre el área de incertidumbre utilizada por SIPAT puede estar generando sobreestimaciones de las amplitudes de tsunamis. A modo de ejemplo, se tiene que para un evento tipo Maule 2010 se consultaría a la base de datos con un área de alrededor de 900 km de largo por 250 km de ancho. Así, esta extensa área de incertidumbre está seleccionando como escenarios candidatos a sismos muy alejados del epicentro, que no tienen relación alguna con el sismo que se quiere caracterizar.

1.4. Resumen

1.4.1. Incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento

Para incorporar la incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento en el área de ruptura, el Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunami (SIPAT) incorpora el filtro por magnitud (intervalo $]M_w, M_w+0.5]$). Esta forma de obtener los escenarios candidatos plantea un gran problema, ya que dependiendo de la magnitud real del sismo se está considerando una diferencia de magnitud entre $\Delta M_w = 0.1$ a $\Delta M_w = 0.5$. Mientras que lo recomendado por *Mueller et al.* (2015) es de una diferencia de magnitud igual a $\Delta M_w = 0.3$ o $\Delta M_w = 0.4$. Como se observa en el esquema de la Figura 1.7, existen casos para los cuales el filtro por magnitud está considerando un $\Delta M_w = 0.1$, lo que generaría subestimaciones de la inundación de acuerdo a *Mueller et al.* (2015), pero existen otros casos en que puede llegarse a utilizar un $\Delta M_w = 0.5$, lo que generaría sobreestimaciones de la inundación.

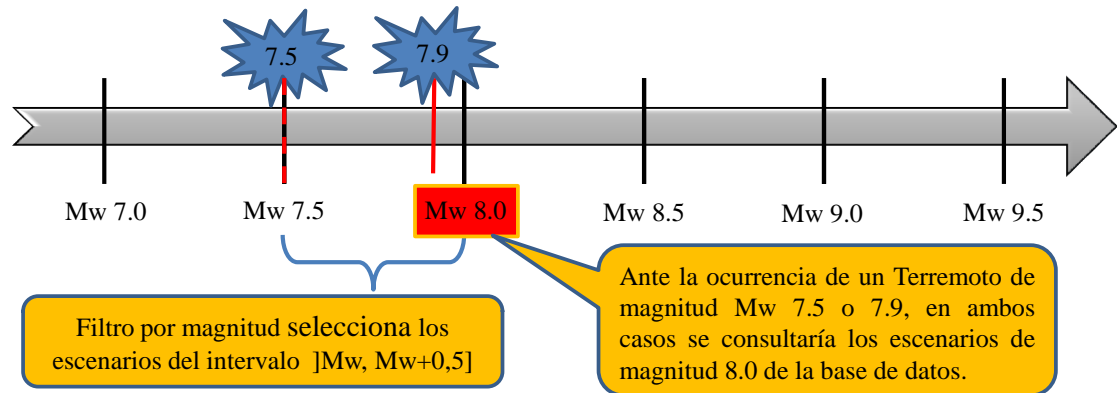


Figura 1.7: Esquema y ejemplo de filtro por magnitud aplicado en SIPAT

Fuente: Elaboración propia.

Así, el presente trabajo buscará un criterio de evaluación homogéneo para todas las magnitudes, es decir considerar un ΔM_w constante para cualquier magnitud de terremoto. Esto se realizará a través método de interpolación que sea aplicable a la base de datos de SIPAT.

1.4.2. Incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro

Realizando un análisis a partir de lo revisado a través de este capítulo, es posible apreciar que la metodología de funcionamiento del SATT en Chile ha sido aplicada de manera adecuada. SIPAT considera la incertidumbre inherente al proceso de ruptura sísmica en concordancia con los estándares internacionales en cuanto a los SATT. Sin embargo, en la actualidad SHOA ha percibido niveles de alerta excesivamente conservadores. Esto se debe en gran parte a la extensión territorial que abarca el área de incertidumbre en el método de máximo riesgo.

Un ejemplo de la extensión territorial que cubre el área de incertidumbre de $2L$ por $2W$ se observa en la Figura 1.8. En dicha figura se observa el polígono de búsqueda (área de incertidumbre) producto de un evento tipo Maule 2010. En esta misma figura se ilustran dos deformaciones verticales de la superficie libre del mar, obtenidas por el método de *Okada* (1985), para los dos escenarios candidatos más cercanos a los extremos del polígono. Estos dos escenarios no tienen relación alguna con la deformación real de este evento, ya que se encuentran lejos de la zona de ruptura real. La selección de todos de los escenarios contenidos en este gran polígono genera una evaluación del riesgo con una zona de generación extremadamente amplia, que para éste caso va desde Coquimbo por el norte hasta Quellón por el sur. Zona de generación que no guarda relación alguna con un evento tipo Maule 2010 ($M_w=8.8$).

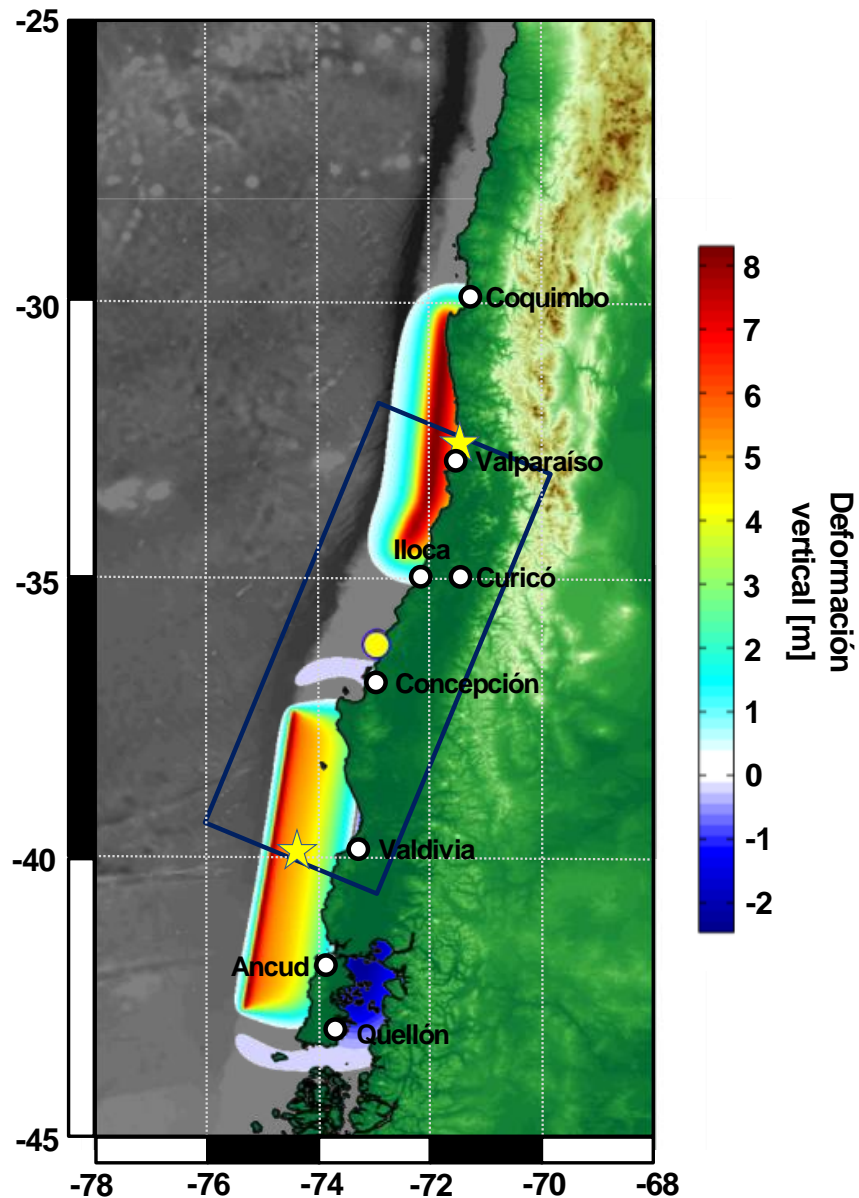


Figura 1.8: Deformaciones verticales iniciales para evento de Maule 2010.

Fuente: Elaboración Propia.

La gran extensión territorial de la zona de generación que se observa en la Figura 1.8, se traduce en elevados niveles de alerta para todo el territorio nacional, como se observa en la figura 1.9. Donde los bloques territoriales se encuentran pintados según los niveles de alerta de la Tabla 1.2. Además, se adjuntan las alturas máximas de tsunami registradas por los mareógrafos con sus respectivos niveles de alerta en círculos de colores. En la Figura 1.9 se observa que para todos los bloques territoriales exceptuando Arica, se obtienen niveles de alerta por sobre lo registrado instrumentalmente.

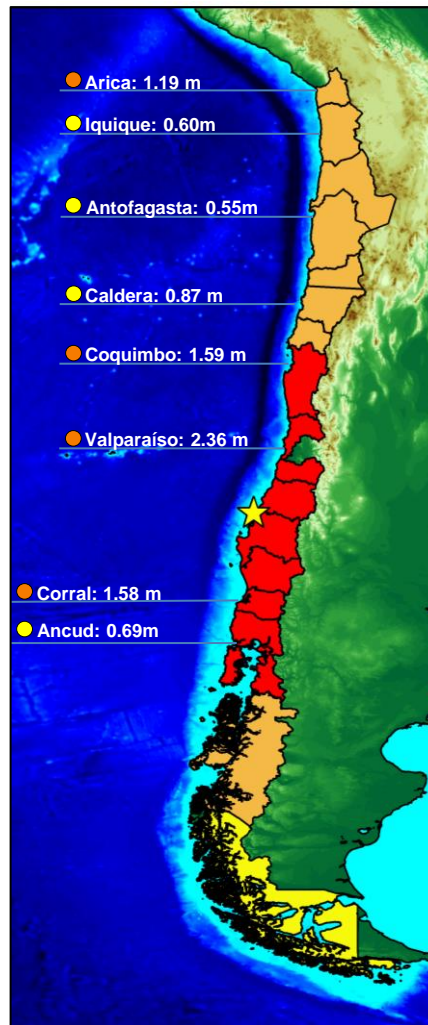


Figura 1.9: Deformaciones verticales iniciales para evento de Maule 2010.

Fuente: Elaboración Propia.

Así, el presente trabajo busca realizar un análisis de sensibilidad para cuantificar el cambio en los niveles de alerta generados al reducir el actual área de incertidumbre utilizada en SIPAT. Con la finalidad de poder seleccionar un área de incertidumbre adecuada para el método de máximo riesgo, considerando que el pronóstico debe seguir siendo conservador.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Introducción

En el contexto del lanzamiento y entrada en operación del Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis (SIPAT), se hace imprescindible ajustar dicho sistema para obtener una evaluación realista del nivel de peligro generado por un sismo subductivo de campo cercano.

Con la finalidad de que exista un ajuste realista de los niveles de alerta de tsunami para todo el territorio nacional, se requiere encontrar una adecuada área de búsqueda para el método de máximo riesgo. Actualmente el sistema es bastante conservador, generando niveles de alerta muy por sobre lo registrado en terremotos históricos.

Para lograr esto se establece una metodología de trabajo que además de replicar el funcionamiento actual de SIPAT, permita extraer información adicional con la finalidad de generar análisis de sensibilidad por curvas de probabilidad de excedencia de amplitud máxima de tsunami según distintas áreas de búsqueda.

En segundo lugar, se buscará un método de interpolación aplicable a la base de datos de Chile, con la idea de encontrar un método que considere la incertidumbre debida al deslizamiento en el área de ruptura, y así aplicar un criterio uniforme para todas las magnitudes, incluyendo tanto las magnitudes intermedias que no están simuladas en la base de datos, como las que si se encuentran simuladas, con la finalidad de no generar sobreestimaciones ni subestimaciones, que se producen debido al actual filtro por magnitud.

Para la validación de los resultados se cuenta con la medición instrumental de la Red de Estaciones de Nivel del Mar de Chile para los tsunamis históricos de Talinay 2015 ($M_w=8.4$), Iquique 2014 ($M_w=8.2$) y Concepción 2010 ($M_w=8.8$).

Los parámetros sísmicos preliminares de los eventos históricos informados por el CSN, se presentan en la Tabla 2.1. Estos parámetros sumados a los resultados de las simulaciones en la base de datos del SHOA, permitirán replicar el funcionamiento del actual sistema SIPAT, sin la necesidad de alterar su funcionamiento.

Tabla 2.1: Parámetros sísmicos preliminares de eventos.

Evento	Maule 2010	Iquique 2014	Talinay 2015
Fecha y hora (UTC)	27/02/2010 06:34:14	2014/04/01 23:46:47	16/09/2015 22:54:32
M_w	8.8	8.2	8.4
Epicentro (lon, Lat)	72.733°W – 35.909°S	70.769°W – 19.610°S	71.674°W – 31.573°S
Profundidad	35 km	25 km	22.4 km

Fuente: Centro Sismológico Nacional.

2.2. Datos Disponibles

Los datos disponibles para este trabajo corresponden a mediciones de la red de mareógrafos de Chile, para los eventos de Talinay 2015 ($M_w=8.4$), Iquique 2014 ($M_w=8.2$) y Maule 2010 ($M_w=8.8$). También se usarán los resultados de las simulaciones realizadas en los servidores del SNAM, en las dependencias del SHOA, que conforman la base de datos.

Las mediciones de la red de mareógrafos corresponden a las series de tiempo de los tsunamis medidos. En la Figura 2.1 se muestra el registro de los mareógrafos, para el tsunami de Talinay 2015. A la izquierda el registro en las costas de Coquimbo y la derecha Valparaíso, los colores de fondo representan los umbrales de alerta que se alcanzan con estos registros. Para el mareógrafo de Coquimbo se tiene una altura máxima de tsunami de 4.82 metros, altura que le corresponde un nivel de alarma, según lo indicado en la Tabla 1.2. Mientras que a la estación de Valparaíso con su altura de 1.91 metros le corresponde un estado de Alerta.

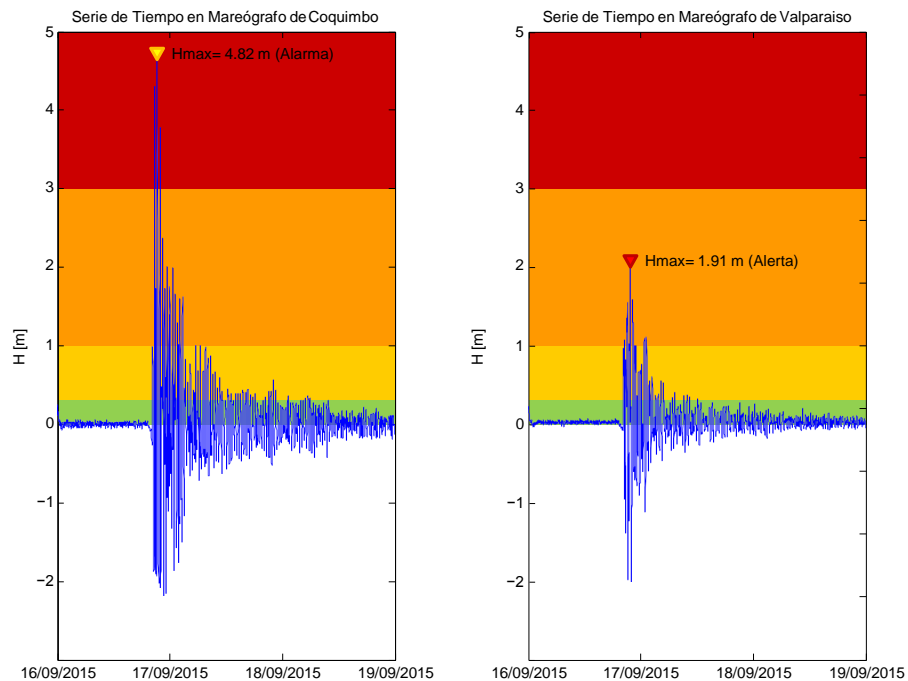


Figura 2.1: Registro de mareógrafos para terremoto de Talinay 2015 ($M_w=8.4$).

Fuente: Elaboración propia a partir de registros

El criterio para generar el nivel de alerta de un bloque depende de la altura máxima de la serie de tiempo en los puntos de pronóstico. Por lo tanto, para realizar la validación de los resultados basta con obtener los máximos de los registros. En las Tablas 2.2, 2.3 y 2.4, se muestran los valores de altura máxima y sus correspondientes niveles de alerta para los mareógrafos disponibles en los eventos de Talinay, Iquique y Maule respectivamente.

Tabla 2.2: Datos de mareógrafos para el terremoto de Talinay 2015 ($M_w=8.4$).

Localidad	Ubicación	H_{max} [m]	Nivel de alerta
	Lat. (°S) – Long. (°W)		
Arica	18°28'33" – 70°19'23"	0.59	Precaución
Pisagua	19°35'49" – 70°12'55"	0.23	Informativo
Iquique	20°12'16" – 70°08'52"	0.15	Informativo
Patache	20°48'34" – 70°12'08"	0.24	Informativo
Tocopilla	22°05'34" – 70°12'49"	0.17	Informativo
Mejillones	23°05'05" – 70°25'02"	0.31	Precaución
Antofagasta	23°39'11" – 70°24'16"	0.51	Precaución
Paposo	25°00'32" – 70°28'07"	0.28	Informativo
Taltal	25°24'33" – 70°29'40"	0.40	Precaución
Chañaral	26°21'04" – 70°38'12"	1.21	Alerta
Caldera	27°03'52" – 70°49'29"	1.10	Alerta
Huasco	28°27'38" – 71°13'26"	0.86	Precaución
Coquimbo	29°57'00" – 71°20'07"	4.82	Alarma
Pichidangui	32°07'57" – 71°32'02"	1.86	Alerta
Quintero	32°45'58" – 71°32'01"	1.94	Alerta
Valparaíso	33°01'38" – 71°37'33"	1.91	Alerta
San Antonio	33°35'11" – 71°36'52"	1.13	Alerta
Constitución	35°19'28" – 72°25'36"	1.45	Alerta
Isla Quiriquina	36°38'30" – 73°03'30"	0.96	Precaución
Talcahuano	36°41'43" – 73°06'22"	1.32	Alerta
Coronel	37°01'52" – 73°09'22"	0.60	Precaución
Lebu	37°39'52" – 73°39'52"	0.45	Precaución
Corral	39°52'42" – 73°25'22"	0.36	Precaución
Quellón	43°07'18" – 73°37'23"	0.37	Precaución
Juan Fernandez	33°38'13" – 78°49'41"	1.02	Alerta
Isla de Pascua	27°08'47" – 109°25'56"	0.82	Precaución
Isla San Felix	26°17'26" – 80°05'18"	0.65	Precaución

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3: Datos de mareógrafos para el terremoto de Iquique 2014 ($M_w=8.2$).

Localidad	Ubicación	H_{max} [m]	Nivel de alerta
	Lat. (°S) – Long. (°W)		
Arica	18°28'33" – 70°19'23"	1.98	Alarma
Pisagua	19°35'49" – 70°12'55"	1.77	Alarma
Iquique	20°12'16" – 70°08'52"	2.02	Alarma
Patache	20°48'34" – 70°12'08"	1.67	Alarma
Tocopilla	22°05'34" – 70°12'49"	0.87	Precaución
Mejillones	23°05'05" – 70°25'02"	0.82	Precaución
Antofagasta	23°39'11" – 70°24'16"	0.31	Precaución
Taltal	25°24'33" – 70°29'40"	0.31	Precaución
Caldera	27°03'52" – 70°49'29"	0.27	Informativo
Huasco	28°27'38" – 71°13'26"	0.19	Informativo
Coquimbo	29°57'00" – 71°20'07"	0.31	Precaución
Pichidangui	32°07'57" – 71°32'02"	0.19	Informativo
Valparaíso	33°01'38" – 71°37'33"	0.23	Informativo
Constitución	35°19'28" – 72°25'36"	0.32	Precaución
Talcahuano	36°41'43" – 73°06'22"	0.37	Precaución
Coronel	37°01'52" – 73°09'22"	0.24	Informativo
Lebu	37°39'52" – 73°39'52"	0.12	Informativo
Corral	39°52'42" – 73°25'22"	0.11	Informativo
Puerto. Montt	43°07'18" – 73°37'23"	0.24	Informativo
Juan Fernandez	33°38'13" – 78°49'41"	0.19	Informativo
Isla de Pascua	27°08'47" – 109°25'56"	0.22	Informativo
Isla San Felix	26°17'26" – 80°05'18"	0.72	Precaución

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4: Datos de mareógrafos para el terremoto de Maule 2010 ($M_w=8.8$).

Localidad	Ubicación	H_{max} [m]	Nivel de alerta
	Lat. (°S) – Long. (°W)		
Arica	18°28'33" – 70°19'23"	1.19	Alerta
Iquique	20°12'16" – 70°08'52"	0.60	Precaución
Antofagasta	23°39'11" – 70°24'16"	0.55	Precaución
Caldera	27°03'52" – 70°49'29"	0.87	Precaución
Coquimbo	29°57'00" – 71°20'07"	1.59	Alerta
Valparaíso	33°01'38" – 71°37'33"	2.36	Alerta
Talcahuano*	36°41'43" – 73°06'22"	–	–
Corral	39°52'42" – 73°25'22"	1.58	Alerta
Ancud	41°52'18" – 73°49'56"	0.63	Precaución
Isla de Pascua	27°08'47" – 109°25'56"	0.96	Precaución
Isla San Felix	26°17'26" – 80°05'18"	0.69	Precaución

* Registro incompleto por falla del instrumento.

Fuente: Elaboración propia

Si bien las principales consecuencias del tsunami del 27 de Febrero del 2010, fueron negativas, siendo el principal impacto la pérdida de vidas humana, el desastre también sirvió, como nunca antes en la historia del país, para aprender la lección y tomar medidas a fin de mitigar los efectos de futuros eventos de este tipo en el territorio nacional. En el ámbito científico y de infraestructura, sirvió para que se mejorara la dotación de estaciones de nivel de mar a lo largo del país, es por esto, que para el tsunami del 16 de Septiembre de 2015 en Talinay se cuenta con un registro de estaciones más extenso.

Los resultados de las simulaciones corresponden a las series de tiempo en los puntos de pronóstico, los que se encuentran almacenados en la base de datos del SNAM. Para el terremoto de Maule 2010, se tiene un total de 72 escenarios candidatos, para Iquique 2014 se tienen 32, mientras que para Talinay 2015 se tienen un total de 93 escenarios. Estos escenarios corresponden a todos los que se encuentran simulados actualmente y cuyos epicentros se encuentran dentro del área de incertidumbre de 2L por 2W, y dentro del rango de magnitudes $[M_w, M_w+0.5]$.

2.3. Análisis de sensibilidad para el Método de Máximo Riesgo

Para incorporar la incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro con respecto al área de ruptura, el Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunami (SIPAT) incorpora un área de búsqueda de dimensiones $2L$ por $2W$, centrada en el epicentro del terremoto. Actualmente el área de incertidumbre genera niveles de alerta desmedidos, y muy por sobre lo observado en terremotos históricos como Talinay 2015 ($M_w=8.4$), Iquique 2014 ($M_w=8.2$) y Concepción 2010 ($M_w=8.8$). Un ejemplo de esto se muestra en la Sección 1.4.2.

El presente capítulo busca cuantificar la influencia del tamaño del área de búsqueda en el método de máximo riesgo. Esto se realizará por medio de un análisis de sensibilidad por Curvas de Excedencia de Amplitud Máxima de Tsunami (CEAMT). Mediante estas, se buscará cuantificar el efecto de reducir el área de incertidumbre y su incidencia en el nivel de alerta producido a nivel local (por bloques territoriales), también se busca contrastar la decisión final a nivel país, de distintas áreas de incertidumbre.

Para validar el uso de las CEAMT generadas a partir de escenarios premodelados, se utilizarán las amplitudes máximas de los registros de las estaciones de nivel de mar, tal como se muestra en la Figura 2.2. Donde se grafica la altura máxima de los puntos de pronóstico correspondientes a cada bloque territorial, las alturas de tsunami son graficadas de forma descendente y se presenta una curva por cada área de incertidumbre a evaluar. Los valores de altura medidos por los mareógrafos se representan a través de una recta horizontal. Para la validación, se determina visualmente que la altura medida por los mareógrafos debe ser menor a los niveles alcanzados por todas las áreas de incertidumbre, ya que el sistema debe seguir evaluando el riesgo con un criterio conservador. Se espera que las CEAMT se desplacen al ir reduciendo el área de incertidumbre (como lo indica la Figura 2.2), indicando menores alturas de tsunami y por ende menores niveles de alerta al reducir el área de incertidumbre. Las CEAMT serán obtenidas para los eventos de Maule 2010, Iquique 2014 y Talinay 2015.

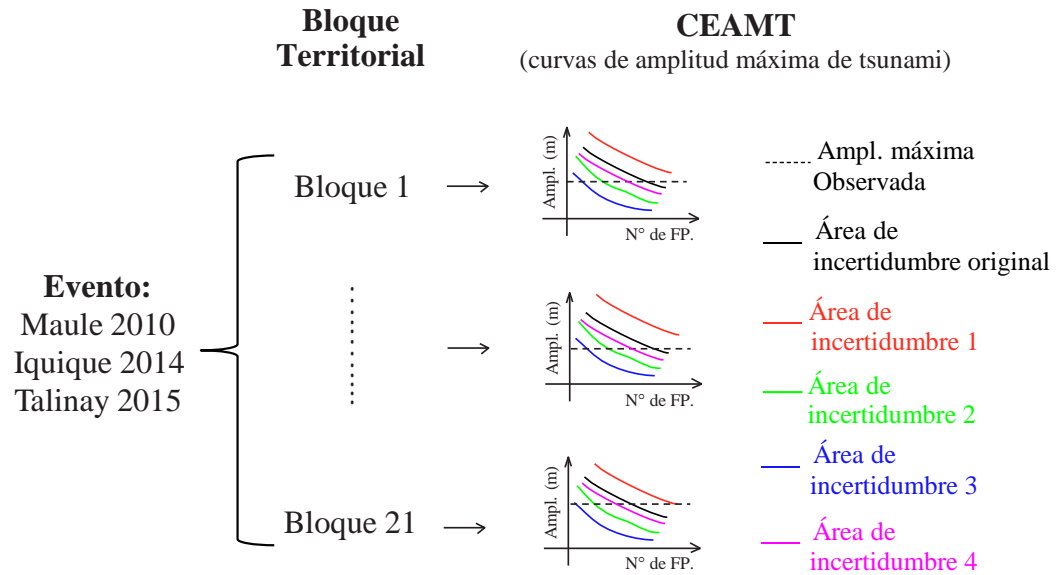


Figura 2.2: Método de validación del uso de CEAMT a partir de escenarios modelados.
 Fuente: Elaboración propia a partir de *Gubler* (2016).

2.3.1. Propuesta de áreas de incertidumbre

Para realizar este análisis de sensibilidad se analizaran cinco áreas de incertidumbre, todas menores a la actualmente utilizada por SIPAT. Las Curvas de Excedencia de Amplitud Máxima de Tsunami (CEAMT) se generan para los cinco tamaños de áreas de incertidumbre: la primera utilizada en SIPAT (2L por 2W), la segunda similar a la utilizada por Japón (L por W) y las otras tres son seleccionadas de forma arbitraria, con la finalidad de que permitan observar alguna tendencia al ir reduciendo sustantivamente el área de incertidumbre. Estas tres áreas corresponden a (1.5L por W), (0.5L por W) y (0.5L por 0.5W).

Los valores estimados del largo de la zona de ruptura (L) y del ancho de la zona de ruptura (W), se obtienen a partir de la Ley de Escalamiento propuesta por *Papazachos et al.* (2004), utilizando la magnitud (M_w) estimada del sismo. Las leyes de escalamiento utilizadas por SIPAT y propuestas por *Papazachos et al.* (2004), se presentan en las ecuaciones 2.3.1 y 2.3.2.

$$\log_{10}(L) = -2.19 + 0.55 * M_w \tag{2.3.1}$$

$$\log_{10}(W) = -0.63 + 0.31 * M_w \tag{2.3.2}$$

Los valores del largo (L) y ancho (W) de la zona de ruptura para los eventos de Talinay 2015 (Mw=8.4), Iquique 2014 (Mw=8.2) y Concepción 2010 (Mw=8.8) se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Parámetros geométricos del Área de Ruptura.

Evento	L [km]	W [km]	Área [km^2]
Maule 2010 (Mw=8.8)	447	125	55875
Iquique 2014 (Mw=8.2)	209	81	16929
Talinay 2015 (Mw=8.4)	268	94	25192

Fuente: Elaboración propia a partir de leyes de escalamiento de *Papazachos et al.* (2004).

Al aplicar el filtro por magnitud $[Mw, Mw+0.5]$, SIPAT siempre seleccionará la magnitud inmediatamente superior contenida en la base de datos (de magnitudes 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 y 9.5), por lo tanto, para el evento de Maule 2010 los escenarios candidatos serán de magnitud Mw 9.0, mientras que los de Iquique y Talinay corresponderán a Mw 8.5. La selección de la misma magnitud para los eventos de Iquique y Talinay se debe al criterio no homogéneo de selección de escenarios ejemplificado en la Sección 1.4.1.

Una vez aplicado el filtro por magnitud y con los parámetros geométricos de la Tabla 2.5, se extraen los escenarios candidatos para cada uno de los eventos, aplicando el área de incertidumbre (Método del Máximo Riesgo). En las Figuras 2.3, 2.4 y 2.5, se muestran los escenarios candidatos para las todas las áreas de incertidumbre analizadas en este trabajo. De color rojo se observan los escenarios dentro de las áreas de incertidumbre que serán analizadas en este trabajo, y de color magenta se presentan los escenarios candidatos originales (con área de incertidumbre de $2L$ por $2W$) que quedan fuera del área de incertidumbre de prueba. En estas imágenes se puede observar la reducción sistemática del área de búsqueda y por ende la disminución de los escenarios candidatos.

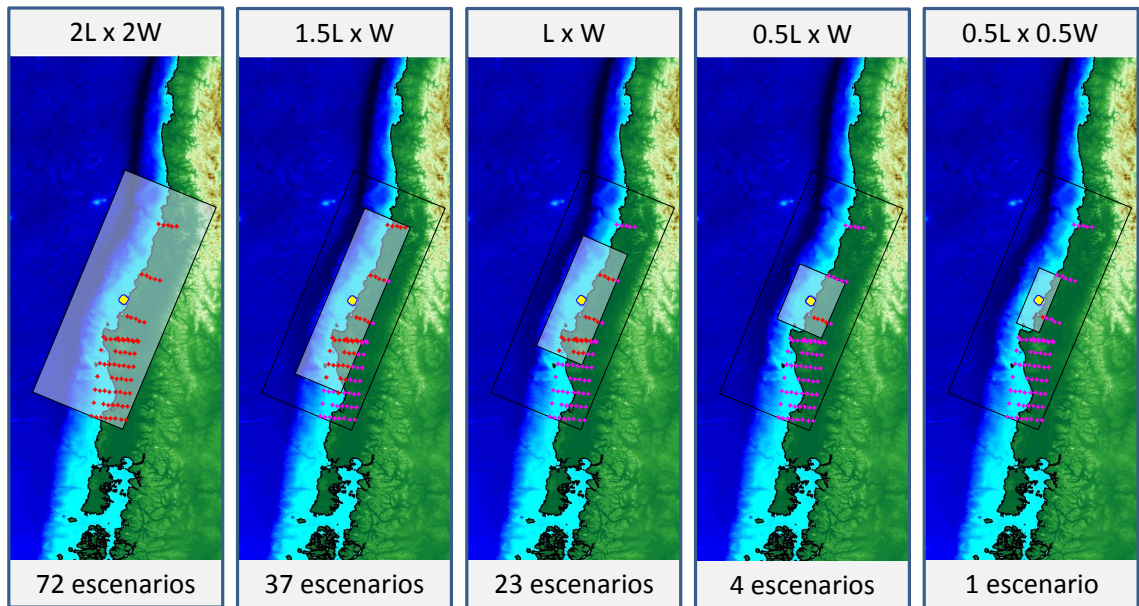


Figura 2.3: Escenarios candidatos de la base de datos ($M_w=9.0$) para evento de Maule 2010.
Fuente: Elaboración propia.

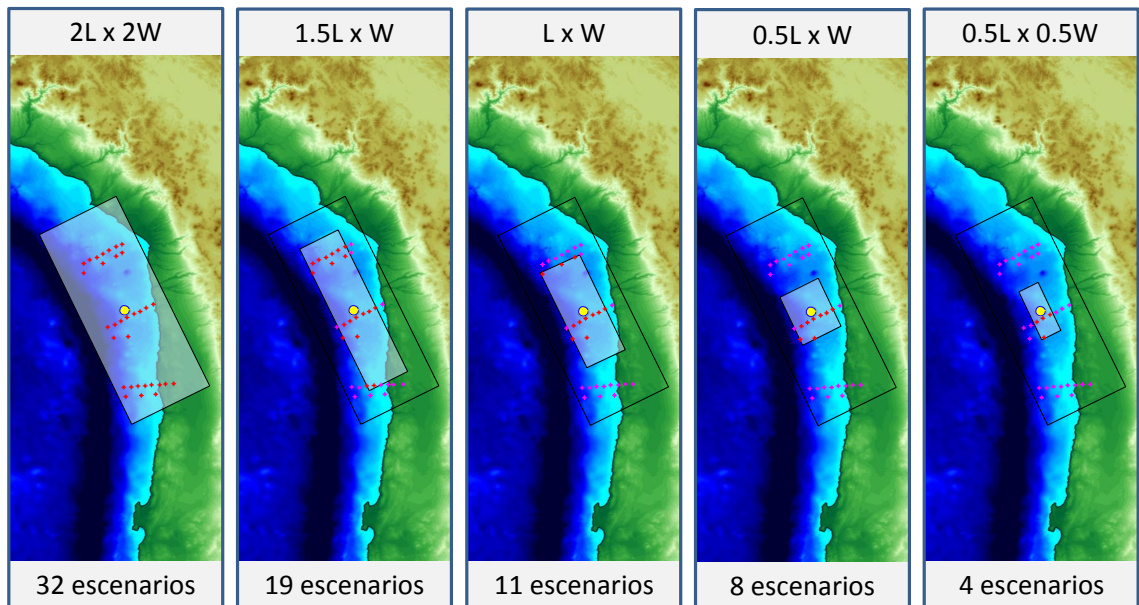


Figura 2.4: Escenarios candidatos de la base de datos ($M_w=8.5$) para evento de Iquique 2014.
Fuente: Elaboración propia.

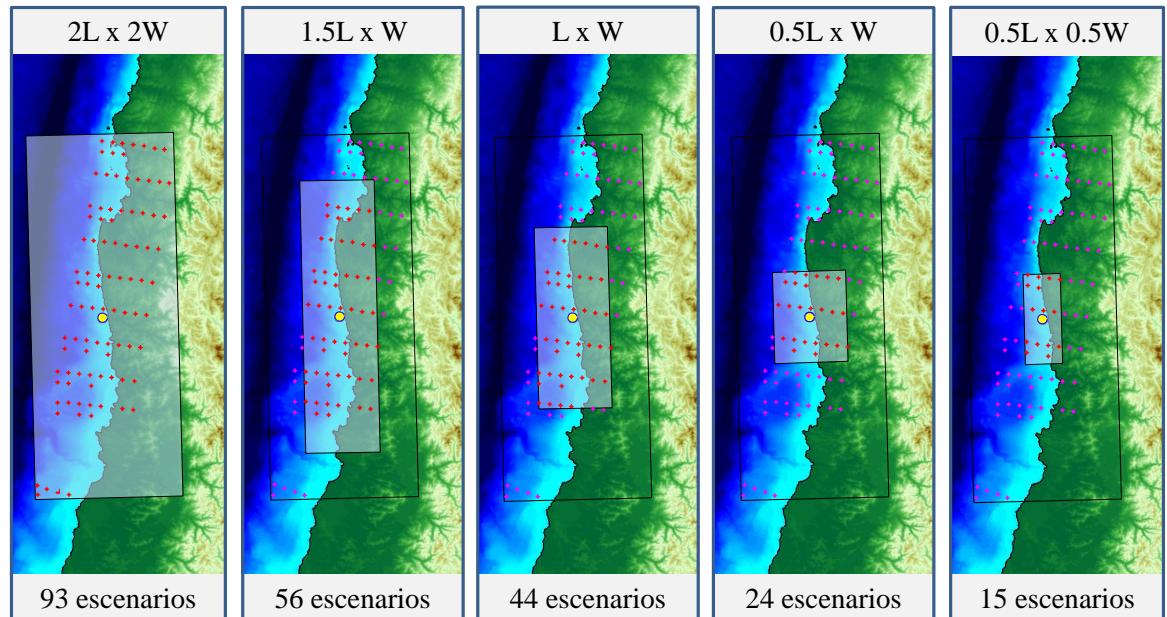


Figura 2.5: Escenarios candidatos de la base de datos ($M_w=8.5$) para evento de Talinay 2015.

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados de las simulaciones de estos escenarios se generaran las CEAMT, para cada bloque territorial. Cómo se muestra en la Figura 2.2, esto permitirá identificar que tan sensible es en nivel de alerta a la reducción del área de incertidumbre.

2.4. Propuesta de un método de interpolación

Para incorporar la incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento en el área de ruptura, SIPAT incorpora el filtro por magnitud (intervalo $]Mw, Mw+0.5]$). Esta forma de obtener los escenarios candidatos plantea el problema de la selección no homogénea de magnitudes, tal como se ejemplifica en la sección 1.4.1.

Según lo recomendado por *Mueller et al.* (2015), para evaluar el peligro en las costas se debe considerar una diferencia de magnitud igual a $\Delta Mw = 0.3$ o $\Delta Mw = 0.4$. Con la finalidad de considerar el efecto de la aproximación de deslizamiento uniforme en el área de ruptura (Ver Sección 1.4.1).

Con la finalidad de generar un pronóstico que considere una diferencia de magnitud (ΔMw) constante, como lo recomendado por *Mueller et al.* (2015). Se requiere de un método de interpolación que permita obtener las alturas de tsunami para magnitudes que no se encuentren simuladas en la base de datos. Así, en el presente capítulo se buscará un criterio de evaluación homogéneo para todas las magnitudes, es decir, considerando un ΔMw constante para cualquier magnitud de terremoto. Esto se realizara a través de un método de interpolación que sea aplicable a la base de datos de SIPAT. Basado en el sistema de interpolación de escenarios de Japón.

2.4.1. Método de interpolación aplicado por JMA

En Japón, al igual que en Chile, se utilizan los filtros anteriormente mencionados para tsunamis de campo cercano (método del máximo riesgo y filtro por magnitud), con la salvedad de que el sistema Japonés incluye sismos simulados en zonas alejadas de la costa (que no corresponden a tsunamis de campo cercano). Ante la ocurrencia de un terremoto cuyo epicentro se encuentre alejado de la costa, se utiliza un método de interpolación entre los escenarios más cercanos de la base de datos.

Al utilizar este método se incluye un nuevo parámetro preliminar del sismo, la profundidad del hipocentro, el cual no es considerado para la generación de un pronóstico para sismos de campo cercano.

Japón realiza una interpolación bilineal a escala logarítmica entre magnitud y profundidad. La ecuación aplicada se basa en el fundamento de que los valores logarítmicos de las alturas estimadas del tsunami en los FPs tienen una correlación positiva con la magnitud y una correlación negativa con la profundidad del hipocentro (*JMA*, 2013). Las alturas logarítmicas del tsunami se calculan para cuatro casos: dos profundidades del hipocentro y dos magnitudes, estos valores se someten a interpolación lineal en dos dimensiones, y finalmente, se devuelven las alturas del tsunami en escala logarítmica, como se muestra en las ecuaciones 2.4.3, 2.4.4 y 2.4.5.

$$\text{Log}_{10}(\eta) = (1 - A) \cdot \text{Log}_{10}(\eta_1) + A \cdot \text{Log}_{10}(\eta_2) \quad (2.4.3)$$

$$A = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.4.4)$$

$$A = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1} \quad (2.4.5)$$

Donde, η es la altura del tsunami obtenida de las alturas η_1 y η_2 , contenidas en la base de datos. En la ecuación 2.4.3, A depende del tipo de interpolación que se este realizando, si se esta interpolando por profundidad se utiliza la Ecuación 2.4.4 y si es por magnitud la Ecuación 2.4.5 (*JMA*, 2013).

En Japón los escenarios están distribuidos en una matriz cuadrada con los epicentros equidistantes entre sí (en latitud y longitud). Además, cada epicentro es modelado a distintas profundidades, lo que genera una matriz cúbica de escenarios. Ante la ocurrencia de un sismo se consulta la base de datos con la información sísmica preliminar, que para el caso de Japón incluye la profundidad del hipocentro. Una imagen cualitativa de la distribución de los escenarios del sistema de alerta temprana de Japón se muestra en la Figura 2.6.

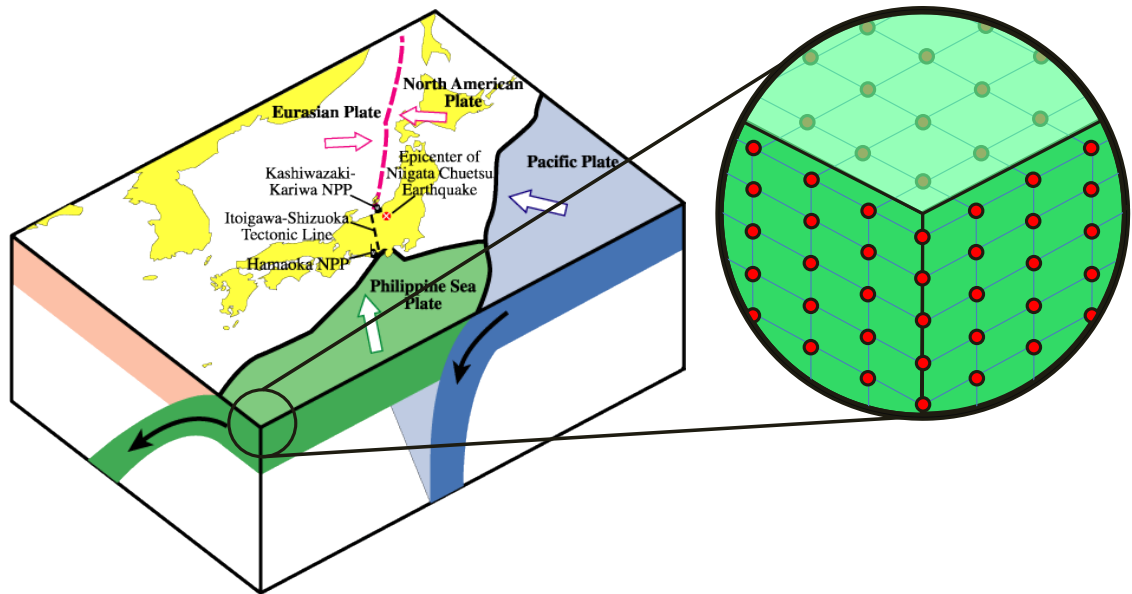


Figura 2.6: Ubicación de hipocentros en base de datos Japonesa.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2.6 los puntos rojos representan la ubicación espacial de los escenarios modelados en la base de datos de Japón, en cada uno de estos puntos han sido simulados eventos de 4 magnitudes distintas (M_w 6.2, M_w 6.8, M_w 7.4 y M_w 8.0). La base de datos cuenta con 6 distintas profundidades del hipocentro (0 Km, 20 Km, 40 Km, 60 Km, 80 Km y 100 Km).

2.4.2. Estructura de la base de datos de Chile

La configuración de la base de datos de Chile es totalmente distinta a la de Japón. Los escenarios no se encuentran equidistantes entre sí, para una misma coordenada (latitud, longitud), sólo existe un escenario, los escenarios no están uniformemente distribuidos en cuanto a la profundidad hipocentral. La base de datos para el Sistema Integrado de Predicción y Alerta de Tsunamis fue realizada en el estudio “Desarrollo de una base de datos de fuentes

tsunamigenicas para Chile” de *Riquelme and Mocanu* (2015). En este estudio se determinó que para generar una base de datos que caracterizará todos los posibles eventos que pueden presentarse en la zona de contacto entre la placa de Nazca y Sudamericana, se requerían 7656 escenarios, repartidos por todo el territorio nacional. Este estudio entregó los parámetros de las zonas de rupturas y ubicaciones de todos los escenarios para la base de datos de SIPAT. Una representación gráfica de la ubicación de los hipocentros de los sismos utilizados en SIPAT se observa en la Figura 2.7.

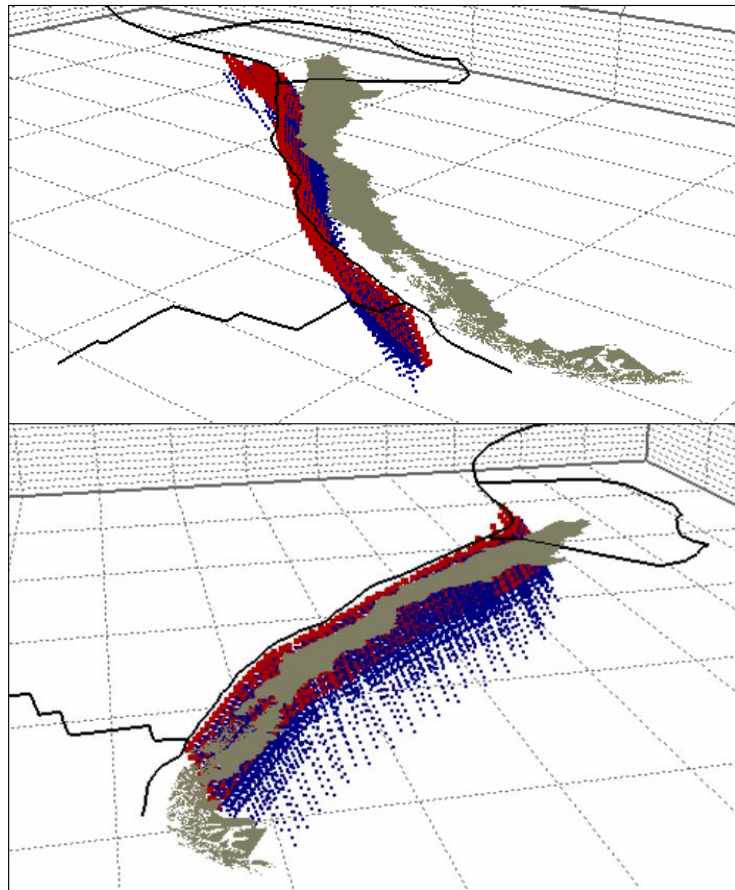


Figura 2.7: Ubicación de hipocentros en SIPAT.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.7 los puntos de color rojo corresponden a los escenarios de magnitud $M_w7.0$, $M_w7.5$, $M_w8.0$ y $M_w8.5$, mientras que los puntos de color azul corresponden a los hipocentros de magnitud 9.0 y 9.5. La utilización de esta base de datos es debido a la definición bien marcada de la zona sismogénica en Chile, en la cual los sismos son generados en el plano de contacto entre las placas sudamericana y de nazca. Es por esto que los escenarios se encuentran ubicados exactamente en dicho plano (*Hayes et al.*, 2012).

2.4.3. Propuesta de un metodo de interpolación aplicable a la base de datos Chilena

En Chile el sistema consulta a la base de datos sin considerar la profundidad, debido a la ubicación de los escenarios en un único plano (plano de contacto entre placas tectónicas) que condiciona la ocurrencia de eventos a este plano. Esto hace imposible una interpolación por profundidad como la realizada por Japón, por lo que se propondrá un método de interpolación solamente basado en la magnitud.

Para la validación de la ecuación de interpolación se realizará una interpolación por magnitud entre los dos escenarios más cercanos (método de interpolación Japonés). El escenario más cercano de la magnitud inmediatamente mayor e inmediatamente menor. Los valores obtenidos se contrastarán con la amplitud máxima de tsunami de un evento real modelado.

Como método adicional y considerando que en países como Japón se utiliza el método de máximo riesgo para sismos generados en la cercanía de la costa (caso de Chile), se realizará un análisis por curvas de amplitud máxima de tsunami interpolando entre las alturas obtenidas por el método del máximo riesgo. Para esto se considerara una diferencia de magnitud $\Delta Mw = 0.3$ fija, como lo recomienda *Mueller et al. (2015)*. Esto quiere decir que para cualquier magnitud del terremoto, al momento de generar el pronóstico se consultará a la base de datos con la magnitud equivalente, igual a: $Mw + \Delta Mw$, donde ΔMw sera 0.3. Las ecuaciones a utilizar serán las 2.4.3 y 2.4.5, al igual que en Japón.

Un esquema del funcionamiento del método de interpolación propuesto se presenta en la Figura 2.8, en dicha imagen se muestran dos ejemplos de dos magnitudes de sismos distintas ($Mw=7.0$ y $Mw7.9$).

2.4.4. Modelación numérica de escenarios para la validación

Para la validación se realizará una modelación numérica de un evento tipo Talinay 2015 (Mw=8.4), Iquique 2014 (Mw=8.2) y Maule 2010 (Mw=8.8). Con sus respectivas magnitudes reales y se contrastarán las amplitudes máximas en los FPs interpolando entre las magnitudes superior e inferior de los dos escenarios mas cercanos extraídos de la base de datos, esto se realizará solamente para la validación de las ecuaciones 2.4.3 y 2.4.5.

Para realizar la modelación numérica de estos eventos, a su magnitud real, es necesario extraer la ley de escalamiento con la que se generó la base de datos para SIPAT, las cuales son distintas a las propuestas por *Papazachos et al.* (2004). Estas leyes de escalamiento se presentan a continuación:

$$\log_{10}(L) = -1.804 + 0.5 * M_w \quad (2.4.6)$$

$$\log_{10}(W) = -2.357 + 0.5 * M_w \quad (2.4.7)$$

$$\log_{10}(S) = -3.398 + 0.5275 * M_w \quad (2.4.8)$$

Donde L corresponde al largo del área de ruptura en kilómetros, W al ancho en kilómetros, y S el deslizamiento uniforme de la zona de falla en metros (*Riquelme and Mocanu, 2015*).

Finalmente, para poder caracterizar el área de ruptura, se utilizarán los mismos parámetros de la zona cercana al epicentro de estos eventos (datos extraídos desde la base de datos). Éstos parámetros se muestran en la Tabla 2.6 .

Tabla 2.6: Parámetros para la modelación de escenarios reales.

Parámetro	Maule 2010	Iquique 2014	Talinay 2015
Magnitud	8.8	8.4	8.2
L [km]	397.66	250.81	199.19
W [km]	112.44	70.88	56.28
Slip [m]	17.54	10.79	8.46
Strike (Rumbo θ)	9.3	9	354.7
Dip (Manteo δ)	20	20	20
Rake (Angulo de deslizamiento λ)	90	90	90

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta un resumen de los resultados obtenidos para este trabajo. En una primera parte, se presenta el análisis de sensibilidad por curvas de excedencia de amplitud máxima de tsunami (CEAMT) para el método del máximo riesgo, el cual considera la evaluación de distintas áreas de incertidumbre para SIPAT. Contrastando dicha evaluación con los umbrales de altura alcanzado en los registros de los mareógrafos para eventos históricos como Talinay 2015 ($M_w=8.4$), Iquique 2014 ($M_w=8.2$) y Maule 2010 ($M_w=8.8$). En segunda instancia, se presenta como se ajusta el método de interpolación a la base de datos de Chile y como este afecta a la evaluación del riesgo a nivel País.

Finalmente y considerando la ocurrencia del reciente terremoto en Melinka 2016 ($M_w=7.6$), se analizará como se modifica el pronóstico de alerta para el territorio nacional al aplicar el método de interpolación para este evento.

3.1. Resultados y validación de las áreas de incertidumbre para el método de máximo riesgo

Para la realización de este trabajo, tuvo gran relevancia la creación de un algoritmo que replicara los criterios de selección de SIPAT, realizado en MATLAB, el cual debe funcionar en forma paralela a SIPAT sin alterar su normal funcionamiento. Este algoritmo fue probado y calibrado para eventos históricos como Talinay 2015 (Mw=8.4), Iquique 2014 (Mw=8.2) y Maule 2010 (Mw=8.8). comprobándose que generaba los mismos resultados (amplitud máxima de tsunami y niveles de alerta) en cada punto de pronóstico.

Los resultados de este análisis serán de gran utilidad para dar una visión general del comportamiento de SIPAT ante la reducción del área de incertidumbre del método de máximo riesgo. Estos resultados permitirán seleccionar un área de incertidumbre adecuada, considerando que actualmente SIPAT se encuentra funcionando bajo un proceso conservativo.

La cantidad de eventos analizados se basa en la buena disponibilidad de datos que se tiene para los tres terremotos anteriormente mencionados, lo que permite realizar una validación adecuada de los resultados.

Para el evento de Maule de 2010, se tiene que el registro de la variación de nivel del mar en Talcahuano, no es fidedigna, debido a que esta estación fue arrasada por la segunda onda de tsunami, pero de igual forma se sabe que las consecuencias del tsunami en esta ciudad fueron devastadoras, por lo que el nivel de riesgo debe ser el más alto posible (Alarma de tsunami).

Los resultados de las CEAMT se muestran en las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, donde el eje de las abscisas representa el número de orden de los puntos de pronóstico de cada bloque y el eje de las ordenadas amplitud máxima de tsunami. El fondo de los gráficos esta coloreado según los cuatro estados de alerta utilizados por el SHOA: alarma (rojo, amplitud máxima mayor a 3 m), alerta (naranja, amplitud máxima entre 1 y 3 m), precauciones (amarillo, amplitud máxima entre 0.3 y 1 m) e informativo (verde, amplitud máxima menor a 0.3 m). Dentro de las gráficas se presenta en forma de texto los niveles alcanzados por los mareógrafos pertenecientes a cada uno de los bloques, estos niveles se presentan con líneas punteadas en los gráficos, cuando el rango alturas que alcanzan los FPs así lo permite.

Las dimensiones geométricas del área de Ruptura y la cantidad de escenarios se presentan en la sección 2.3.1. Las CEAMT para el evento de Talinay 2015 se muestran en la Figura 3.1 para la zona norte, en la Figura 3.2 para la zona central, en la Figura 3.3 para la zona sur y finalmente en la Figura 3.4 para la zona antártica e insular. En estas figuras se muestran cinco conjuntos de líneas, las líneas negras representan las amplitudes máximas de tsunami en los puntos de pronóstico para el área de incertidumbre de $2L$ por $2W$, en color azul para $1.5L$ por W , en color rojo para L por W , el color magenta para $0.5L$ por W y finalmente en color verde para $0.5L$ por $0.5W$.

A pesar de que el área de búsqueda es distinta para todas las curvas, éstas algunas veces son coincidentes, pero en general se observa como se reducen al disminuir el área de búsqueda. Esta reducción del área de búsqueda se traduce en un cambio en el nivel de alerta para ciertos bloques. Esto puede observarse en la Figura 3.2, en la cual, para el Bío Bío (bloque 11) existen tres puntos de pronóstico por sobre el umbral de alarma (altura mayor a 3 metros), y al reducir el área de incertidumbre, se observa como todas las curvas quedan por debajo de dicho umbral por lo que se cambiaría a un estado de alerta (altura entre 1 a 3 metros), generando un cambio en la decisión del estado alerta. También se observa un cambio en el nivel de alerta para Atacama Norte (bloque 5).

Resultados semejantes se observan para los otros dos eventos (Maule 2010 y Iquique 2014), donde algunos bloques reducen sus niveles de riesgo, al reducir el área de incertidumbre. Las CEAMT para estos eventos se encuentran en el Anexo A.

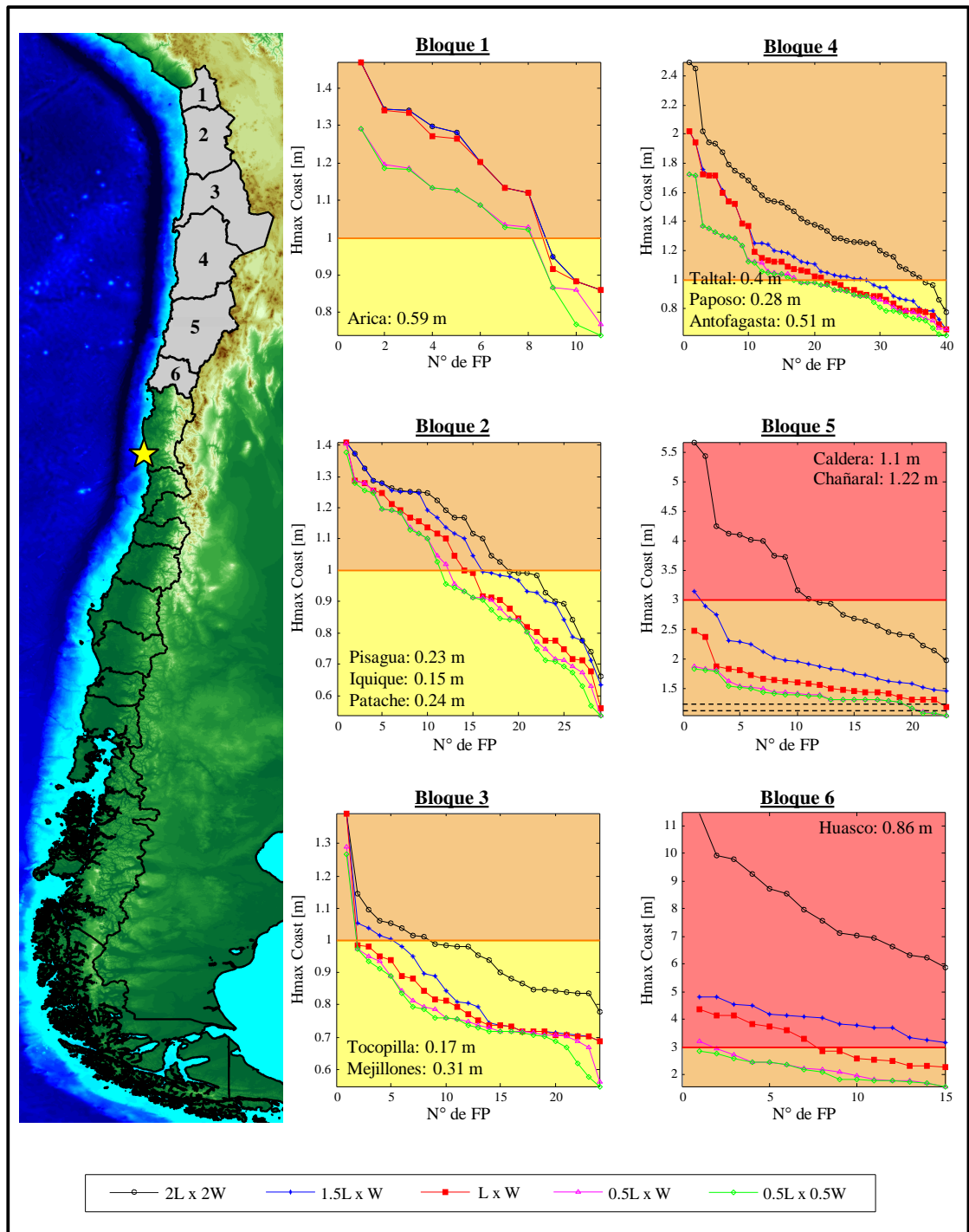


Figura 3.1: CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

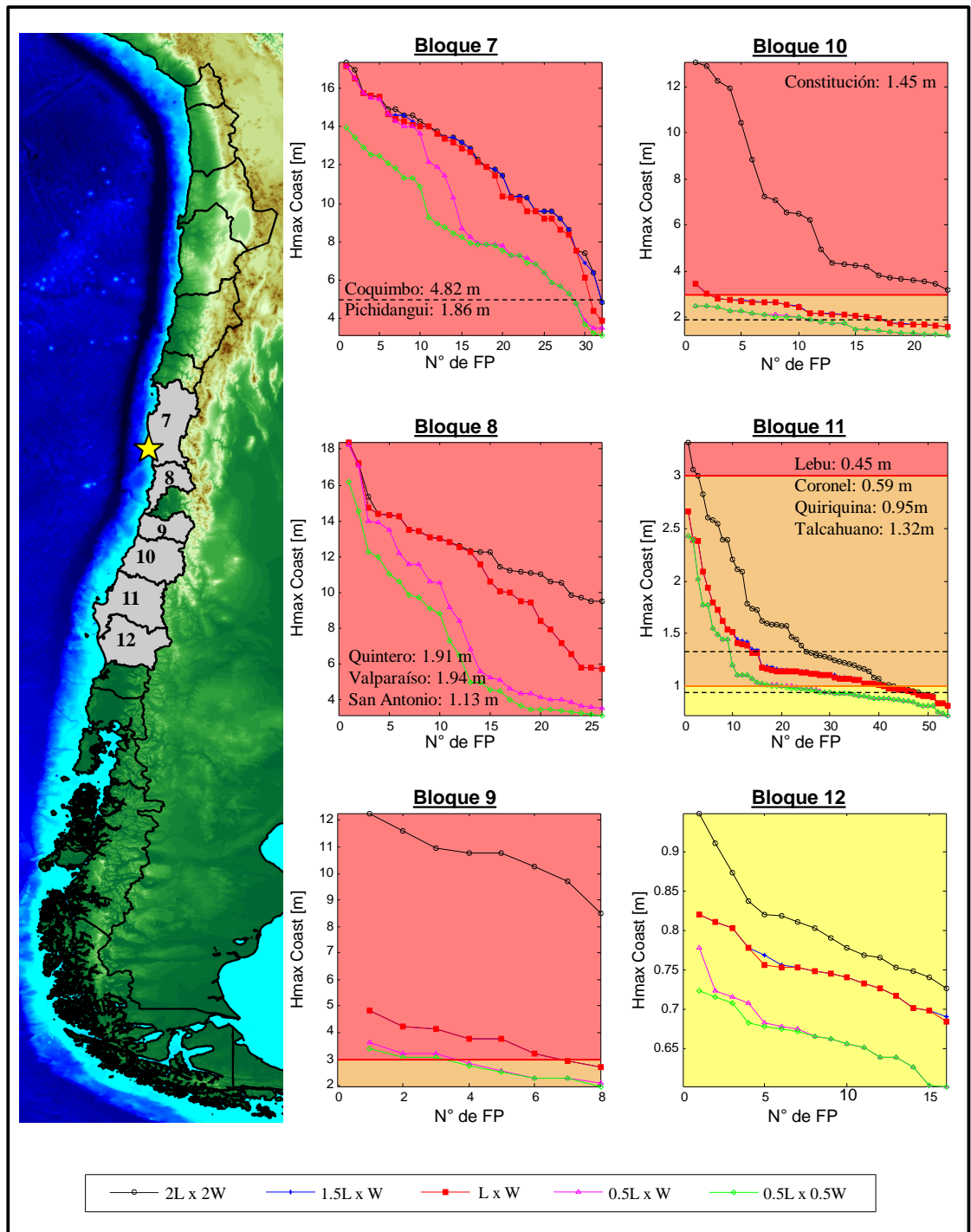


Figura 3.2: CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona centro.
Fuente: Elaboración propia.

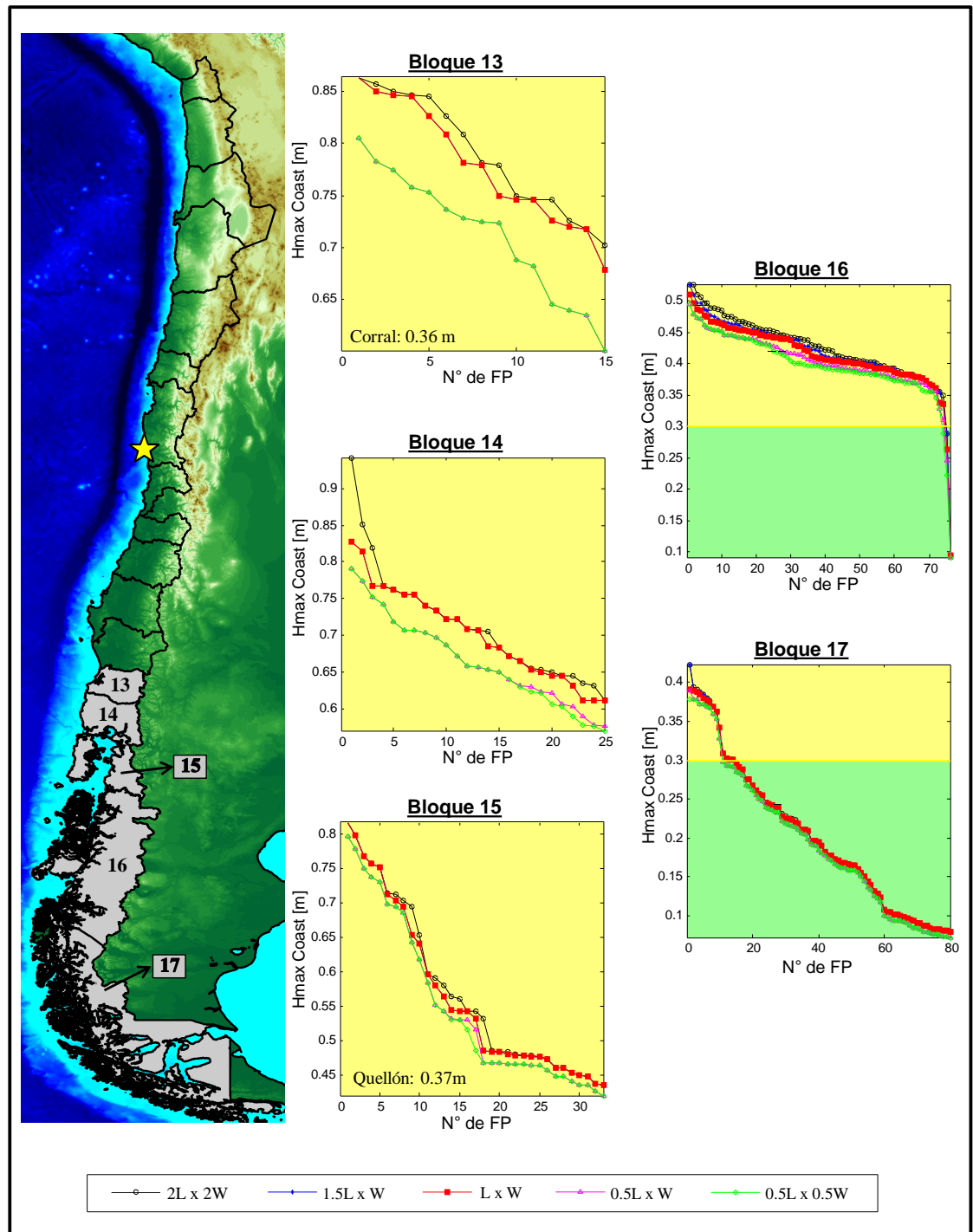


Figura 3.3: CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

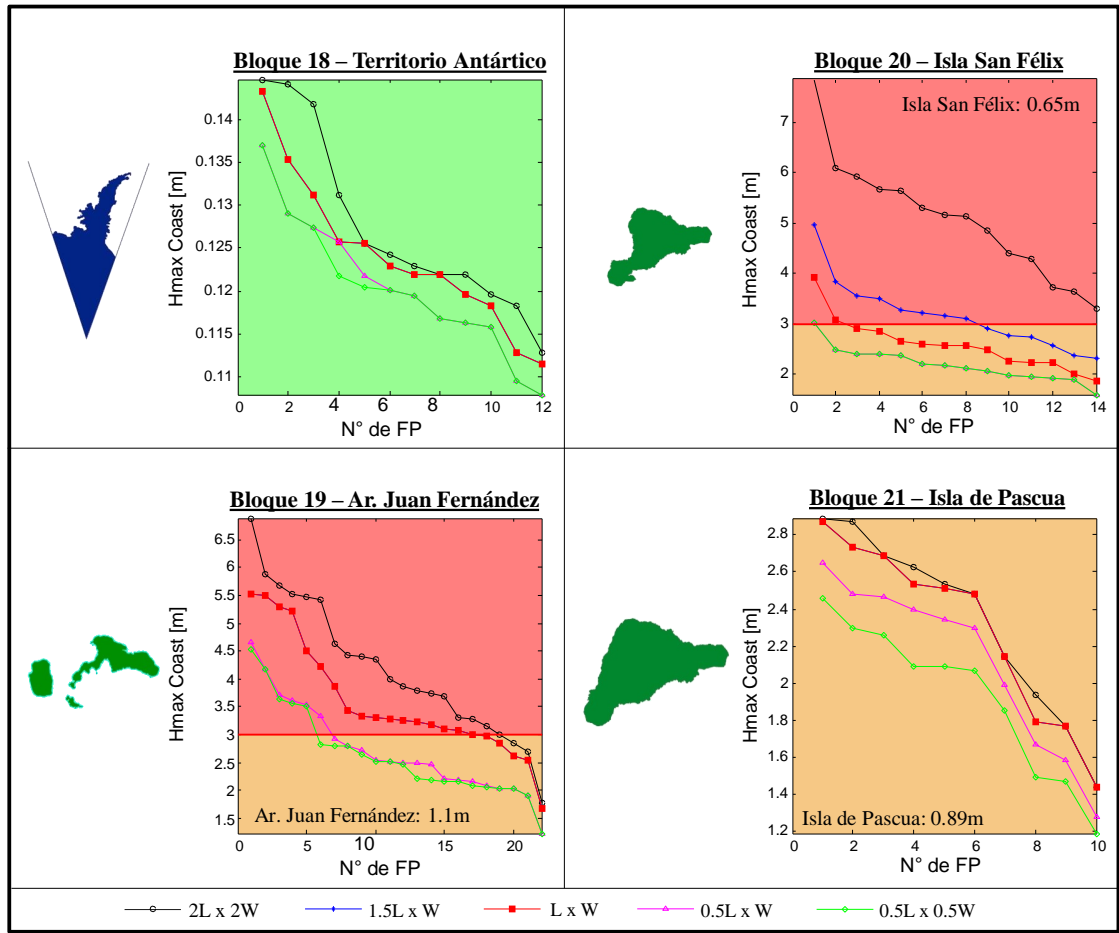


Figura 3.4: CEAMT para evento de Talinay 2015, bloques de la zona insular.
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, se muestran las alturas de los FPs para cada bloque territorial. En ellas también se observa que las alturas pronosticadas por SIPAT están por sobre las alturas registradas por las estaciones de nivel de mar (para todas las áreas de incertidumbre). Esto es lo deseable y esperable debido a que SIPAT es un sistema de alerta temprana que genera estados de riesgo de forma conservativa (considerando los peores escenarios). Por lo tanto, se puede considerar una reducción del área de incertidumbre, que se traducirá en una reducción de la cantidad de bloques en estado de riesgo, pero sin generar subestimaciones de las amplitudes de tsunami.

3.2. Validación del método de interpolación

Para realizar la validación de la Ecuación 2.4.3 (ecuación de interpolación), se modelan los sismos históricos con sus parámetros reales (ver Tabla 2.6) y las amplitudes generadas con estos sismos serán comparadas con las amplitudes generadas por el método de interpolación mediante curvas de amplitud máxima de tsunami en la costa.

Para la validación se aplica la Ecuación 2.4.3 a los dos escenarios más cercanos de magnitud superior e inferior presentes en la base de datos, con la finalidad de obtener la curva de amplitud máxima interpolada y comparar esta curva con la generada por el escenario modelado.

En la Figura 3.5 se presentan todos los escenarios que se encuentran dentro del área de incertidumbre de L por W (área utilizada actualmente debido a las recomendaciones de este trabajo), para los tres terremotos históricos. De color verde se representan los escenarios de magnitud inmediatamente superior, y de color rojo los inmediatamente inferior. Estos escenarios fueron obtenidos de la base de datos, y para realizar la validación de la ecuación de interpolación solo se tomarán los dos escenarios de distinta magnitud más cercanos al epicentro.

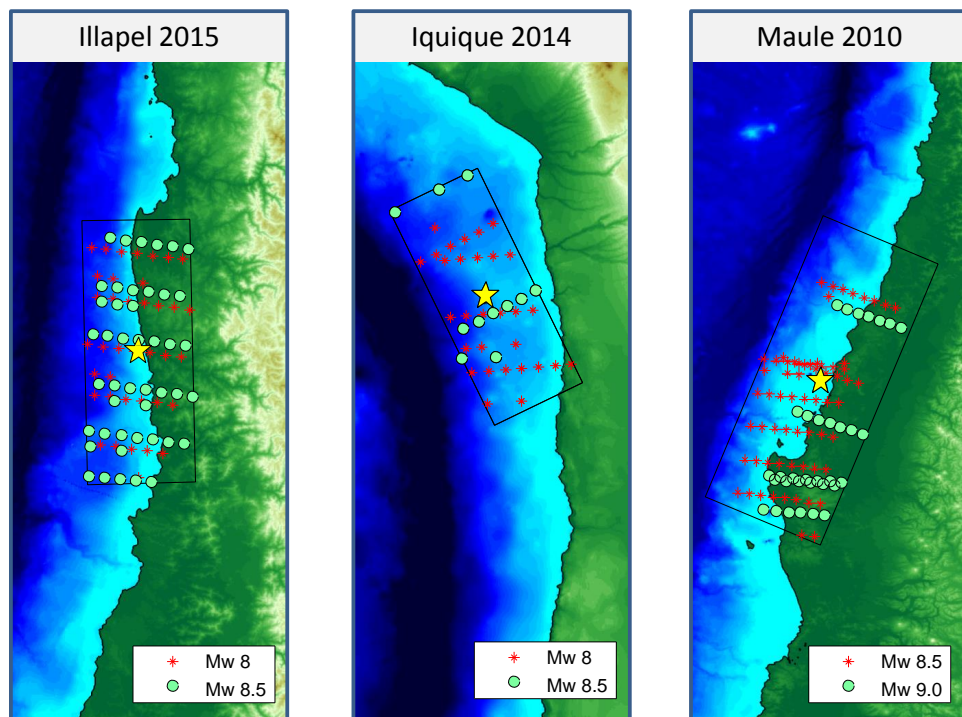


Figura 3.5: Nuevos escenarios candidatos para la aplicación del método de interpolación.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la validación se muestran en la Figura 3.6, donde se se han graficado las curvas de amplitud máxima en la costa. El eje de las abscisas representa la altura en los FPs, el eje de las ordenadas representa la ubicación latitudinal de los puntos de pronóstico. En color negro se observan las curvas de los dos escenarios más cercanos (utilizados como base para realizar la interpolación), de color verde se muestra la amplitud de tsunami interpolada y en color magenta se representa la amplitud de tsunami modelada con los parámetros de la reales de la Tabla 2.6.

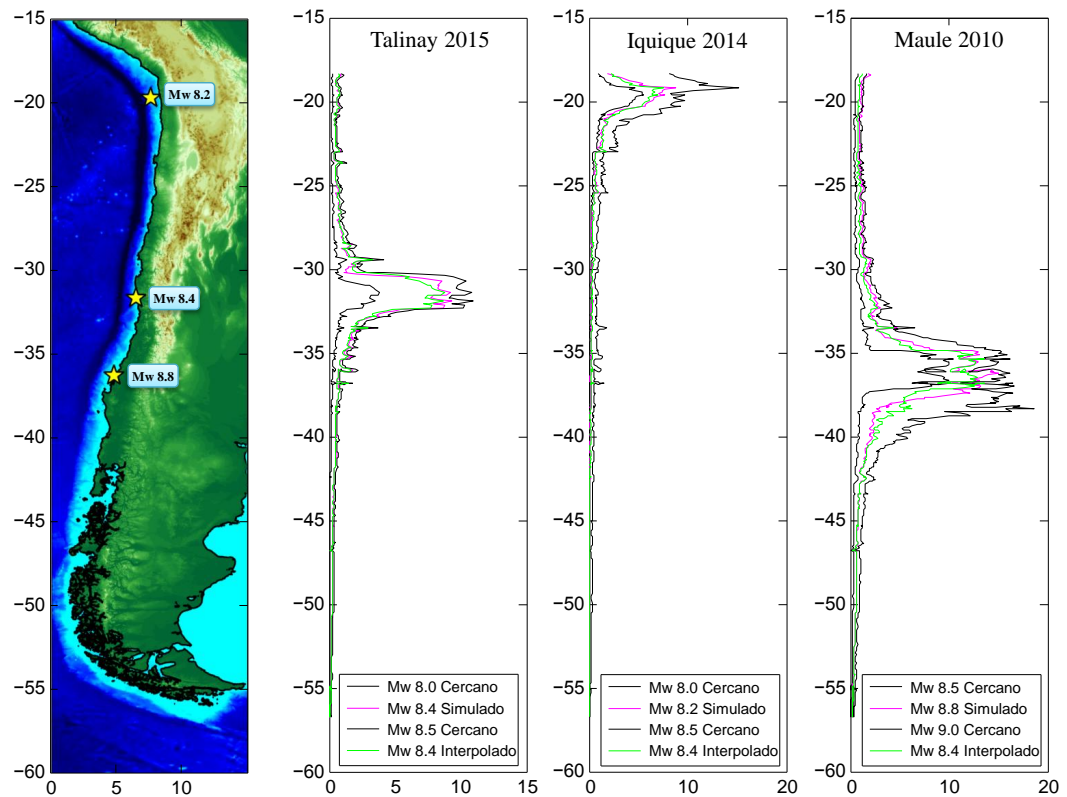


Figura 3.6: Validación de la ecuación de interpolación.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la validación representados en la Figura 3.6, muestran el buen ajuste de las curvas de amplitud máxima interpoladas y la real (simulada). Con esto queda demostrado que la ecuación es apropiada para reproducir las alturas de un evento de magnitud intermedia. No obstante, es necesario diseñar un procedimiento para ajustar el proceso de estimación vigente e incluir este método.

3.3. Interpolación propuesta para SIPAT

Como se desea que SIPAT sea un sistema de alerta temprana que entregue una evaluación del riesgo de forma conservadora, sin generar subestimaciones del peligro, se propone utilizar la ecuación de interpolación posterior a la aplicación del método de máximo riesgo y así considerar la incertidumbre de la ubicación del epicentro relativa al área de ruptura. Conforme a la recomendación de *Mueller et al. (2015)*. Es decir aplicar una diferencia de magnitud igual a $\Delta Mw = 0.3$ para considerar la incertidumbre relativa a la distribución de deslizamientos.

Para realizar esto, se obtiene la amplitud máxima de tsunami posterior a la aplicación del método de máximo riesgo para las dos magnitudes más cercanas a la magnitud equivalente igual a $Mw + \Delta Mw$. A estas amplitudes se les aplica la Ecuación 2.4.3, para obtener la altura de tsunami para la magnitud $Mw + \Delta Mw$. En la Figura 3.7 se presentan las curvas de amplitud máxima de tsunami posterior a la aplicación del método de máximo riesgo. En color negro se observan las dos curvas de amplitud máxima para las magnitudes presentes en la base de datos, y de color verde se presenta la curva de alturas interpolada a la magnitud de $Mw + \Delta Mw$.

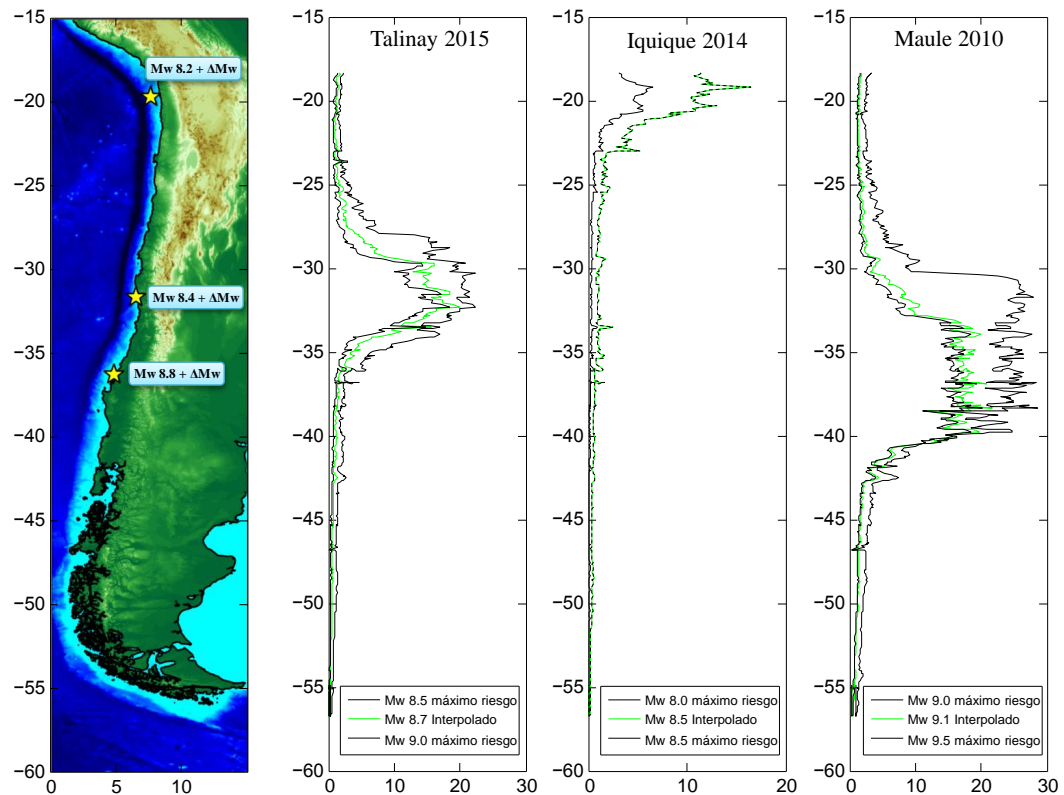


Figura 3.7: Curvas de amplitud máxima de tsunami para metodo de interpolación propuesto. Fuente: Elaboración propia.

En Figura 3.7 se puede observar como las curvas de color negro (magnitudes en base de datos) forman una envolvente superior e inferior a las alturas obtenidas por la ecuación de interpolación. De igual manera se puede observar como coinciden las curvas cuando en valor a interpolar ($Mw + \Delta Mw$) es idéntico a alguna magnitud presente en la base de datos, como ocurre para el evento de Iquique 2014.

A las alturas obtenidas por la ecuación de interpolación se les aplica los criterios de estados de alerta, generándose el pronóstico para el país. Los resultados de los estados de alerta a nivel país para el evento de Talinay 2015 se presentan en la figura 3.8.

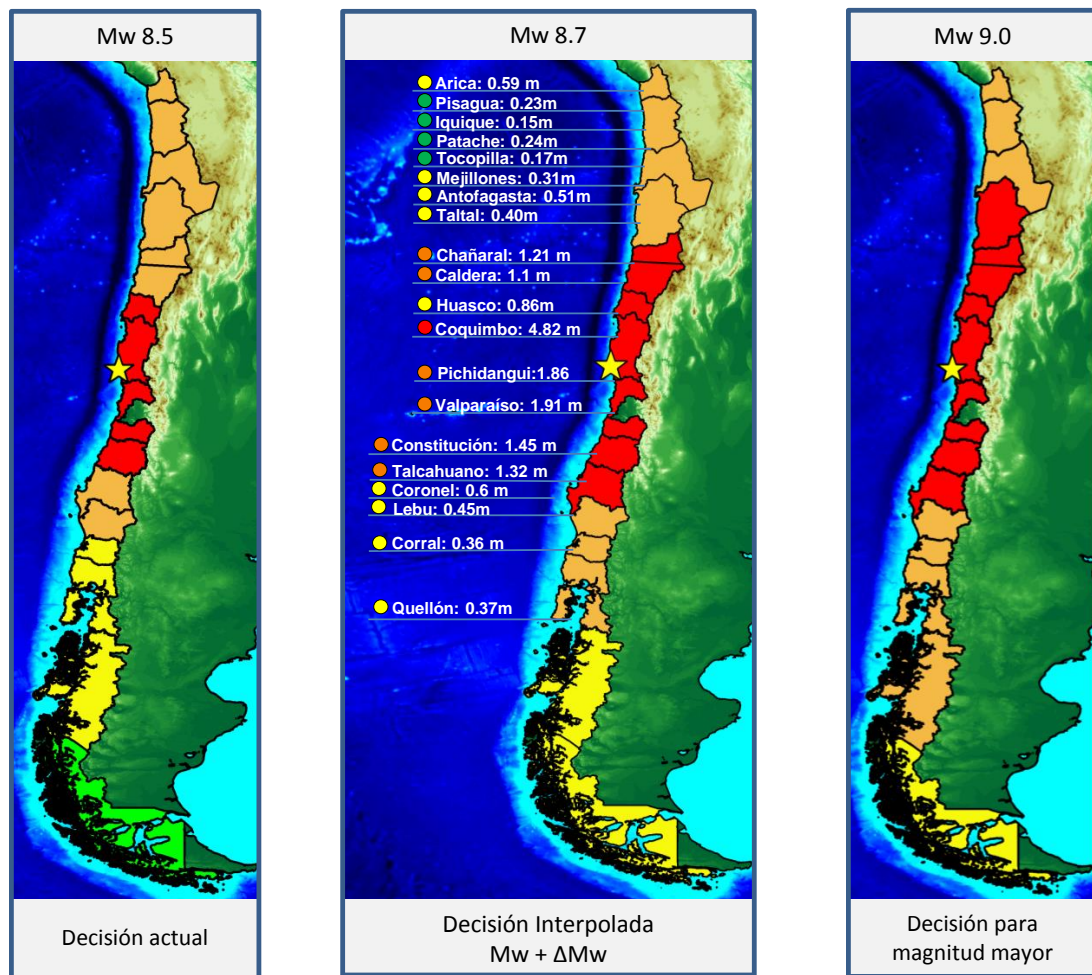


Figura 3.8: Decisión final a nivel país para evento tipo Talinay 2015, aplicando método de interpolación con $\Delta Mw = 0.3$.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.8 se observan los resultados de los niveles de alerta en el territorio continental para un evento tipo Talinay 2015 ($M_w=8.4$) (los bloques se encuentran pintados según su nivel de alerta como se indica en la Tabla 1.2). Al centro se muestra el estado de alerta generado para la magnitud interpolada considerando $\Delta M_w = 0.3$, además de los valores de alturas medidos por los mareógrafos con sus respectivos niveles de alerta (círculos de colores). Al lado izquierdo y derecho se presenta el pronóstico que se genera con la magnitud inferior y superior respectivamente, de los escenarios presente en la base de datos. Estas imágenes es solo referencial y corresponde al nivel de alerta que se genera con los escenarios de la magnitud menor y mayor que son utilizados para la interpolación.

En la figura 3.9 se observan los resultados de los niveles de alerta para un evento tipo Maule 2010 ($M_w=8.8$), el formato utilizado es el mismo de la Figura 3.8.

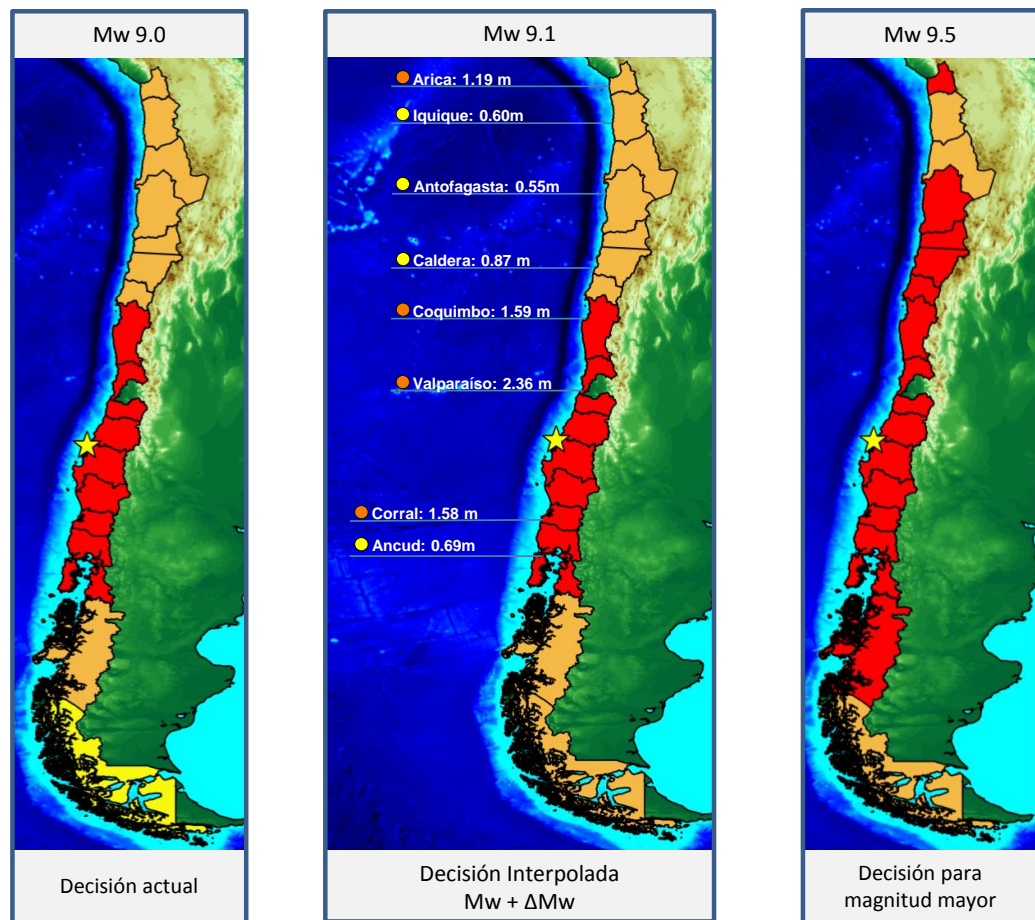


Figura 3.9: Decisión final a nivel país para evento tipo Maule 2010, aplicando método de interpolación con $\Delta M_w = 0.3$.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 3.8 y 3.9 se observa que, al igual que en las gráficas de amplitud de tsunami (Figuras 3.6 y 3.7), el nivel de alerta arroja valores intermedios a los de las magnitudes utilizadas para realizar la interpolación. Este es el comportamiento buscado al aplicar el método de interpolación, el cual nos permite obtener niveles de alerta diferenciados para cada magnitud de terremoto.

Al realizar la interpolación para un evento tipo Iquique 2014 cuya magnitud real fue de $M_w=8.2$, se buscará interpolar a la magnitud $M_w + \Delta M_w$, con lo que se obtiene magnitud representativa de $M_w=8.5$, coincidente con una de las magnitudes presentes en la base de datos, por lo que no tiene sentido aplicar la ecuación de interpolación ya que la altura se reduce a la obtenida directamente de los escenarios de magnitud 8.5 presentes en la base de datos. Así la decisión actual coincide con la del método de interpolación.

3.3.1. Análisis de evento reciente (Terremoto de Melinka 2016)

Debido al reciente terremoto de magnitud 7.6 ocurrido el domingo 25 de diciembre de 2016 cercano a la localidad de Melinka en la región de Aysén, es que por primera vez se ha activado SIPAT y sus protocolos de evacuación.

Como este terremoto es la primera experiencia operacional de SIPAT, es de interés analizar el comportamiento del método de interpolación para este evento. Puntualmente se analizará en cambio en el pronóstico del riesgo generado el por sistema actual en contraste con el generado por el método de interpolación.

Los parámetros preliminares informados por el CSN fueron la ubicación del epicentro (latitud: -43.514 y longitud: -74.382), y magnitud de 7.6. Con esto se genera el pronóstico de peligro que se informó a la población ese día y se contrasta con el generado por el método de interpolación. Dicho análisis se muestra en la Figura 3.10.

A la derecha de la Figura 3.10 se muestra la decisión actual generada por SIPAT (idéntica a la que fue entregada por autoridades el día del sismo), al centro se presenta la nueva decisión generada por medio del método de interpolación, mientras que a la izquierda se presenta la decisión que generan los escenarios de menor magnitud presentes en la base de datos y que fueron utilizados para realizar la interpolación.

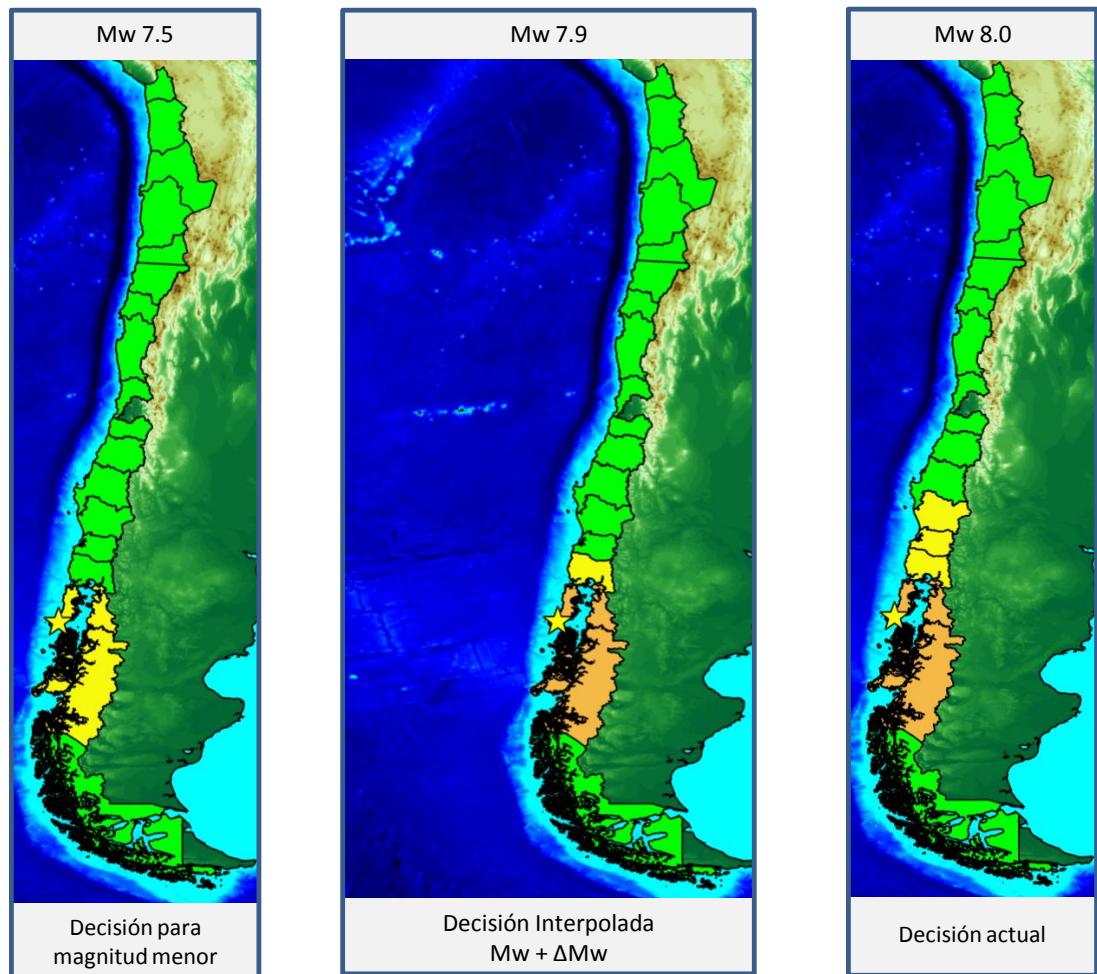


Figura 3.10: Decisión final a nivel país para evento tipo Melinka 2016, aplicando método de interpolación con $\Delta Mw = 0.3$.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.10 se observa que para la magnitud interpolada se reduce el nivel de alerta en comparación con el criterio de selección actual de SIPAT. De igual manera se observa cómo se genera un nivel de alerta intermedio entre los escenarios de magnitud mayor y menor utilizados para realizar la interpolación.

El nivel de alerta generado con el método de interpolación se ajusta de mejor manera a lo observado aquel día, ya que solamente se registro un aumento del nivel del mar de aproximadamente un metro en la estación Melinka (tsunami menor).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este trabajo se realizó un análisis que permite cuantificar la variabilidad en la estimación del peligro por tsunami para los eventos de campo cercano, donde la incertidumbre es incluida mediante el cálculo de un gran número de escenarios dada información sísmica de bajo nivel (M_w y Ubicación del epicentro). Específicamente, la metodología aborda la incertidumbre en la localización del epicentro relativa a la zona de ruptura y la incertidumbre relativa a la distribución del deslizamiento en el área de ruptura.

Se demuestra que hay una variabilidad moderada en las estimaciones de la amplitud de tsunami en los puntos de predicción, para distintas áreas de incertidumbre, lo cual se traduce en una variabilidad moderada en los niveles de alerta, lo que se resume en las curvas de probabilidad de excedencia.

Otros centros de alertas de tsunamis del mundo, como por ejemplo la JMA, abordan la incertidumbre de la localización del epicentro relativa a la zona de ruptura mediante la definición de un dominio de interrogación más pequeño que SIPAT, ya que consideran un área de incertidumbre igual al área de la zona de ruptura estimada (dimensiones L por W), y luego usan el peor caso para generar la toma de decisión, al igual que SIPAT.

En esta sección se analizará la estimación del peligro por tsunami para todos los bloques continentales, con la finalidad de observar de manera reducida la información entregada por las CEAMT. En segunda instancia se comenta sobre los resultados obtenidos con el método de interpolación y su implementación computacional.

En la Figura 4.1 se puede observar la decisión final a nivel país (territorio continental), para las distintas áreas de incertidumbre evaluadas en la Sección 3.1. Los colores de los bloques representan sus estados de alerta, además se incluyen las amplitudes máximas de tsunami registrada por los mareógrafos, con sus respectivos niveles de alerta (círculos de colores). En esta gráfica se puede ver como se reduce en nivel de alerta al reducir el área de incertidumbre.

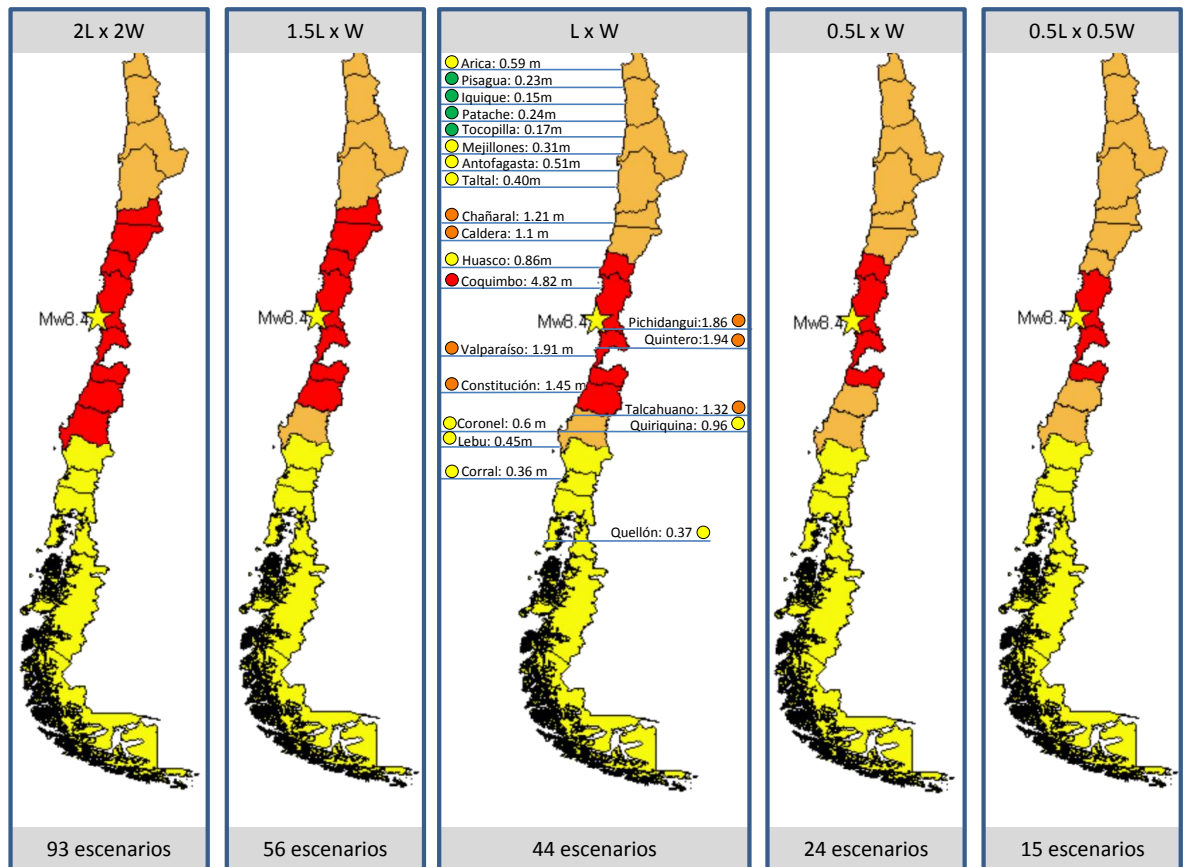


Figura 4.1: Decisión final a nivel país para evento tipo Talinay 2015.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.1 se observa que todas las áreas de incertidumbre generan un nivel de riesgo mayor al registrado por los instrumentos, por lo que sería tentador escoger la menor área de incertidumbre. Pero, con áreas muy pequeñas, se corre el riesgo de considerar muy pocos escenarios candidatos o incluso no encontrarlos lo que generaría una falla del sistema. Esto último se puede observar en la Figura 4.2 donde se muestra los niveles de riesgo para un evento tipo Maule 2010, en el cual se tiene que, para un área de incertidumbre de 0.5L por 0.5W, existe solamente un candidato.

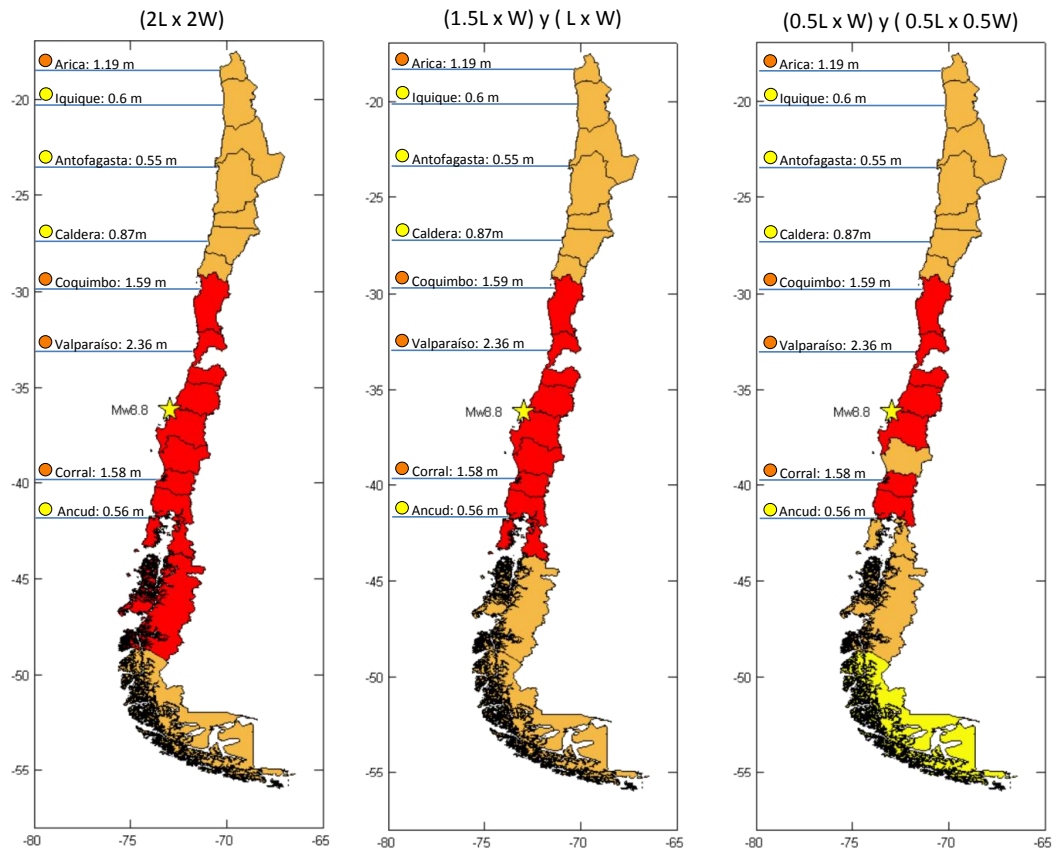


Figura 4.2: Decisión final a nivel país para evento tipo Maule 2010.
Fuente: Elaboración propia.

Considerando que para áreas de incertidumbre muy pequeñas se puede estar considerando un pronóstico con una baja cantidad de escenarios candidatos, se descarta la opción de áreas pequeñas como 0.5L por 0.5W y 0.5L por W. Sin embargo, áreas muy grandes como la actualmente utilizada genera mayor sobrestimación de los niveles de riesgo, debido a la gran extensión territorial del área de incertidumbre (alrededor 900 km de largo por 250 km de ancho para un evento tipo Maule 2010), lo que estaría seleccionando epicentros muy lejanos al epicentro real. Considerando todo esto, se recomienda un área de incertidumbre moderada coincidente con la utilizada por la JMA e igual a L por W.

Aún reduciendo el área de incertidumbre del método de máximo riesgo a L por W, se sigue sobrestimando los niveles de alerta, pero cabe destacar que este tipo de sistemas de alerta temprana deben ser conservadores a la hora de evaluar el riesgo, ya que no poseen la capacidad reevaluar los estados de peligro considerando mediciones en tiempo real.

Con respecto al método de interpolación se tiene que para eventos tipo Maule 2010 y Talinay 2015, se estaría aumentando en nivel de alerta respecto al método actual (ver figuras 4.1 y 4.2), mientras que para un evento tipo Iquique 2014 se mantendría exactamente en mismo nivel de alerta. Pero para un evento tipo Melinka 2016 el nivel de alerta disminuiría.

En resumen se podría decir que el método de interpolación genera aumentos y disminución de los niveles de riesgo de tsunami, dependiendo de la magnitud real del sismo, su ubicación dentro de la discretización de magnitudes en la base de datos, y de la magnitud equivalente $Mw + \Delta Mw$ cuyo parámetro fundamental ΔMw fue considerado constante e igual a 0,3.

La utilización de un $\Delta Mw = 0.3$ para realizar la interpolación proviene de la recomendación de *Mueller et al.* (2015), el cual realizó una equivalencia de áreas de inundación con escenarios de deslizamiento uniforme en contraste un deslizamiento real (no uniforme). El análisis realizado por *Mueller et al.* (2015) es para las costas de Nueva Zelanda, por lo que sería recomendable realizar un estudio similar por modelos de deslizamiento estocásticos en el área de ruptura para ajustar el parámetro ΔMw a lo que realmente ocurre en las costas de Chile.

Pese a esta falta de claridad, el método de interpolación es una ventajosa herramienta que permitirá diferenciar los niveles de riesgo de todas las magnitudes posibles, ya que el parámetro de calibración fundamental es la magnitud equivalente, que depende del ΔMw que se considere. El parámetro ΔMw es fácil de modificar, lo que entrega una forma flexible de calibrar el método de interpolación según los niveles de riesgo realmente alcanzados por los registros.

La Figura 4.3 muestra la implementación computacional del método de interpolación en SIPAT, donde el color de fondo naranja muestra en diagrama de funcionamiento de los criterios de selección actuales en SIPAT, mientras que el de color celeste es el criterio de selección de escenarios utilizando el método de interpolación.

Es importante recalcar que este que el método de interpolación no afecta al procesamiento de datos en la etapa de simulación ni al filtro Hazcat, filtro que obtiene las alturas máximas de las series de tiempo en cada punto de pronóstico para cada escenario simulado en la base de datos. Por lo que la implementación operacional es de bajo costo computacional.

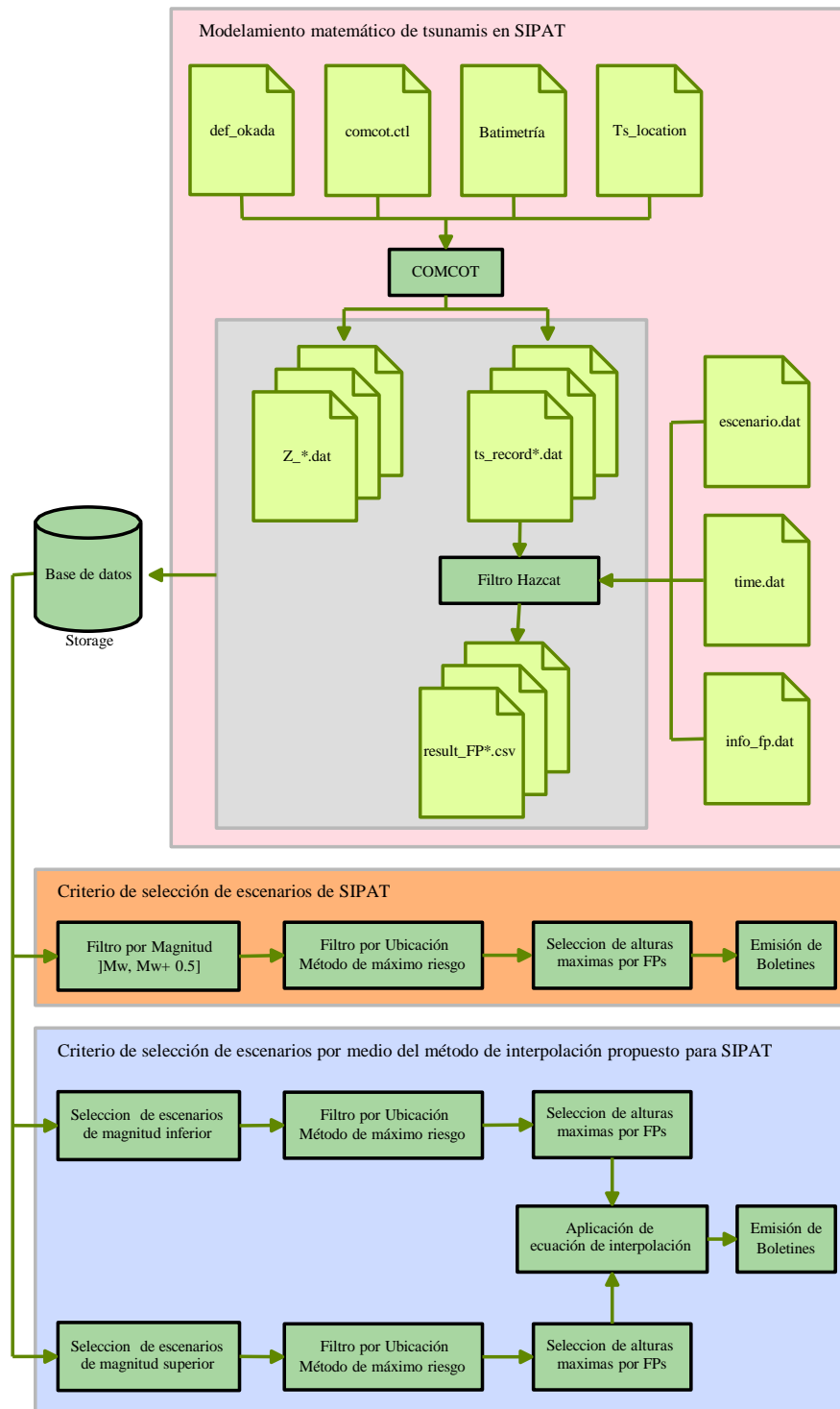


Figura 4.3: Implementación operacional de la metodología de interpolación en SIPAT.
Fuente: Elaboración propia.

Las CEAMT generadas a partir de todos los escenarios disponibles en SIPAT se contrastaron para distintas áreas de incertidumbre del método de máximo riesgo. Llegándose a la conclusión de que el método de máximo riesgo es muy sensible a las dimensiones del área de incertidumbre, donde áreas muy grandes tienden a sobreestimar el peligro, sobre todo en zonas más alejadas del epicentro. Mientras que áreas muy pequeñas podrían correr el riesgo de evaluar el peligro con muy pocos escenarios, lo cual no es recomendable ya que se tendría poco factor de seguridad ante el manejo de la incertidumbre. Para una evaluación del peligro de tsunami, se encontró que las CEAMT generadas a partir del área de incertidumbre L por W son las más adecuadas para la evaluación.

Por último, como trabajo futuro y con el objetivo de mejorar aún más los resultados, es recomendable migrar a un sistema de interpolación para la magnitud del sismo, ya que el actual criterio de selección de escenarios por magnitud, está generando sobreestimaciones y subestimaciones de la amplitud máxima del tsunami, dependiendo de la ubicación de la magnitud real del sismo dentro de la discretización de magnitudes de la base de datos. El método de interpolación es una herramienta que permitirá aplicar un criterio homogéneo para todas las magnitudes.

CONCLUSIONES

Uno de los objetivos principales de este trabajo, ha sido generar una metodología que permita realizar un análisis de sensibilidad de las áreas de incertidumbre utilizadas en el método de máximo riesgo de SIPAT (incertidumbre relativa a la ubicación del epicentro en la zona de ruptura). Este análisis se realizó por medio de las curva de excedencia de amplitud máxima de tsunami, en las cuales se pudo observar que la altura máxima en los puntos de pronóstico es moderadamente sensible a la variación de las áreas de incertidumbre, lo cual se traduce en una variabilidad moderada en los niveles de alerta. Donde áreas de búsqueda muy grandes tienden a sobreestimar el peligro. Debido a la gran extensión territorial de la zona de generación. Mientras, que áreas muy pequeñas podrían correr el riesgo de evaluar el peligro con muy pocos escenarios, lo cual no es recomendable.

Para una evaluación del peligro de tsunami, se encontró que las CEAMT generadas a partir del área de incertidumbre L por W son las más adecuadas para la evaluación (misma área de incertidumbre utilizada por JMA), la cual reduce las sobreestimaciones de los niveles de alerta actuales.

El segundo objetivo principal fue el establecimiento de una metodología de interpolación para magnitudes de sismos que no estén presentes en la base de datos, esto se realizó utilizando el método de interpolación de la JMA, con la diferenciación de que esta interpolación fue realizada solo por magnitud y no por profundidad, dado que SIPAT no tiene como parámetro preliminar de consulta la profundidad del hipocentro y la estructura de su base de datos no permite utilizarla.

Se validó la ecuación comparando los resultados de la interpolación con tres terremotos simulados, llegándose a un buen ajuste de las amplitudes máximas en los puntos de pronóstico, lo que genera una buena caracterización de las alturas y niveles de alerta.

Finalmente como forma de considerar la incertidumbre relativa a la distribución deslizamiento no uniforme en área de ruptura, se consideró una magnitud equivalente igual a $Mw + \Delta Mw$, donde ΔMw fue considerado igual a 0.3, según las recomendaciones de *Mueller et al.* (2015).

La consideración de ΔMw igual a 0.3, genera sobreestimaciones de los niveles de alerta, por lo que sería recomendable realizar un estudio por modelos de deslizamiento estocásticos en el área de ruptura para ajustar el parámetro ΔMw . Este es un parámetro fácil modificar, lo que entrega un parámetro confiable y flexible para calibrar el sistema.

CURVAS DE EXCEDENCIA DE AMPLITUD MÁXIMA DE TSUNAMI

En este anexo, se presenta los resultados de las Curvas de Excedencia de Amplitud Máxima de Tsunami, para los eventos de Iquique 2014 y Maule 2010. Este trabajo, se desarrolló con el fin de estudiar la sensibilidad de la reducción del área de incertidumbre en el Método de Máximo Riesgo. Las imágenes presentadas a continuación corresponden a las CEAMT de todos los bloques territoriales.

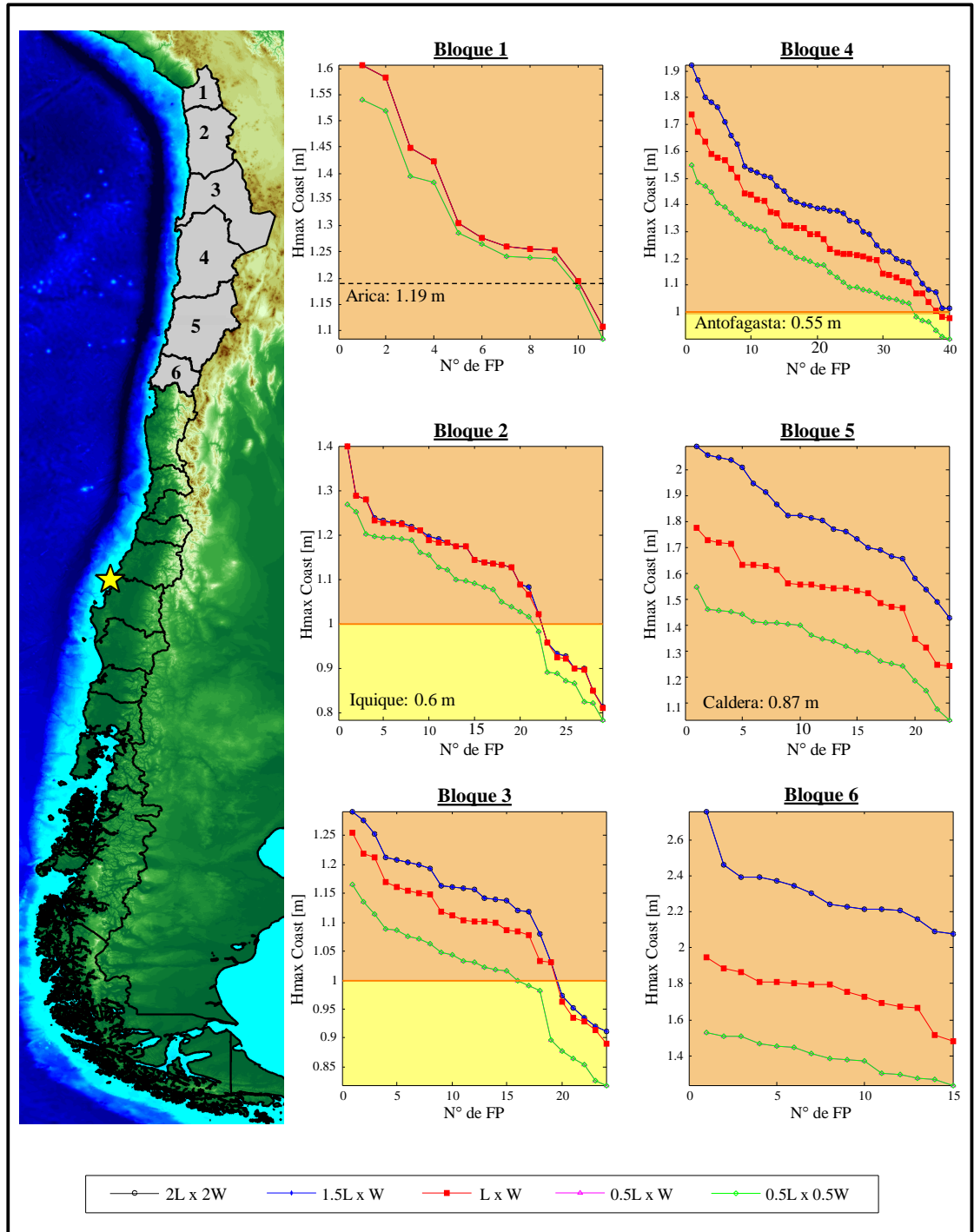


Figura A.1: CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

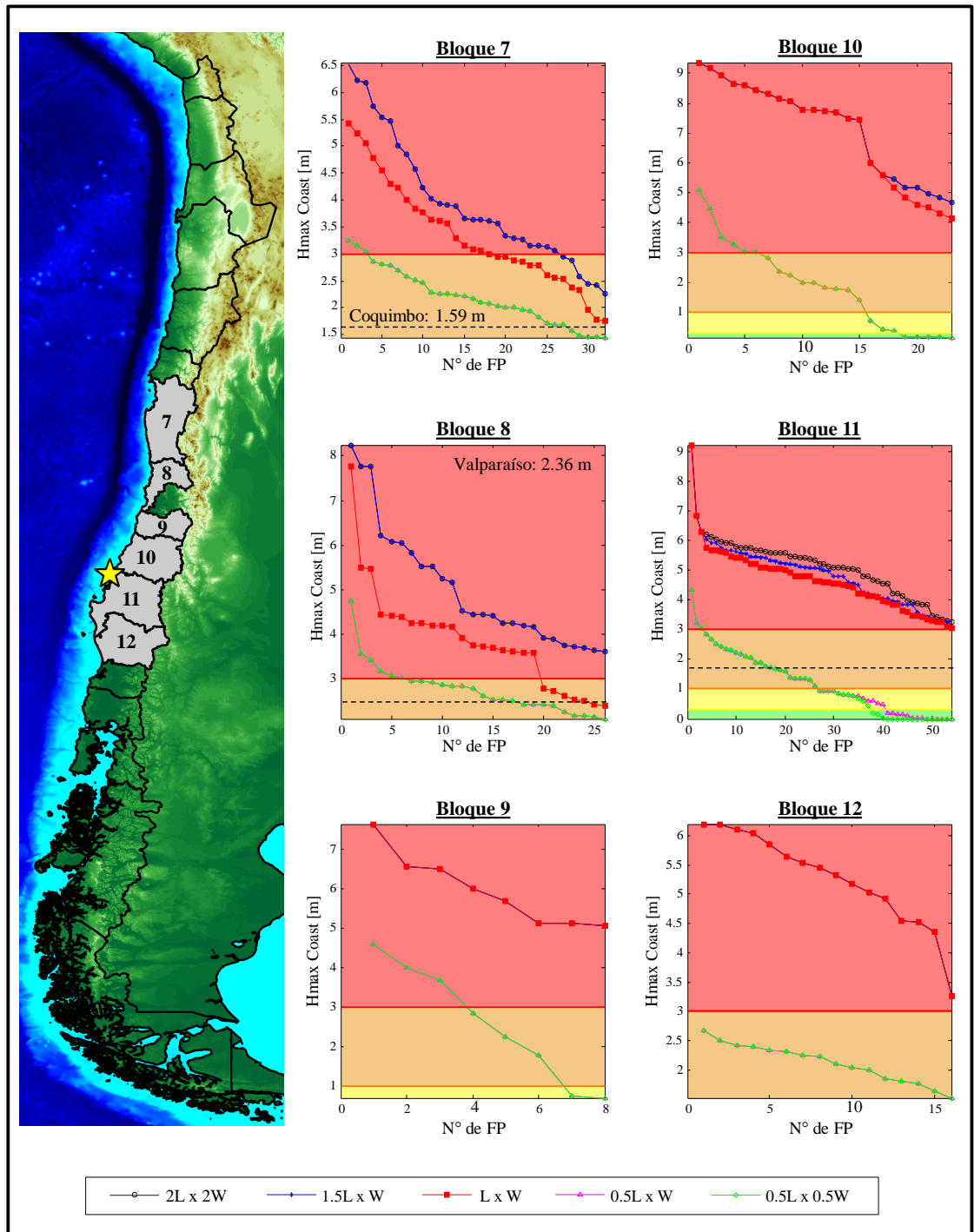


Figura A.2: CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona centro.
Fuente: Elaboración propia.

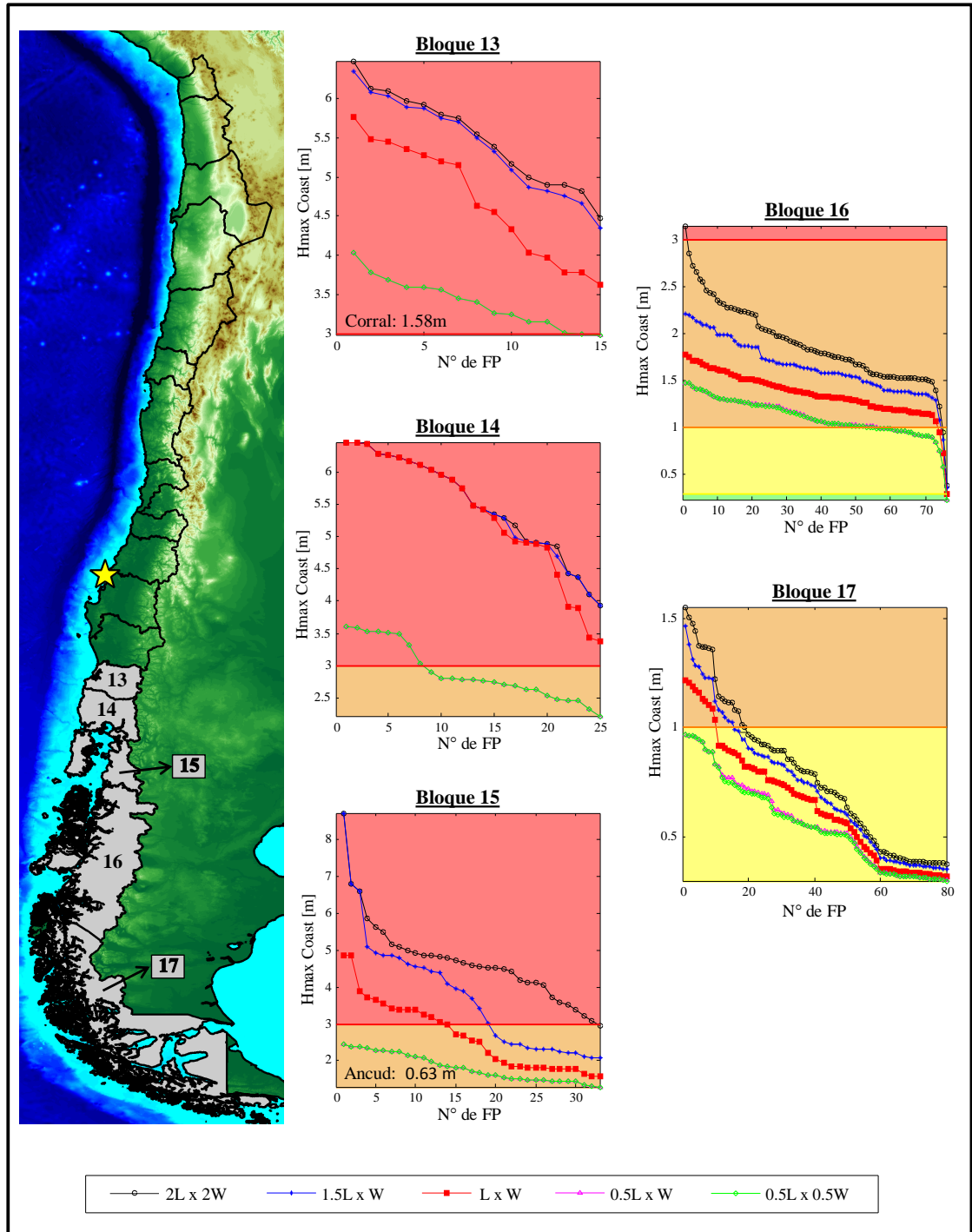


Figura A.3: CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

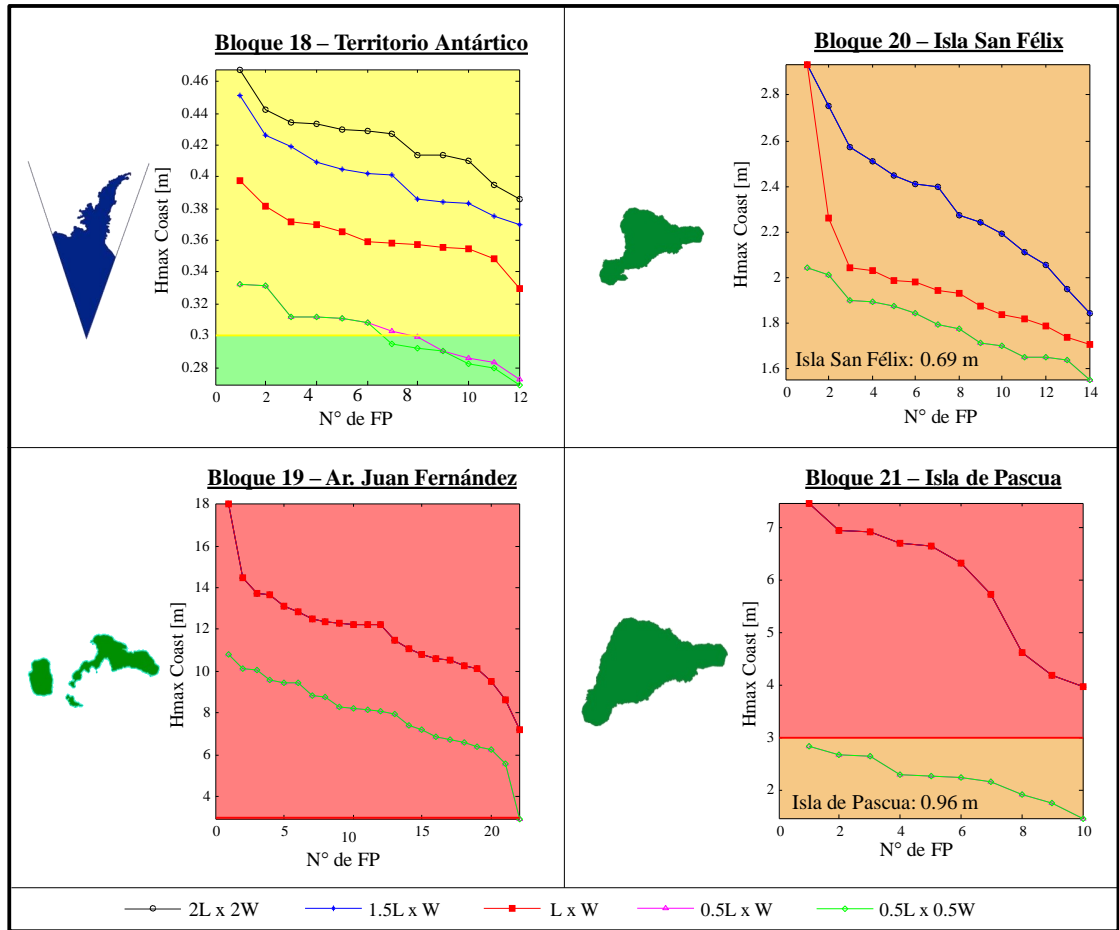


Figura A.4: CEAMT para evento de Maule 2010, bloques de la zona insular.
 Fuente: Elaboración propia.

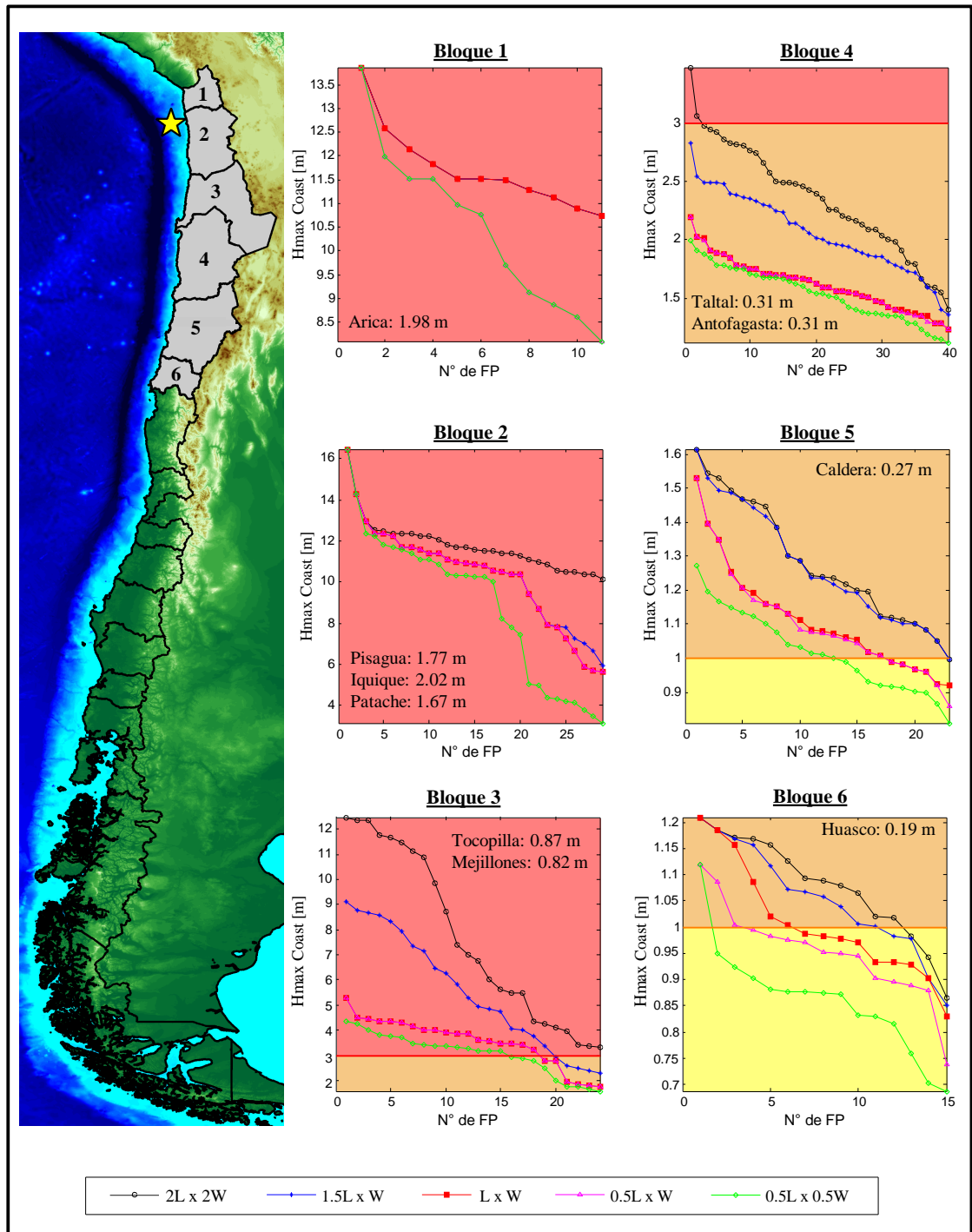


Figura A.5: CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona norte.
Fuente: Elaboración propia.

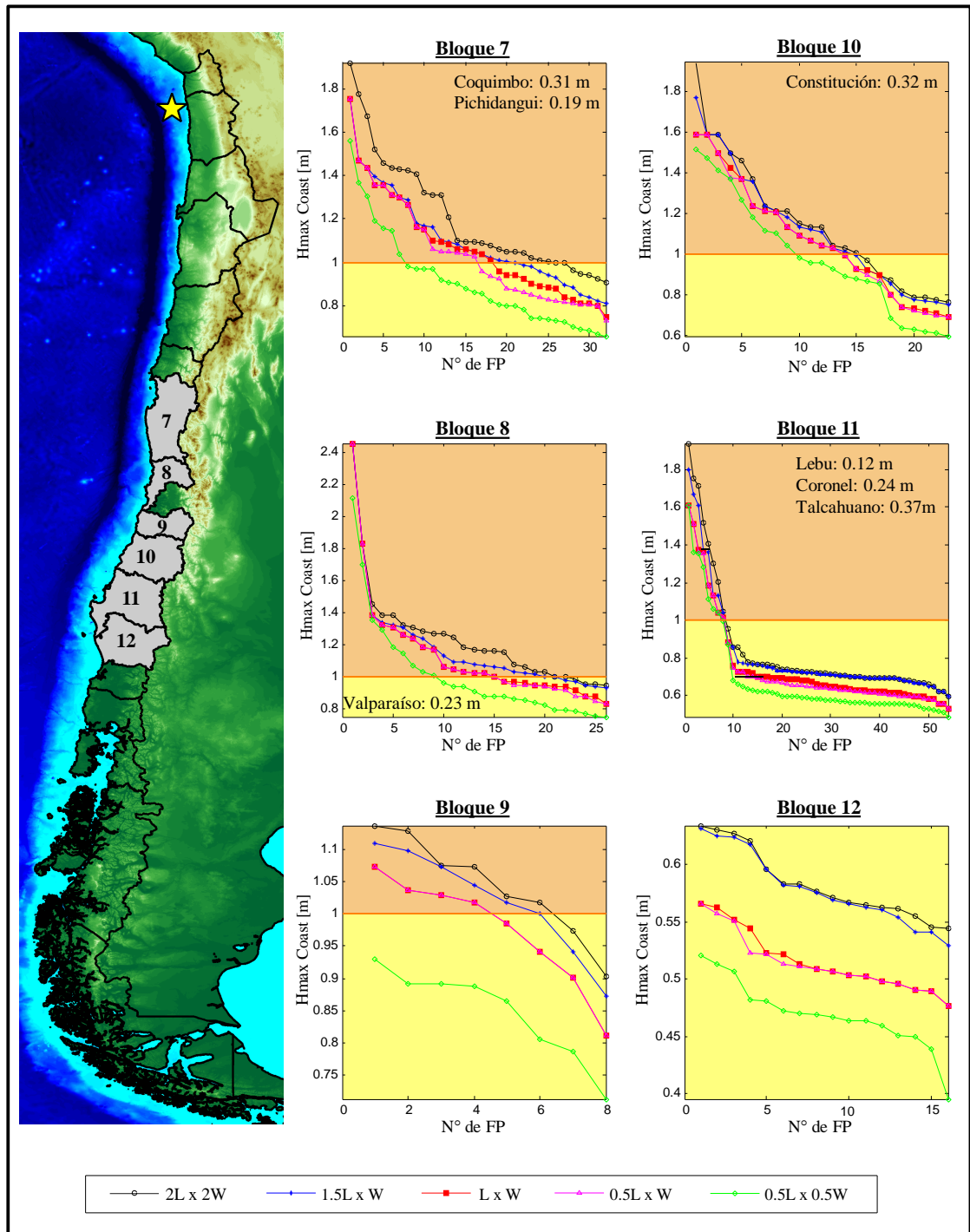


Figura A.6: CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona centro.
Fuente: Elaboración propia.

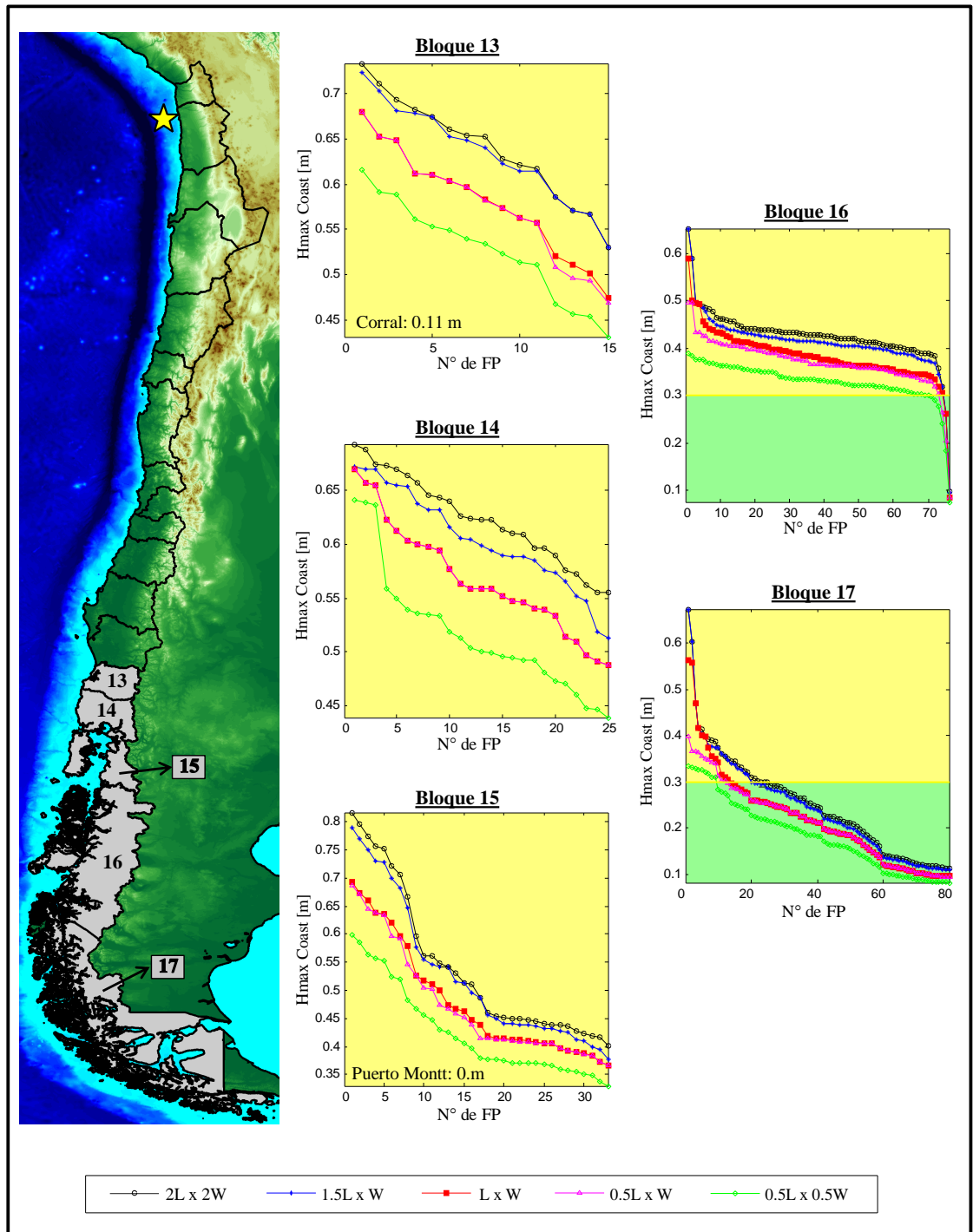


Figura A.7: CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona sur.
Fuente: Elaboración propia.

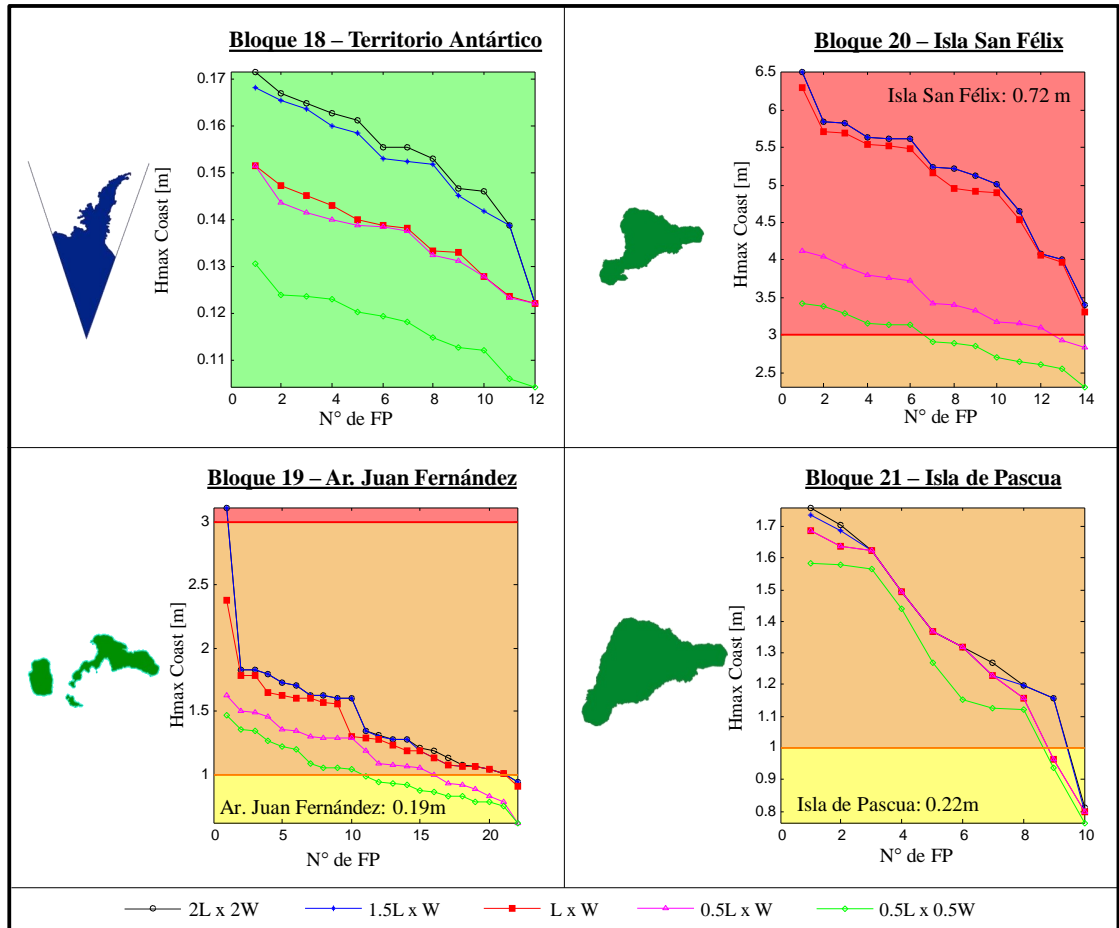


Figura A.8: CEAMT para evento de Iquique 2014, bloques de la zona insular.
Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- Catalán, P., j. Cañas, L. Pizarro, A. Gubler, C. Valdés, S. Miranda, and S. Flores (2015a), Diseño e implementación de una base de datos de predicción de tsunamis para la costa chilena utilizando modelación computacional de alto rendimiento, *Tech. Rep. D11i1119*, FONDEF.
- Catalán, P., J. Cañas, C. Zuñiga, C. Zelaya, A. Gubler, L. Pizarro, C. Valdés, and S. Miranda (2015b), Sistema integrado de predicción y alerta de tsunamis (sipat)., *XII Congreso Chileno de Hidráulica*.
- Gubler, A. (2016), Evaluación probabilística del peligro de tsunami de eventos de campo cercano, Master's thesis, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Hayes, G. P., D. J. Wald, and R. L. Johnson (2012), Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1), n/a–n/a, doi:10.1029/2011JB008524, b01302.
- JMA (2013), Quantitative tsunami forecast technology in japan meteorological agency.
- Kajiura, K. (1972), The directivity of energy radiation of the tsunami generated in the vicinity of a continental shelf, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 28(6), 260–277, doi: 10.5928/kaiyou1942.28.260.
- Moernaut, J., M. V. Daele, K. Heirman, K. Fontijn, M. Strasser, M. Pino, R. Urrutia, and M. De Batist (2014), Lacustrine turbidites as a tool for quantitative earthquake reconstruction: New evidence for a variable rupture mode in south central chile, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1607–1633, doi:10.1002/2013JB010738, 2013JB010738.
- Moreno, M. S., J. Bolte, J. Klotz, and D. Melnick (2009), Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 chile earthquake, *Geophysical Research Letters*, 36(16), n/a–n/a, doi:10.1029/2009GL039276, 116310.
- Mueller, C., W. Power, S. Fraser, and X. Wang (2015), Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example,

Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(1), 488–502, doi:10.1002/2014JB011301, 2014JB011301.

Okada, Y. (1985), Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135–1154.

Papazachos, B., E. Scordilis, D. Panagiotopoulos, C. Papazachos, and G. Karakaisis (2004), Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36, 1482–1486.

Riquelme, S., and M. Mocanu (2015), Desarrollo de una base de datos de fuentes tsunamigénicas para Chile, *Tech. rep.*, Universidad de Chile.

Vigny, C., A. Socquet, S. Peyrat, J.-C. Ruegg, M. Métois, R. Madariaga, S. Morvan, M. Lancieri, R. Lacassin, J. Campos, D. Carrizo, M. Bejar-Pizarro, S. Barrientos, R. Armijo, C. Aranda, M.-C. Valderas-Bermejo, I. Ortega, F. Bondoux, S. Baize, H. Lyon-Caen, A. Pavez, J. P. Vilotte, M. Bevis, B. Brooks, R. Smalley, H. Parra, J.-C. Baez, M. Blanco, S. Cimbaro, and E. Kendrick (2011), The 2010 mw 8.8 maule megathrust earthquake of central Chile, monitored by GPS, *Science*, 332(6036), 1417–1421, doi:10.1126/science.1204132.

Wang, X., W. Power, and G. S. N. Staff (2011), *COMCOT: A Tsunami Generation Propagation and Run-Up Model*, GNS Science report, GNS Science.