



Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales

INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

EVALUACIÓN DE RIESGO DE TSUNAMI EN QUINTERO, CHILE

Patricio Winckler Grez, Javier Vásquez Álvarez

DOC ICO 01-2008

Presentado en el XVII Congreso Chileno de Hidráulica, 2005, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica
Publicado en los Anales del Instituto de Ingeniería de Chile. Vol 120 No 1, abril 2008: 1-12 (ISSN 0716-2340). En revista chilena de ingeniería (ISSN 0370-4009). No 453, abril 2008

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

EVALUACION DE RIESGO DE TSUNAMI EN QUINTERO, CHILE¹

PATRICIO WINCKLER GREZ²
JAVIER VASQUEZ ALVAREZ³

RESUMEN

La intensa actividad portuaria y las crecientes presiones de desarrollo experimentadas en la bahía de Quintero han motivado efectuar una evaluación del riesgo de inundación por tsunamis y proponer medidas de mitigación para disminuir sus consecuencias en la comunidad costera. Para estimar la inundación se utiliza el programa TUNAMI-N (IUGG/IOC, 1997), que resuelve la generación, propagación y run-up de tsunamis de campo cercano, utilizando las ecuaciones de la teoría de onda larga para aguas poco profundas. Se investigan los tsunamis del 8/Jul/1730, del 16/Ago/1906 y del 5/Mar/1985 y los resultados se presentan mediante una Carta de Inundación por Tsunamis y diagramas de campos de velocidades. Se concluye que la inundación es altamente dependiente del momento sísmico del terremoto generador. En sectores de la bahía se registran alturas de 8 m y velocidades de 8 m/s durante un tsunami potencialmente destructivo (1730) en tanto que no superan los 2 m y 1 m/s para un tsunami menor (1906 y 1985). Se presentan medidas de protección para las instalaciones costeras afectas al riesgo de inundación por tsunami y se propone efectuar una campaña de educación a la comunidad en el marco de una planificación urbana en el largo plazo. La utilización sistemática de la metodología propuesta en otras localidades permitirá complementar los estudios de microzonificación sísmica efectuados a la fecha en nuestro país.

¹ El texto completo en español e inglés está disponible en formato pdf. Solicitar a patricio.winckler@uv.cl.

² Profesor Auxiliar, Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Naturales. Universidad de Valparaíso

³ Ingeniero Civil MSc - PRDW Aldunate Vásquez

1. INTRODUCCION

Este documento presenta los lineamientos teóricos y prácticos para determinar el riesgo de tsunami asociado a un terremoto de campo cercano en la Bahía de Quintero (Figura 1), en la V Región de nuestro país. La creciente actividad portuaria en la bahía, sumada a la presencia de una población de alrededor de 25.000 personas e industrias como la Fundición y Refinería de Enami, el Puerto de Ventanas, los Terminales Marítimos Oxiquim y la Central Termoeléctrica de Ventanas, han promovido el estudio, cuyo objetivo es proponer medidas de mitigación para el riesgo de tsunami tanto en la ciudad de Quintero como en las instalaciones mencionadas.

El término tsunami corresponde a una serie de ondas oceánicas de considerable longitud generada por una perturbación a gran escala en el océano. El vocablo japonés “tsunami” corresponde a una palabra compuesta por los caracteres *tsu*, que simboliza puerto y *nami*, cuyo significado es ola. Se estima que un 60% de los casos se localizan en la cuenca del Pacífico, 20% en el Indico, 9% en el Mediterráneo y 9% en el Atlántico Norte. Durante el siglo XX, se registraron unas 50.000 víctimas en alrededor de 500 tsunamis, en tanto que la cifra de muertos por efecto del tsunami del 26/Dic/2004 se estima en 300.000 personas. Desde 1562, más de 30 tsunamis de campo cercano han asolado las costas de Chile, produciendo incluso la devastación de ciudades como Arica en 1604 y Concepción en 1751 (Godoy y Monge, 1975).



FIGURA 1.- BAHÍA DE QUINTERO (SAF N°2224)

La experiencia chilena comienza a principio de los setentas, con el trabajo desarrollado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Monge, 1990). Sin embargo, sólo a partir de 1997, en el marco del Proyecto CITSU, el SHOA ha realizado estudios sistemáticos de inundación en los principales puertos de Chile.

Las cartas de inundación por tsunami elaboradas por el SHOA reproducen las áreas de inundación asociadas a los grandes eventos de campo cercano ocurridos durante los últimos doscientos años en las principales ciudades costeras de nuestro país, pero no incluye una evaluación del riesgo de tsunami a nivel predial ni la proposición de una serie de medidas de mitigación a ser utilizadas en la futura planificación urbana, como se incluye en el presente documento.

2. HIDRODINAMICA DE TSUNAMIS

Los mecanismos de generación de tsunamis son variados, aunque la gran mayoría son de origen tectónico. Se estima que el 94% de los 450 tsunamis ocurridos durante el siglo pasado en el Océano Pacífico fueron originados por este mecanismo. Casos generados por actividad volcánica, resonancia de las masas de agua, avalanchas submarinas, explosiones nucleares y el impacto de meteoritos, entre otros mecanismos, no son estudiados en esta investigación.

La dislocación de la corteza terrestre en las zonas de subducción produce un desplazamiento en el fondo marino, cuya energía se transmite a la masa de agua y es radiada desde la zona de generación en forma de ondas de período largo. Se reconocen 3 condiciones para la generación de un tsunami de origen tectónico: que una parte mayoritaria del área de ruptura del sismo esté bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 km; que la componente vertical del desplazamiento del área fracturada sea importante y que el sismo libere suficiente energía. Estas condiciones son de carácter cualitativo y actualmente no existe ningún modelo teórico confiable que permita determinar el potencial tsunamigénico de un sismo.

Actualmente hay consenso en que el Momento Sísmico (M_o) es el indicador que mejor estima el potencial tsunamigénico de los terremotos debido a que, a diferencia de la Magnitud Richter, no se satura con los eventos más grandes. Este parámetro es proporcional al producto del área del plano de falla y deslizamiento promedio sobre el mismo y por ende al volumen de agua desplazada por la zona de ruptura, lo que le da un sentido físico en la caracterización del fenómeno. En Momento Sísmico se define como:

$$M_o = \mu L W \overline{\Delta D}$$

L :	Longitud del semieje mayor de la zona de ruptura
W :	Longitud del semieje menor de la zona de ruptura
μ :	Rigidez del estrato donde se genera la dislocación ($4 \times 10^{11} \text{ din/cm}^2$)
$\overline{\Delta D}$:	Dislocación media

Talandier (1993) clasifica la relación entre el Momento Sísmico del terremoto y el potencial destructivo del tsunami según la tabla 1, que es utilizada en esta investigación:

TABLA 1.- POTENCIAL DESTRUCTIVO COMO FUNCION DEL MOMENTO SISMICO

M_o (Nm)	DESCRIPCION
$M_o < 10^{11}$	No se genera tsunami
$10^{11} \leq M_o < 5 \times 10^{11}$	Tsunami pequeño
$5 \times 10^{11} \leq M_o < 2 \times 10^{12}$	Tsunami potencialmente destructivo
$M_o \geq 2 \times 10^{12}$	Tsunami grande y destructivo

La zona de Quintero estaría afectada a terremotos de magnitud $M_R > 7.8$ con un período de recurrencia de 82 ± 6 años (Kausel, 1986), por ende es muy probable que este sector del litoral sea afectado por un terremoto de grandes dimensiones durante las próximas décadas. Las fórmulas empíricas derivadas de la Ley de Gutenberg y Richter en esta región (Pardo, Comte y Eisemberg, 1989) establecen la probabilidad de ocurrencia de terremotos, pero no pueden ser

extrapoladas al fenómeno tsunami. Basado en estos hechos y en el carácter fuertemente aleatorio del fenómeno tsunami, un enfoque estrictamente probabilístico no es viable. Por ende, la metodología consiste en realizar una evaluación de las zonas de inundación generadas por terremotos ocurridos en Chile central sin necesariamente asignar probabilidades de ocurrencia a los resultados. En la Tabla 2 se presentan las características sísmicas de estos eventos y en la Figura 2 se ilustra la distribución temporo espacial de dichos terremotos.

TABLA 2.- GRANDES TERREMOTOS EN LA REGION DE VALPARAÍSO (Compilado de diversos autores).

FECHA	LARGO (km)	ANCHO (km)	DESPLAZAM. (m)	M_L	M_0 (10^{11} din-cm)
1575	-	-	-	7 - 7.5	-
1647	365	-	-	8.5	-
1730	350 - 550	100-150	6 - 8	8.75	-
1822	200 - 330	100-150	3 - 6	8.5	-
1906	365 - 330	100-150	3 - 6	8.2 - 8.3	29 - 50
1985	170	100	1.23 - 2.80	7.8	10 - 11.5

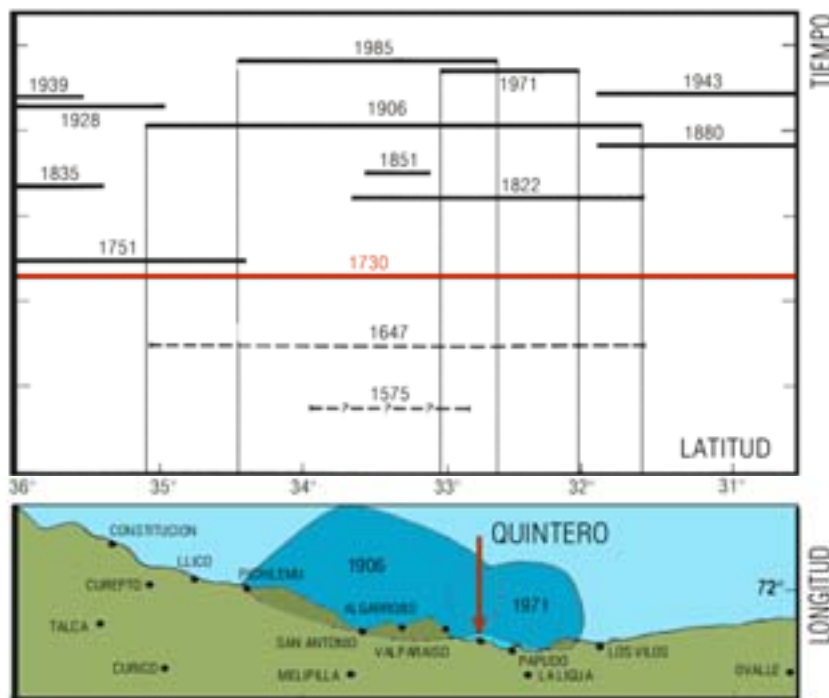


FIGURA 2.- DISTRIBUCION DE GRANDES TERREMOTOS EN CHILE CENTRAL. (Basado en Comte et al., 1986).

3. METODOLOGIA

TUNAMI-N simula la generación, propagación y arribo del tsunami a las costas de Quintero sobre un dominio de integración que incluye la zona de generación del terremoto y el continente. La condición inicial se determina empleando el modelo de Mansinha y Smylie (1971) que supone una deformación instantánea de la superficie del océano igual a la deformación vertical del lecho

marino. La propagación del tsunami se simula con el método de Goto y Ogawa (1982), que consiste en la integración numérica de las ecuaciones de la mecánica del oleaje utilizando un algoritmo en diferencias finitas. La inundación en zonas costeras se determina empleando la condición de frontera móvil de Iwasaki y Mano (1979).

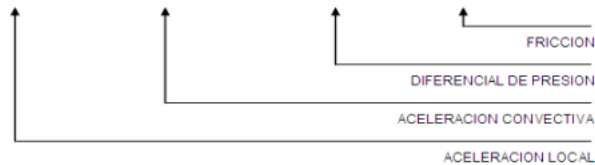
El modelo no incluye efectos de Coriolis, dispersión angular, presión atmosférica, viento, tensión superficial y evaporación debido a su poca importancia relativa. El fondo marino se considera fijo y la superficie de aguas quietas se mantiene constante (nivel medio del mar). El modelo no predice la ocurrencia de rotura de ondas. No obstante, TUNAMI-N caracteriza la altura de las ondas con un error de $\pm 15\%$ (Shuto, 1991). Por el contrario, es poco preciso en la caracterización del perfil de las ondas. La probabilidad de ocurrencia conjunta de una tormenta extrema y tsunami es en extremo baja, por lo que no se considera en el estudio.

TUNAMI-N utiliza la *teoría no lineal de aguas someras con fricción cuadrática y advección de momentum*, que corresponde a una integración en la vertical de las ecuaciones modificadas de Navier Stokes (Grilla D). A profundidades importantes (Grillas A, B y C) donde los efectos de aceleración convectiva y fricción de fondo son poco significativos en comparación con las fuerzas gravitacionales que gobiernan el fenómeno, se utiliza la *teoría lineal de onda larga sin fricción de fondo*. El sistema de ecuaciones está constituido por las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M N}{D} \right) + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M N}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + g D \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$



- x, y, t : Coordenadas geográficas y tiempo
- M, N : Flujos de descarga en x e y , respectivamente
- η : Desplazamiento vertical, referido al nivel medio del mar
- n : Coeficiente de resistencia de Manning
- g : Aceleración de gravedad
- D : Profundidad total

Condiciones iniciales y de borde: El nivel inicial de la superficie antes de la perturbación es constante y los flujos de descarga nulos al inicio del cómputo. La condición de borde agua-agua supone que la energía es transmitida fuera del dominio con una reflexión mínima. La condición de borde tierra-agua se estima mediante una frontera móvil que permite la evaluación de la zona de inundación en la costa (Grilla D).

Deformación inicial del fondo marino: La forma inicial del tsunami se determina suponiendo una deformación instantánea de la superficie del océano igual a la deformación del lecho marino Mansinha y Smylie (1971). El campo de desplazamientos se deriva a partir de aplicación de la Fórmula de Volterra (Steketee, 1858), para una falla tipo dip-slip y una zona de ruptura

rectangular definida por su longitud L , ancho W y manto δ . Los parámetros requeridos para los terremotos de 1730, 1906 y 1985 se derivaron de la Tabla 2. Los parámetros y zona de ruptura para el caso 1730, considerado crítico, se presentan en la Tabla 3 y Figura 3:

TABLA 3.- PARAMETROS DE ENTRADA DEL METODO DE MANSINHA Y SMYLYE.

PARAMETRO	CASO 1730-10	DEFINICION
Ubicación	31.5°S – 35°S	
Longitud (L)	450	Longitud del eje mayor de la pseudo-elipse de falla.
Ancho (W)	125	Longitud del eje menor de la pseudo-elipse de falla.
Dislocación (u)	7	Magnitud del desplazamiento relativo entre placas.
Profundidad (H)	40	Distancia entre la superficie terrestre y el origen de la falla.
Rumbo (θ)	N10°E	Dirección de la falla respecto al Norte, en sentido horario.
Ang. De deslizamiento (λ)	90°	Dirección del desplazamiento relativo de placas, medido sobre el plano de falla a partir de la línea de rumbo, en sentido antihorario.
Manteo (δ)	18°	Inclinación de la falla respecto del plano horizontal.

La zona de ruptura se caracteriza por un sector de desplazamiento positivo, de forma pseudo elipsoidal ubicado inmediatamente sobre el eje mayor de la zona de ruptura, y un desplazamiento negativo de menor magnitud, ubicado al Este del anterior.

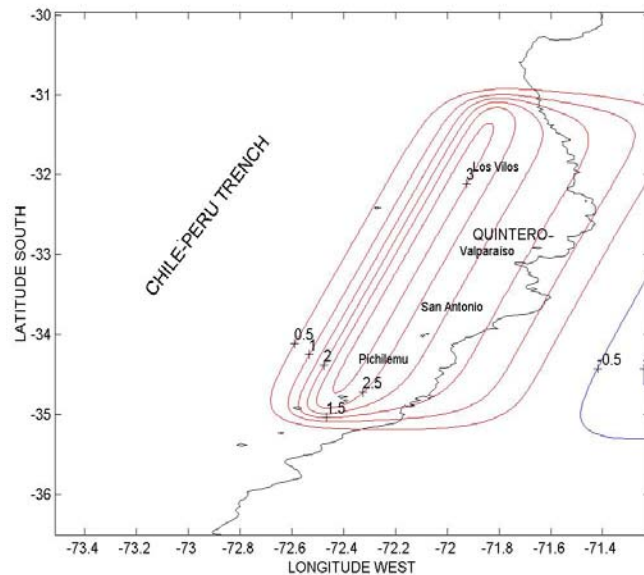


FIGURA 3.- DEFORMACION INICIAL DEL FONDO MARINO EN LA GRILLA A. CASO 1730-1.

Construcción de las grillas: La batimetría se obtuvo de cartas batimétricas del SHOA y la topografía, de un archivo digital confeccionado a partir de un levantamiento realizado por el SAF (FONDEF, 1:20.000). Se elaboraron 4 grillas anidadas (A, B, C y D) con resolución de 81'': 27'': 9'': 3'', respectivamente. El uso de un esquema de mallas anidadas permite el ahorro de tiempo y memoria de almacenamiento computacional. El incremento temporal utilizado en el cómputo es de 1 s durante 3 h de simulación. Una vista parcial de las grillas se presenta en la Figura 4.

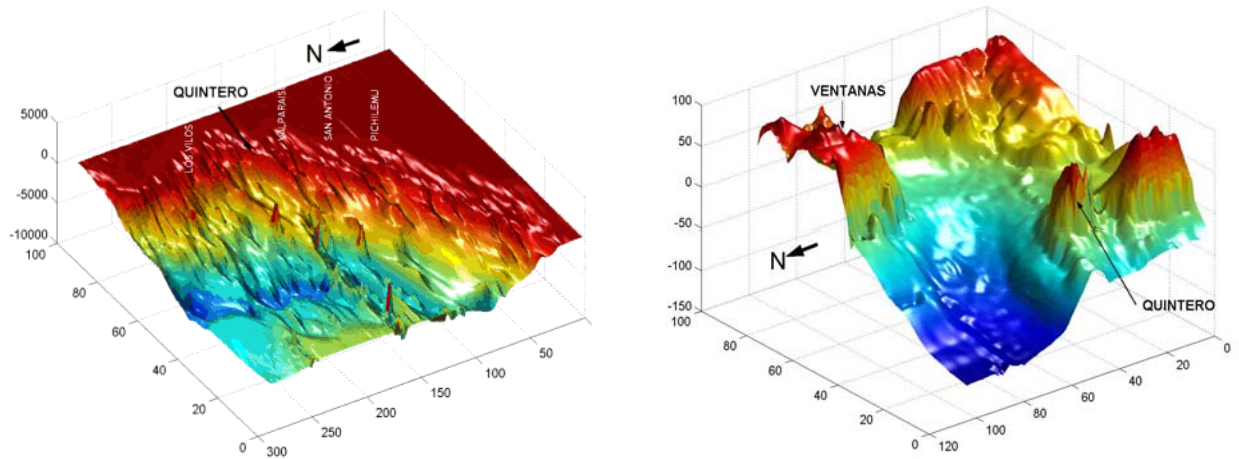


FIGURA 4.- GRILLAS A (izquierda) Y D (derecha).

Calibración del modelo: La información existente respecto de los niveles alcanzados por tsunamis históricos en la bahía de Quintero es escasa. En consecuencia, la calibración se realizó utilizando la información de la zona de ruptura del terremoto de 1985 (Barrientos, 1990) y el registro de la estación mareográfica de Valparaíso. Se comparó la altura máxima del mareograma real con la máxima desnivelación de la serie de tiempo obtenida de la simulación, ajustando los parámetros de resistencia de Manning y de rigidez del suelo.

4. RESULTADOS

Se presenta una comparación de resultados en puntos característicos de la bahía para los eventos de 1730, 1906 y 1985. La estación E1 visualiza la evolución del tsunami fuera de la bahía y las estaciones E2, E3 y E4 son utilizadas para evaluar su comportamiento dentro de la bahía. La Figura 5 evidencia un peraltamiento considerable entre la estación E1 y aquellas ubicadas dentro de la bahía. Éstas presentan mareogramas similares, con diferencias asociadas probablemente a oscilaciones de período corto y origen local. A partir de los 140 min de simulación, las oscilaciones tienden a atenuarse.

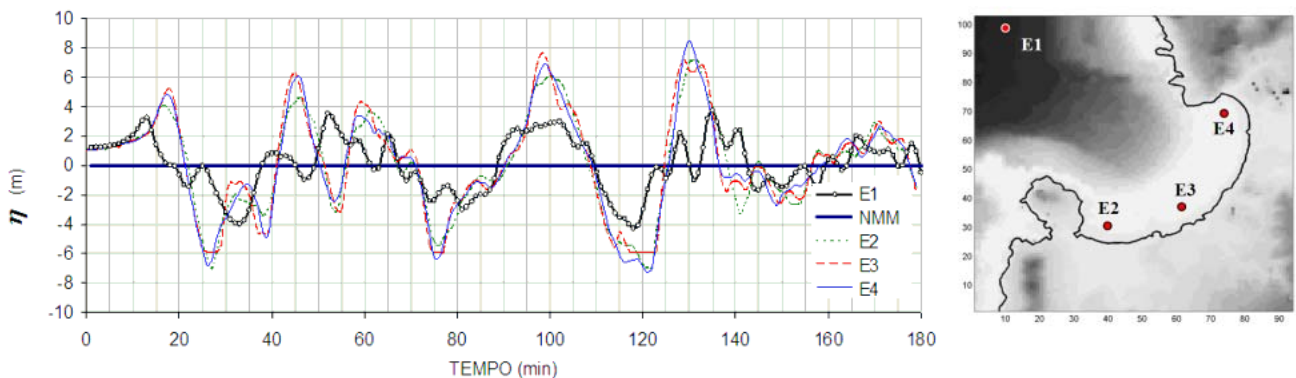


FIGURA 5.- MAREOGRAMA PARA LAS ESTACIONES E1, E2, E3 Y E4 (TSUNAMI 1730).

Se presenta un primer incremento instantáneo del nivel del mar asociado a sollevamientos costeros en la bahía de Quintero. Para el terremoto de 1730, éste alcanza 1,3 m, mientras que para los eventos de 1906 y 1985, es de 0,7 m y 0,8 m respectivamente. El rumbo de aproximación del tren de ondas del tsunami es de 130° , que corresponde a una deflexión de 30° hacia el sur respecto del rumbo inicial de propagación, debido al efecto de refracción.

Durante la simulación del tsunami de 1730 se presentan cuatro frentes de onda. El primero impacta el borde costero 18 min después del terremoto, presentando una forma claramente definida, desnivelaciones de $\eta = +5,3$ msnm y velocidades de 5,5 m/s en flujo entrante y de 7 m/s durante el recogimiento. El segundo frente arriba a los 45 min, con desnivelaciones de $+6,3$ msnm y velocidades de 6 m/s; el tercero arriba a los 100 min, alcanzando $+7,8$ msnm y velocidades de 5,5 m/s y el cuarto a los 132 min con desnivelaciones de $+8,5$ msnm y velocidades de 8 m/s. A partir de los 160 min, el tsunami no excede 3,0 m y presenta velocidades progresivamente descendientes. El período promedio de las cuatro primeras ondas es de 40 min. Los tsunamis del 1906 y 1985 presentan un patrón similar pero de magnitudes menores. En la Figura 6 se presenta la desnivelación y velocidad de la corriente en la estación E2 para el evento de 1730.

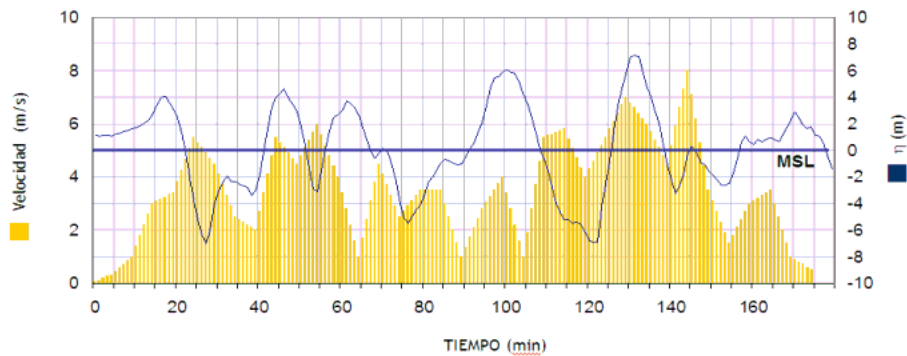


FIGURA 6.- DESNIVELACION Y VELOCIDAD DE LA CORRIENTE. ESTACION E2. (TSUNAMI 1730).

En la figura 7 se presenta el diagrama de desnivelación máxima, $\eta_{MAX}(x,y,t)$, durante el tiempo de simulación para los tres eventos simulados.

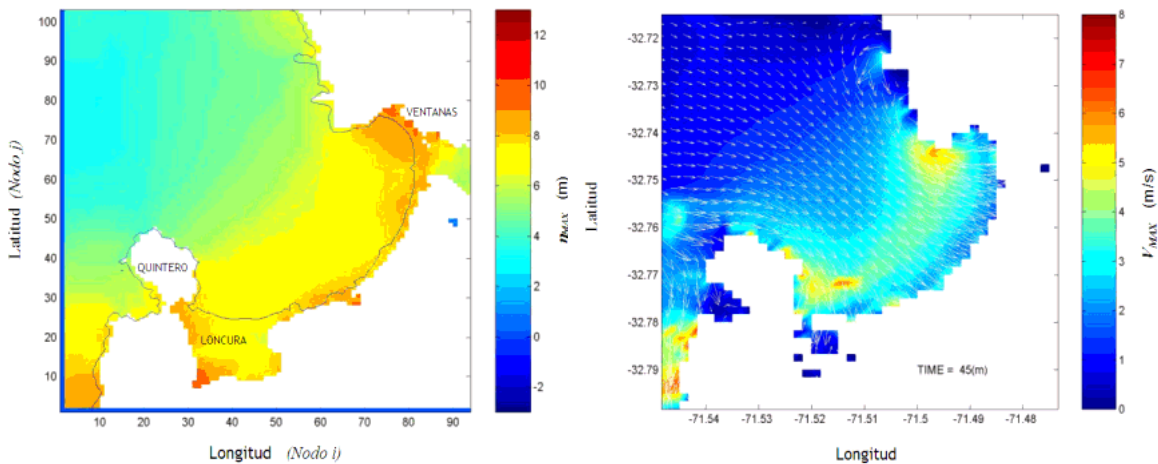


FIGURA 7 - INUNDACION MAXIMA Y VELOCIDADES TSUNAMI DE 1730.

Inundación en sector Quintero (Figura 8)

En el costado occidental de la Península Los Molles no existe riesgo de inundación debido a la presencia de farellones y asentamientos urbanos ubicados a considerable altura. En su costado oriental se presenta una situación de bajo riesgo debido a que está protegida de la acción directa del oleaje. Sin embargo, el sector podría sufrir una inundación de 8.4 msnm y velocidades de 7.4 m/s durante un tsunami con las características del evento de 1730. Los efectos son menores para los tsunamis de 1906 y 1985. En el sector sur-occidental de la península se presenta una situación de bajo riesgo debido a los farellones costeros. Sin embargo, durante un evento potencialmente destructivo, la inundación podría remontar el istmo de la Península Los Molles. En el sector comprendido entre el Muelle Fiscal y el Muelle Aviación se espera una inundación moderada, donde embarcaciones de pesca artesanal podrían ser arrastradas tierra adentro. En Playa Loncura el tsunami alcanza los 3 msnm, inundando en 1.5 km la llanura donde se ubica el aeródromo de la FACH. Esta situación es importante desde el punto de vista estratégico pues constituye el único emplazamiento donde se podría proveer ayuda aérea durante un evento de importancia. Los flujos de resaca en Playa Loncura alcanzan velocidades de hasta 8 m/s, con un alto potencial erosivo.

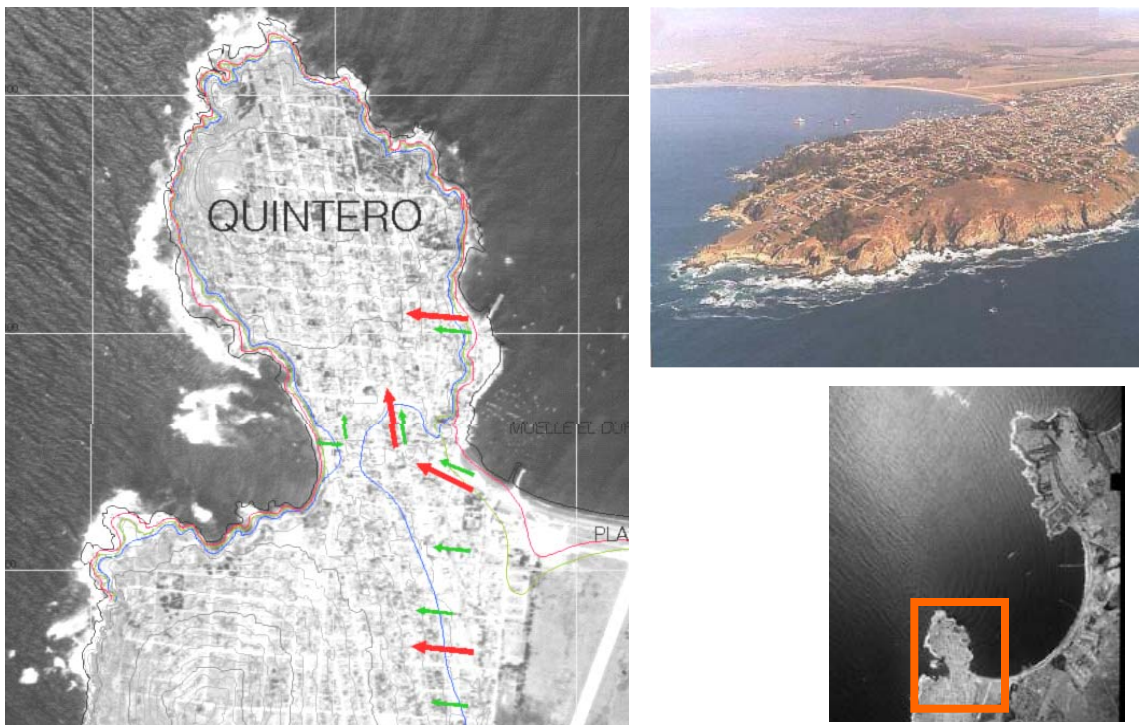


FIGURA 8.- INUNDACION PARA LOS TSUNAMIS DE 1730, 1906 Y 1985. SECTOR PENINSULA LOS MOLLES.

Inundación en sector Playa La Herradura (Figura 9)

El sector está afecto a desnivelaciones máximas de 7.7 m y velocidades de 4.5 m/s durante un tsunami potencialmente destructivo. Los tsunamis de 1906 y 1985 generan alturas inferiores a los 2.3 msnm y velocidades bajo los 0.8 m/s. El Terminal Oxiquim alberga instalaciones de ácido sulfúrico, aguas ácidas y ácido contaminado. Al disminuir su concentración, el ácido sulfúrico es fuertemente corrosivo y producto de su acción sobre los metales, genera hidrógeno, gas que

forma mezclas altamente explosivas con el aire. En las instalaciones existen ciertos tanques cuya cota de fundación es de 6.1 msnm que si bien están debidamente protegidos en recintos estancos de seguridad formados por pretils de arena compactada, pueden eventualmente ser afectados en sus cimientos. Ductos e instalaciones eléctricas ubicadas en las zonas bajas debieran ser ancladas o enterradas a objeto de evitar su destrucción.

Las altas corrientes podrían provocar una socavación importante de las fundaciones de los pilotes del muelle Oxiqum (puente de acceso de 652 m de largo, cabezo de 40 m y dos sitios de atraque con una profundidad de -16 mNRS), generando asentamientos diferenciales a lo largo de la estructura. Por otro lado, las solicitaciones hidrodinámicas debidas a desnivelaciones de hasta 7.7 msnm pueden causar un colapso estructural del muelle.



FIGURA 9.- INUNDACION PARA LOS TSUNAMIS DE 1730, 1906 Y 1985. SECTOR PLAYA LA HERRADURA.

Inundación en sector Ventanas (Figura 10)

El evento de 1730 genera desnivelaciones de +8.5 msnm y velocidades de hasta 7.8 m/s, en tanto que durante los eventos de 1906 y 1985, éstas no exceden los +2.4 msnm y 1.1 m/s. La inundación en el sector de la Refinería Ventanas generada por un evento con las características de 1730 no alcanza a afectar las instalaciones principales. En el sector Norte de las instalaciones se ubican seis estanques relativamente pequeños que si bien no están afectados al impacto directo de la ola, pueden ser afectados por la socavación. La chimenea de ENAMI se ubica en un sector seguro.

El Puerto Ventanas (muelle de 1.300 m y 5 sitios de atraque con capacidad para buques de hasta 70.000 DWT y 14.3 m de calado) consta de un terminal de abastecimiento de combustible y estanques para productos químicos ubicados en la planicie costera aledaña a la desembocadura del Estero Puchuncaví, que presentan un alto riesgo ante el ataque de una tsunami potencialmente

destruictivo. Las altas corrientes provocarían una socavación importante de las fundaciones de los pilotes en la zona costera y las solicitaciones hidrodinámicas asociadas a alturas de hasta +8.5 msnm podrían causar daños importantes en el muelle. Las solicitaciones de impacto de buques y sobre las bitas de amarre pueden ser suficientemente altas para generar fallas locales de la estructura.

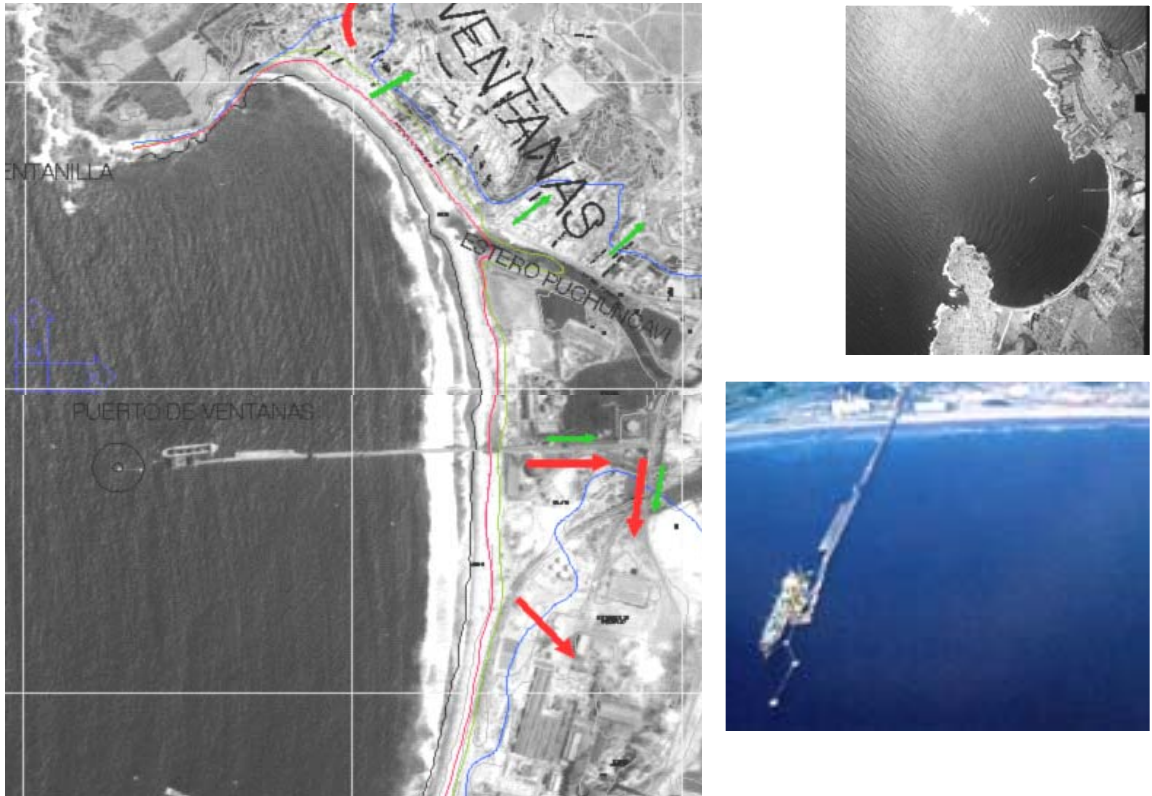


FIGURA 10.- INUNDACION PARA LOS TSUNAMIS DE 1730, 1906 Y 1985. SECTOR PUERTO DE VENTANAS.

El ataque del tsunami podría causar la colisión de buques con el muelle y otras embarcaciones en sitios contiguos. Recomendaciones del SHOA (2000) indican que las embarcaciones están fuera de peligro si se encuentran en profundidades mayores de 150 m, lo que implica que aquellas naves atracadas no tendrían tiempo de reacción ante un tsunami de campo cercano. La inundación asociada a un evento con las características del de 1730 alcanza las instalaciones de la Central Termoeléctrica Ventanas y podría eventualmente afectar a las dos turbinas de generación, ubicadas al interior del predio. Las consecuencias de ello son de sumo cuidado pues la central satisface los requerimientos de energía de la V Región y parte de la Metropolitana. Se recomienda disponer de una estructura robusta en límite costero, por sobre el talud natural que se forma sobre la playa, y tomar medidas precautorias ante un evento de esta naturaleza.

Durante un evento importante, Ventanas se vería parcialmente inundado en los sectores aledaños a la playa. Sin embargo, las fuertes pendientes costeras evitan el ingreso de las ondas tierra adentro y facilitan la evacuación de los habitantes hacia los sectores seguros en la parte alta de la ciudad. La caleta pesquera no ofrece protección alguna a los botes, por lo que serían arrastrados por la corriente, causando daños por el impacto sobre las edificaciones del sector bajo del pueblo.

Esta información se transcribe en una Carta de Inundación a escala 1:1000, que por su tamaño no se adjunta en este documento. La CITSU incluye zonas de inundación para los eventos de 1730, 1906 y 1985, rutas de evacuación peatonales y vehiculares, zonas de seguridad y refugios.

5. MEDIDAS DE MITIGACION

A continuación se proponen recomendaciones para mitigar el impacto de tsunamis en el marco de una planificación costera en Quintero (NTHMP, 2001). La efectividad de estas medidas recae en organismos técnicos y oficiales del Estado como a las autoridades civiles, navales y marítimas, a quienes corresponda velar por la seguridad de las personas y bienes públicos.

- Identificar del riesgo de inundación por tsunami.
- Identificar el daño esperado, según el tipo de instalaciones y edificaciones.
- Proponer una planificación urbana a largo plazo, considerando el riesgo de inundación.
- Reforzar estructuras vulnerables, disponer arboledas y zanjas de protección, etc.
- Efectuar un plan de educación sistemático orientado a la comunidad.

En la Tabla 4 se presentan causas, efectos y medidas de mitigación que debieran adoptarse tanto en la planificación y diseño de futuras estructuras como en la actualización de las instalaciones costeras en operación. Esta información se incluye en la versión completa del texto original.

TABLA 4 - MATRIZ CAUSA-EFECTO-MEDIDAS DE MITIGACIÓN ANTE UN TSUNAMI.

CAUSA	EFEECTO	MEDIDA DE MITIGACION
INUNDACIÓN	Fundación y pisos inferiores inundados.	Ubicar edificaciones sobre el nivel de inundación.
	Falla en sistemas mecánicos, eléctricos y comunicación.	Instalar equipamiento importante en pisos altos.
	Daño a las construcciones, personas, y amoblado.	Proteger, reforzar y anclar depósitos de materiales peligrosos.
	Contaminación con materiales de alto contenido salino.	Evaluar capacidad de soporte del suelo y utilizar materiales resistentes.
	Fuerzas hidrostáticas: Diferencias de nivel de agua a ambos lados de un muro.	Ubicar edificaciones sobre el nivel de inundación. Diseñar los muros para fuerzas de presión hidrostáticas. Evitar diferenciales de nivel (barbacanas) y usar anclajes resistentes.
	Flotación.	Ubicar edificaciones en sectores altos y utilizar anclajes.
	Disminución de capacidad de soporte del suelo.	Evitar la construcción sobre taludes afectados a inundación. Evaluar la condición del suelo inundado.
CORRIENTES	Fuerzas hidrodinámicas de impacto y de arrastre.	Ubicar edificaciones sobre el nivel de inundación. Diseño considerando fuerzas hidrodinámicas y anclajes.
	Impacto de escombros.	Ubicar edificaciones sobre el nivel de inundación. Diseñar considerando fuerzas hidrodinámicas de impacto.
	Socavación.	Utilizar fundaciones profundas y elementos de protección al pie.
ROMPIENTO	Fuerzas hidrostáticas	Diseño para oleaje rompiente.
	Impacto de escombros.	Ubicar edificaciones sobre la inundación y considerar fuerzas de impacto.
RESACA	Inestabilidad estructural de muros de contención.	Diseño considerando suelo saturado y dotar de drenes eficientes.
	Socavación.	Utilizar fundaciones profundas y elementos de protección al pie.
INCENDIO	Ignición de materiales inflamables	Ubicar estanques en zonas seguras y usar materiales resistentes al fuego.

La planificación consiste en establecer un ordenamiento territorial en las zonas de alto riesgo, basado en el tipo de actividad, uso del suelo, densidad de población, funcionalidad e importancia de las edificaciones, a partir del cual se establecen criterios para habitar dichos sectores. Como primera medida se recomienda realizar un catastro de las edificaciones existentes en los sectores de alto riesgo, en que se registre el tipo y material de la estructura, la edad y el uso de cada una. El análisis debiera contemplar la infraestructura y servicios señalados en la Tabla 5, además de los edificios habitacionales, casas e inmuebles comerciales.

TABLA 5.- EJEMPLOS DE INFRAESTRUCTURA CRÍTICA Y LÍNEAS DE VIDA.

INFRAESTRUCTURA	SERVICIOS
Sistemas de transporte	Servicios esenciales
Caminos, carreteras, puentes y sistemas de control de tráfico.	Estaciones de policía
Líneas de ferrocarril y sectores de permanencia de personas.	Estaciones de bomberos
Bodegas de recepción y almacenamiento de carga.	Hospitales y policlínicos
Aeropuertos y torres de control.	Lugares de protección de vehículos de emergencia y aviones
Puertos, terminales e infraestructura asociada.	Sistemas autónomos de generación eléctrica
	Estanques de almacenamiento de aguas y materiales peligrosos
Sistemas de conducción	Infraestructura de uso especial
Sistemas de generación y transmisión de electricidad, subestaciones	Colegios, liceos y escuelas
Sistemas de recepción, almacenamiento y distribución de gas natural	Universidades
Sistemas de comunicación terrestre (tendido eléctrico y tuberías)	Asilos de ancianos y centros de tratamiento médico
Antenas de comunicación vía satélite	Estaciones eléctricas
Sistemas de emisión de televisión y radio	
Sistemas de agua potable	Infraestructura de alto riesgo
Sistemas de alcantarillado y aguas lluvias	Puertos y terminales de carga / descarga de combustibles
Oleoductos	Sitios de almacenaje de armas y municiones
	Sitios de almacenaje de materiales químicos y radiactivos

Se debieran establecer aquellas actividades que imprescindiblemente deben realizarse en la franja costera, y aquellas en que su ubicación en sectores bajos es riesgosa por ser extremadamente vulnerables o que por su alta concentración de población hacen difícil su evacuación. El uso del suelo debiera ser clasificado en residencial, comercial, industrial de baja y alta peligrosidad, de servicios públicos y líneas de vida. Se debiera restringir la instalación futura de industrias de alto riesgo en el sector afecto a inundación y destinarlas a usos recreacionales o de paisajismo. En aquellos casos en que el traslado de las instalaciones de alta peligrosidad emplazadas en los sectores críticos sea en extremo oneroso, se debieran proteger las unidades mediante anclajes o muros de defensa.

Asimismo, la vulnerabilidad de la comunidad debiera ser reevaluada de ocurrir un tsunami en la región. Históricamente, los grandes tsunamis han creado la oportunidad de readecuar los patrones de desarrollo de las ciudades afectadas bajo la premisa de evitar pérdidas futuras. Sin embargo, y debido a falta de una planificación adecuada, las presiones de desarrollo urbano en el sector costero después de un desastre de esta naturaleza han conducido a reconstruir los sectores afectados sin la incorporación de criterios de mitigación. En consecuencia, estos aspectos debieran ser incorporados de antemano en la planificación de la ciudad y establecer los lineamientos básicos para la reconstrucción de ella.

6. CONCLUSIONES

Las características tsunamigénicas de los terremotos el litoral central son poco conocidas, por lo que la investigación se remite a estudiar los casos del 3/Mar/1985, 16/Ago/1906 y 8/Jul/1730 para evaluar las zonas de inundación, descartando una aproximación estadística al fenómeno.

Mientras no se cuente con estadísticas y se desconozcan las características tsunamigénicas de los terremotos de la región, resulta adecuado utilizar el método de Mansinha y Smylie (1981) para caracterizar la deformación de la corteza terrestre. Un desafío es lograr a futuro una descripción 3D, posible en la medida en que la sismología y los levantamientos hidrográficos así lo permitan.

En cuanto a la evolución de los tsunamis, inicialmente se presentan mediante una elevación instantánea del nivel del mar, seguida de cuatro frentes de onda con un período promedio de 40 min aproximadamente. La inundación de un tsunami potencialmente destructivo como el de 1730 es considerablemente mayor a la generada por tsunamis menores, como los de 1906 y 1985.

El análisis de riesgo sugiere que sobre el costado occidental de la Península Los Molles no existe riesgo de inundación, en tanto que al interior de la bahía la inundación alcanza los 8 msnm y velocidades de 7 m/s. Estos valores no incorporan los efectos de marea y oleaje, por lo que son indicativos y están sujetos a las condiciones naturales durante la ocurrencia del tsunami.

La utilización sistemática de las medidas de mitigación propuestas puede ser aplicada en otros asentamientos costeros y contribuir a la zonificación de los sectores bajos, como complemento a los estudios de microzonificación sísmica efectuados a la fecha en nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Barrientos, S. (1990). *Slip distribution of the 1985 Central Chile Earthquake*. UdC, Chile.
- 2 Comte et al. (1986). *The 1985 Central Chile Earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region*. UdC, Chile.
- 3 Godoy, H. y Monge, J. (1975). *Metodología para la evaluación del riesgo de Tsunami*. Pub. SES 13-75. UdC, Chile.
- 4 IOC (1998). *Post-Tsunami survey field guide. IOC Manuals and Guides No. 30*. UNESCO 1998.
- 5 IUGG/IOC (1997). *Time Project. IOC Manuals and Guides No. 35*. UNESCO.
- 6 Kausel, E. (1986). Cap.2: Proceso sísmico, parámetros focales y réplicas del sismo del 3 de Marzo de 1985. *El Sismo del 3 de Marzo de 1985 - Chile*. Acero comercial S.A.. Chile.
- 7 Lizana, J. (2000). *Evaluación del efecto de Tsunami sobre edificios*. UdC, Chile.
- 8 Lomnitz, C. (1970). *Major Earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955*. Geol. Rundschau..
- 9 Mansinha, L. y Smylie, D. (1971). *The displacement of the earthquake fault model*. Bull. Seismol. Soc. Amer. 61.
- 10 Monge J. (1990). *Técnicas y Métodos de Microzonificación en Chile*. Seminario Internacional de Microzonificación y de Seguridad de Sistemas de Servicios Públicos y Vitales. Lima, Perú.
- 11 NTHMP (2001). *Designing for Tsunamis. Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards*.
- 12 Ortiz, M. (1996). *Manual de instrucción sobre la simulación numérica de un Tsunami. Proyecto Time*. SHOA.
- 13 Pardo, M.; Comte, D. y Eisemberg, A. (1989). Sismicidad histórica y evaluación del peligro sísmico en la zona central de Chile. in MINVU (eds.). *5^{AS} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Vol.1. PUC, Chile.
- 14 Pilasi, J. (1978). *Riesgo de Tsunami en bahía de Quintero*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, UdC, Chile.
- 15 Preuss, J. (1988). *Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunami Hazard Area. Urban Regional Research*".
- 16 SHOA (1999). *Carta de Inundación por Tsunami para la Bahía de Valparaíso*. Chile.
- 17 Shuto, N. (1991). *Numerical Simulation of Tsunamis - Its Present and Near Future*. in BERNARD E. (ed.). *Tsunami Hazards. A Practical Guide for Tsunami Hazard Reduction*. Kluwer Academic Publishers. Pp. 171-192.
- 18 Tsutsumi, A. et al. (2000). *Nearshore Flow Velocity of Southwest Hokkaido Earthquake Tsunami*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. May/June. 2000, Vol.126, No.3. ASCE. ISSN 0733-950X.