



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

LAGOS, M.; CISTERNAS, M.; MARDONES, M.
Construcción de Viviendas Sociales en Áreas de Riesgo de Tsunami
Revista de la Construcción, vol. 7, núm. 2, 2008, pp. 4-16
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612584001>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Social Housing
Construction in Tsunami
Risk Areas

Construcción de Viviendas Sociales en Áreas de Riesgo de Tsunami



Autores

LAGOS, M. Doctor (c) en Ciencias Ambientales
Académico Instituto de Geografía
Pontificia Universidad Católica de Chile
email: mlagoslo@uc.cl

CISTERNAS, M. Doctor en Ciencias Ambientales
Académico Escuela de Ciencias del Mar
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
email: marco.cisternas@ucv.cl

MARDONES, M. Doctora en Geografía
Académica Departamento de Ciencias de la Tierra
Universidad de Concepción
email: mmardone@udec.cl

Fecha de recepción 03/06/08

Fecha de aceptación 25/07/08

Resumen

Se evalúa el riesgo de viviendas sociales construidas en la costa, expuestas al peligro de tsunami, mediante técnicas de modelación numérica. Para ello se utiliza como escenario el último evento destructivo que afectó el centro-sur de Chile, el *tsunami* de 1960. Caracterizando y cuantificando parámetros

hidrodinámicos de la inundación, tales como la profundidad de esta y la velocidad de la corriente, se estima el potencial daño a las viviendas. Finalmente, se reflexiona sobre la importancia de la localización de viviendas sociales y su relación con la exposición a procesos naturales extremos.

Palabras clave: vivienda social, fondo solidario de vivienda, riesgo, *tsunami*.

Abstract

The risk on social housing, built in coastal zones that are exposed to tsunami hazards, is evaluated through numerical modeling techniques, using as scenario the last destructive event which affected the central-south Chile, the 1960 tsunami. Characterizing and quantifying hydrodynamic

parameters of the inundation such as the depth of it and the current velocity, the potential damage to the housing is estimated. Finally, some reflections are present about the social housing location importance and its relation with the exposure to extreme natural processes.

Key words: *social housing, housing solidarity fund, risk, tsunami.*

Introducción

Desde principios del siglo XX la erradicación de poblaciones marginales ha sido uno de los principales objetivos de los diferentes gobiernos de Chile. Superar las condiciones deficitarias que las caracterizan se ha traducido en un conjunto de iniciativas que han propuesto diferentes planes de viviendas sociales (Hidalgo, 2005). Planes que en definitiva buscan contribuir a la superación de la pobreza y a mejorar las condiciones de vida de las familias.

A mediados de la década de los 90 se elaboró un Catastro Nacional de Asentamientos Precarios, sus registros fueron la población objetivo del programa Chile Barrios. Actualmente este programa recibe aportes del Fondo Solidario de Vivienda (FSV), fondo que otorga financiamiento para la erradicación y/o radicación de los campamentos catastrados (Saborido *et al.*, 2006).

El FSV se concentra particularmente en la precariedad habitacional de las familias de escasos recursos. Su propósito son las familias que no han podido obtener otras soluciones habitacionales existentes. Andrade *et al.* (2007) explican en detalle la estructura del programa, requisitos y beneficios. Durante el período enero de 2002 y octubre de 2005 el FSV benefició a más de 77 mil familias a lo largo de Chile (Saborido *et al.*, 2006).

El acceso de las familias de menores recursos a soluciones habitacionales adecuadas es una tarea prioritaria. Los esfuerzos que apuntan a mejorar la calidad de vida de estas familias son destacables. Sin embargo, todo el esfuerzo puede verse anulado por un factor clave: la localización de las viviendas. Efectivamente, la escasa consideración de la dinámica y recurrencia de procesos naturales extremos y su relación con el emplazamiento de viviendas puede tener consecuencias no deseadas, induciendo el riesgo¹ de desastre.

En Chile, numerosos son los ejemplos que evidencian como la localización y el tipo de construcción puede condicionar el umbral entre la seguridad y el riesgo

(Mardones y Vidal, 2001; Ferrando, 2002; Sepúlveda *et al.*, 2006). A diferencia de los estándares de construcción antisísmica, la falta de una legislación adecuada para un conjunto de otras amenazas naturales, se traduce en la materialización de construcciones en terrenos expuestos a diferentes tipos de peligros.

En este contexto, una solución habitacional integral, que busca mejorar la calidad de vida de las familias más pobres, debe evaluar la situación del emplazamiento. Con mayor razón, en el caso de la vivienda social rural, donde las opciones de localización para las familias son menos flexibles, sumado a la vulnerabilidad de las viviendas ante eventos naturales extremos, dado sus diseños y uso de materiales más económicos.

Como caso de estudio, al observar la construcción de viviendas sociales en áreas muy próximas a la costa, nos preguntamos si su localización es consecuente con los principios del FSV. Para ello, escogimos un área del centro-sur de Chile que hace menos de cinco décadas fue afectada por el gran *tsunami*² de 1960. El objetivo de la investigación es evaluar si las viviendas se encuentran o no en riesgo, y de ser así, cuantificar parámetros hidrodinámicos de la inundación que permitan estimar el potencial daño.

La amenaza de tsunami

El desastre producido por el *tsunami* que afectó las costas del océano Índico en 2004, produjo una reflexión global acerca de si realmente estamos preparados ante la amenaza de *tsunami*. Este destructor evento, generado por un terremoto gigante (M_w 9,3; Stein y Okal, 2005), nos enseñó el elevado costo que significa desconocer y subestimar el pasado de territorios que han sido afectados por *tsunamis* de gran magnitud (Lagos y Cisternas, 2008). El *tsunami*² impactó las costas de 13 países del océano Índico, cobrando la vida de casi un cuarto de millón de personas, afectando a una población cercana a 2,5 millones, con un costo en daños evaluado en casi 10 billones de dólares (EM-DAT, 2008).

¹ La estrategia internacional para la reducción de desastres de Naciones Unidas, define el riesgo como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad (UN-ISDR, 2004).

² Fenómeno que ocurre principalmente en el mar, generado por un disturbio sísmico u otros procesos geológicos como erupciones volcánicas o deslizamientos, que impulsan y desplazan verticalmente la columna de agua originando un tren de ondas progresivas gravitacionales largas. Se propagan a gran velocidad en todas direcciones desde la zona de origen y sus olas al aproximarse a las costas pueden alcanzar alturas de grandes proporciones, infligiendo una vasta destrucción e inundación (Satake, 2002).

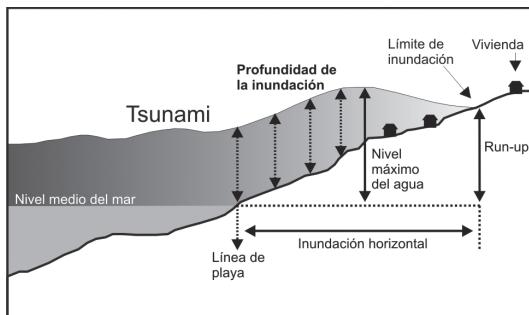
En el océano Pacífico ocurrió un *tsunami* similar al de 2004, el *tsunami* chileno de 1960. Este *tsunami* fue generado por un terremoto gigante (M_w 9,5; Kanamori, 1977), siendo el evento más grande registrado instrumentalmente. El *tsunami* causó más de 1.000 víctimas a lo largo del centro-sur de Chile, propagándose por el océano Pacífico, cobrando 61 vidas en Hawái y 142 en Japón, alcanzando más de 550 millones de dólares en pérdidas materiales (Atwater et al., 1999).

Efectivamente, en el Océano Pacífico uno de los principales sectores generadores de *tsunami* corresponde a la zona de subducción localizada frente a las costas de Chile. Solo considerando la información instrumental registrada durante el siglo XX, en Chile se originó el 74% del total de los *tsunamis* generados en América del Sur (Gusakov, 2005). Razón que explica su nutrida historia de terremotos generadores de destructores *tsunamis* (Lagos, 2000). Si revisamos los registros instrumentales; registros escritos y la prehistoria reflejada en evidencias geológicas, observaremos una realidad que cada día adquiere mayor importancia, los *tsunamis* son un riesgo permanente para las comunidades costeras.

Daños provocados por *tsunami* en viviendas

El potencial destructivo de un *tsunami* es el resultado de la inundación, el impacto de las olas sobre las construcciones y la erosión. Las olas de *tsunami* aplican fuerzas en las estructuras en la forma de presión hidrodinámica, flotabilidad, levantamiento, socavamiento e impacto de objetos arrastrados por la corriente. Los daños producidos por *tsunami* se originan cuando la masa de agua, seguida

Figura 1 Esquema de la llegada de un *tsunami* a la costa



Fuente: Modificado de UNESCO-IOC, 2006

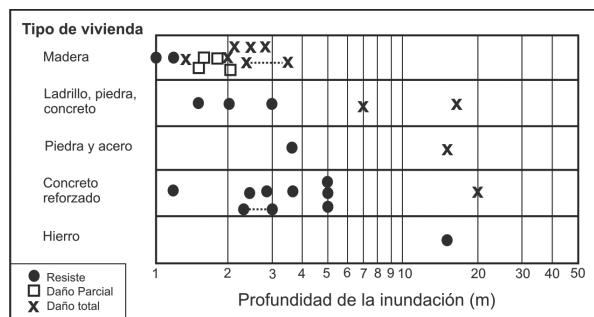
por una fuerte corriente, impacta el espacio construido y su entorno. En ese momento el *tsunami* demuestra su tremenda fuerza destructiva (Wiegel, 1970).

El nivel de daño en viviendas depende de la máxima profundidad de la inundación sobre el terreno (ver Figura 1), la velocidad del flujo y el tipo de construcción. Shuto (1993) analiza el impacto producido por diferentes *tsunamis* en viviendas, relacionando el tipo de construcción y la profundidad de la inundación (ver Figura 2), evidenciándose cómo las construcciones livianas son las más afectadas en comparación con las estructuras de concreto reforzado.

Efectivamente, Kuroiwa (2004) explica que las viviendas con estructuras de concreto reforzado y ladrillo, con sus fundaciones protegidas contra la erosión y con muros paralelos a la dirección de avance de las olas, han resistido el impacto de *tsunamis*. A diferencia, las viviendas ligeras (madera y/o similares), sin el debido anclaje a sus fundaciones, han sido arrastradas y generalmente destruidas.

El impacto producido en viviendas después del *tsunami* de 2004 confirma este hecho (Ghobarah et al., 2006; Sheth et al., 2006; Inoue et al., 2007). En Indonesia y Tailandia, viviendas económicas construidas con marcos de madera, compuestas de columnas y vigas de madera de apoyo, con techos de tejas de arcilla o planchas de acero corrugado, sobrevivieron al terremoto, sin embargo, una vez alcanzadas por el *tsunami* fueron mayoritariamente desintegradas. En tanto, viviendas con estructuras de concreto rudimentarias fueron severamente dañadas o se derrumbaron. Solo sobrevivieron al terremoto y *tsunami* con daños menores las viviendas diseñadas con estructuras de concreto reforzado y bien construidas.

Figura 2 Tipo de vivienda y grado de daño por *tsunami*



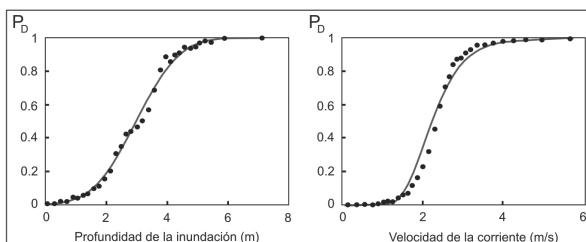
Fuente: Shuto, 1993

Los daños se limitaron al quiebre de ventanas y puertas; los primeros pisos de paredes de albañilería delgada (50 mm) colapsaron y columnas exteriores fueron dañadas por el impacto de objetos pesados como automóviles y barcos (Ghobarah *et al.*, 2006).

Recientemente, Reese *et al.*, (2007) evaluaron la vulnerabilidad de las viviendas costeras después del *tsunami* de Java ocurrido el 17 julio de 2006. Las profundidades del agua promedio fluctuaron entre 2 y 4 m, siendo dañadas casi en su totalidad las viviendas antiguas construidas con ladrillos; un 50% de las viviendas nuevas con estructuras de concreto reforzadas rudimentariamente; y entre un 5-20% para las viviendas diseñadas con estructuras de concreto reforzado.

Recientes aplicaciones que combinan modelación numérica de *tsunamis* y percepción remota, han permitido determinar como la profundidad de la inundación y la velocidad de la corriente pueden producir daños en viviendas. Koshimura y Yanagisawa (2007) utilizan estas técnicas para proponer funciones de fragilidad para la estimación de daños en viviendas producidos por *tsunami* (ver Figura 3). Los autores se focalizan en la principal localidad afectada por el *tsunami* de 2004, la ciudad de Banda Aceh (Indonesia), la que registró casi 50 mil viviendas dañadas. Sus resultados indican que la probabilidad de daño se incrementa rápidamente cuando la profundidad de la inundación local excede 2 m, siendo casi todas las viviendas destruidas cerca de los 5 m. En tanto, cuando la velocidad de la corriente bordea los 2 m/s, los daños comienzan a ser significativos, transformándose en destructivos cerca de los 4 m/s.

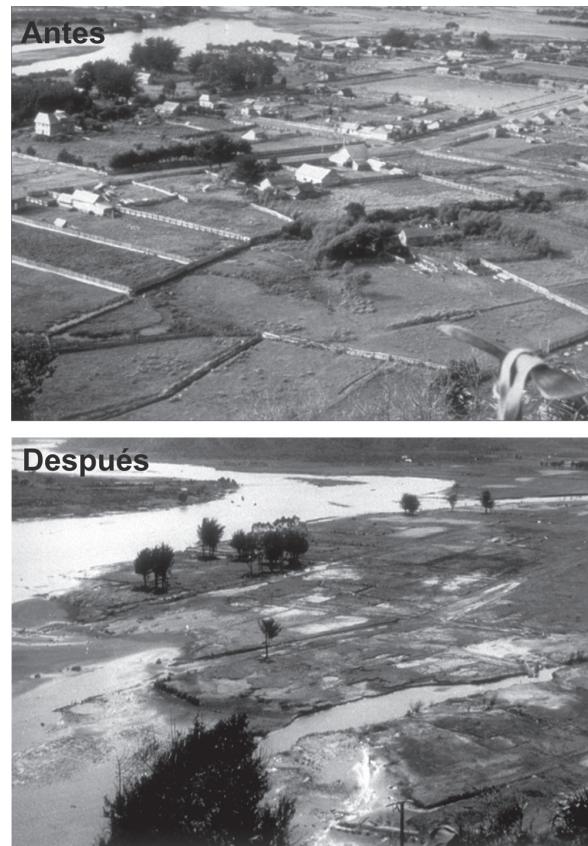
Figura 3 Funciones de fragilidad para estimación de daño en viviendas por *tsunami*



Fuente: Koshimura y Yanagisawa, 2007

El último *tsunami* destructivo en Chile fue el ocurrido el 22 de mayo de 1960. Sus olas arrasaron poblados como Puerto Saavedra, Toltén, Queule, Corral, Bahía Mansa, Quenuir, Maullín y Ancud (Veyl, 1961). Principalmente, las viviendas afectadas fueron de madera, albañilería y concreto reforzado rudimentariamente. La Figura 4 muestra viviendas del pueblo de Queule, antes y después del *tsunami* chileno de 1960. Aunque las casas se localizaban a más de un kilómetro de la costa, la profundidad de la inundación, estimada en 4 m, arrasó con ellas (Weischet, 1963).

Figura 4 Viviendas de Queule antes y después del *tsunami* chileno de 1960



Fuente: Weischet, 1963

Área de estudio

La investigación se concentra en el curso inferior del estuario del río Maullín, X Región, Chile. El área de estudio se localiza entre los $41^{\circ} 34'$ y $41^{\circ} 39'$ de latitud Sur, y los $73^{\circ} 43'$ y $73^{\circ} 34'$ de longitud Oeste (ver Figura 5). Maullín fue uno de los principales asentamientos costeros afectados por el tsunami de 1960. Las máximas olas observadas alcanzaron en la costa alturas cercanas a los 10 metros. El tsunami dejó un saldo total de 122 muertos, 115 corresponden al pueblo de Quenuir, que fue arrasado completamente; 15 fallecieron en el sector de San Pedro Nolasco; y dos en el poblado de Maullín (Atwater *et al.*, 1999).

El año 2002, el Fondo Solidario de Vivienda seleccionó dos proyectos pertenecientes al programa Chile Barrios en Maullín (MINVU, 2004). Un conjunto de 56 viviendas de $27,7 \text{ m}^2$ cada una serían construidas en nuevos

terrenos. Del total de viviendas, 32 se localizarían en el sector de Carrizo y 24 en el sector Amortajado. Estas últimas son el principal objetivo de la presente investigación, debido a su localización, en un sector de escasa pendiente, baja altitud, a 500 m de la costa y 200 m del río San Pedro Nolasco.

Las viviendas fueron construidas durante el año 2004. En septiembre del año 2007 se verificó en terreno el aumento de viviendas tipo FSV, más viviendas irregulares, concentrando mayor cantidad de población. La Figura 6 muestra el tipo de viviendas, su materialidad y entorno. Los materiales predominantes son la madera, paredes recubiertas de planchas de zinc (5v) y techos de planchas de zinc ondulado. El piso de las viviendas se encuentra en altura, a unos 40 cm de la superficie (dependiendo del terreno). Sus fundaciones se sustentan sobre poyos de concreto expuestos. Una vez habitadas las viviendas, rápidamente son ampliadas con materiales reciclados, compuestos principalmente de madera y derivados.

Figura 5 Área de estudio

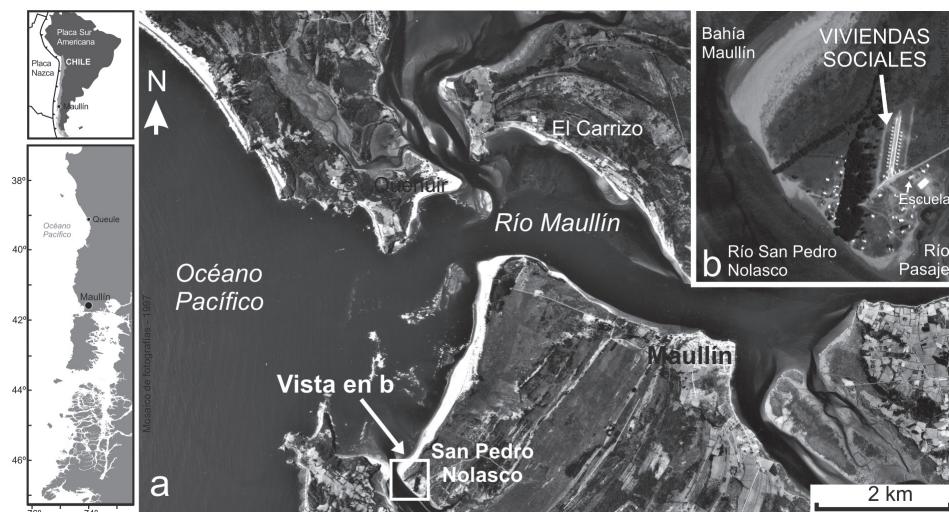


Figura 6 Tipo de viviendas sociales, materialidad y entorno



Materiales y métodos

Para evaluar si las viviendas se encuentran o no en riesgo de *tsunami* y cuantificar parámetros hidrodinámicos de la inundación que permitan estimar potencial daño, se utilizó una metodología de simulación numérica basada en el modelo no-lineal TUNAMI-N2, creado por la Universidad de Tohoku (Japón) como parte del proyecto TIME (*Tsunami Inundation Modeling Exchange*). El modelo consta de las ecuaciones de movimiento no-lineales para aguas someras, integradas verticalmente (1) y la ecuación de continuidad (2), sin el término de efecto Coriolis (Goto *et al.*, 1997):

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} MQ = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} NQ = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

En que: η = desplazamiento vertical de la superficie del agua por sobre el nivel de reposo, M y N = componentes verticalmente integradas del transporte entre unidad de ancho horizontal y vertical (flujo), g = aceleración de gravedad, $Q = (M^2+N^2)^{1/2}$ = magnitud del transporte, D = profundidad total, y $n = 0,025$, es el coeficiente de fricción de fondo de Manning.

La condición inicial del *tsunami* se determina utilizando el modelo propuesto por Mansinha y Smylie (1971) (3), el cual supone una deformación instantánea de la superficie del océano idéntica a la deformación vertical del fondo marino. Este es un modelo de ruptura sísmica, que requiere conocer los parámetros de rigidez del material en la falla, área de ruptura y deslizamiento de la falla:

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \mu U \iint \left[\left(\frac{\partial u^2}{\partial \xi_2^2} - \frac{\partial u^2}{\partial \xi_3^2} \right) \sin 2\delta - \left(\frac{\partial u^2}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u^2}{\partial \xi_3} \right) \cos 2\delta \right] d\xi_2 d\xi_3 \quad (3)$$

Donde: μ = constante elástica de Lamé $\approx 5 \times 10^{11}$ dynas/cm², U = deslizamiento del plano de falla, ui = componentes de la magnitud de la dislocación, δ = ángulo de deslizamiento del plano de falla, y ξ_2 y ξ_3 = coordenadas espaciales horizontales del plano de falla. Para la modelación del terremoto *tsunamigénico* de 1960 se utilizaron los parámetros macrosísmicos propuestos por Barrientos y Ward (1990) presentes en la Tabla 1.

La propagación del *tsunami* se simula utilizando el método de Goto y Ogawa (1992), que consiste en la integración numérica de las ecuaciones de aguas someras utilizando el método de diferencias finitas. La inundación de las zonas costeras se determina empleando la condición de frontera móvil propuesta por Iwasaki y Mano (1979). La ecuación de continuidad y las ecuaciones de movimiento se discretizan en un esquema a diferencias finitas centrales denominado "salto de rana". El dominio de integración se discretiza mediante un conjunto de grillas anidadas, siendo las más detalladas las del área de estudio con 90 m de resolución espacial.

El dominio de integración se obtuvo de Lagos y Cisternas (2007), quienes elaboran un mosaico digital topográfico y batimétrico que incluye el área de ruptura del terremoto de 1960. Con una longitud aproximada de 1.000 km desde Concepción por el norte (36°58'S), hasta la península de Taitao por el sur (46°S), y un ancho aproximado de 400 km desde el océano Pacífico (76°30'W) hasta el interior del continente (72°15'W). Los datos batimétricos integran el levantamiento realizado por Smith y Sandwell (1997) y cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). La topografía del área de estudio se obtiene mediante un levantamiento detallado de terreno con Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) Geodésicos y restitución aeroftogramétrica. El resultado es la generación de un modelo digital de elevación (MDE) de topografía y batimetría de alta resolución espacial. Toda la información es georreferenciada al elipsoide y datum WGS 1984.

Posteriormente, la topografía y batimetría de la grilla más fina, compuesta de datos actuales, es corregida a las condiciones de terreno previas al terremoto de 1960, de modo de simular fielmente el proceso de inundación producido por el *tsunami*. Considerando que el terremoto generó una subsidencia cosímica de 1,5 m en Maullín (Plafker y Savage, 1970) y que el proceso de levantamiento postsísmico no se ha manifestado de forma evidente (Youlton *et al.*, 2003), el relieve fue aumentado en la misma proporción del hundimiento registrado en 1960.

Después de cuatro horas de simulación numérica se determinan parámetros hidrodinámicos que permiten estimar el potencial daño del *tsunami* en las viviendas, considerando: las alturas máximas de *tsunami* en la costa; el área de inundación por *tsunami*; la profundidad de la inundación y la velocidad de la corriente. Los resultados de la modelación son validados con datos observados

Tabla 1 Parámetros de falla utilizados para simular el tsunami de 1960

Longitud, L (km)	Ancho, W (km)	Deslizamiento, U (m)	Rumbo, θ (grados)	Echado, δ (grados)	Ángulo, λ (grados)	Profundidad, H (km)	Lat*, (S)	Lon*, (W)	M_o (Nm)
850	130	17	7	20	105	4	45,3244	75,7233	$0,9 \times 10^{23}$

* Coordenada de esquina SW. M_o = momento sísmico

Fuente: Barrientos y Ward (1990)

del tsunami real de 1960 (Sievers et al., 1963; Atwater et al., 1999) y evidencias geológicas de la inundación (Lagos y Cisternas, 2007).

Finalmente, con el objetivo de conocer la percepción del riesgo de tsunami en viviendas sociales, se realizan entrevistas en 32 viviendas del sector Amortajado.

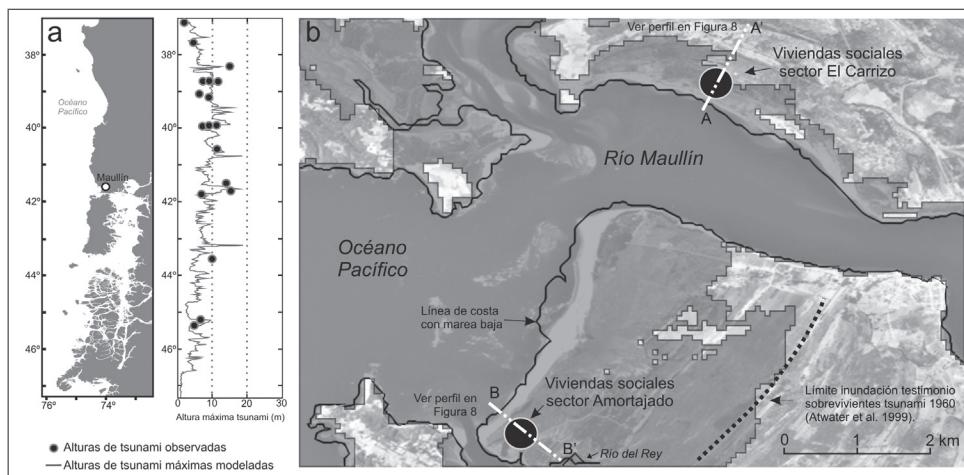
Resultados y discusión

Los resultados de la simulación numérica muestran las máximas alturas de ola registradas en la línea de costa entre el sur de Concepción y la península de Taitao (ver Figura 7a). Se observa cómo, en rangos cortos de distancia, las alturas de ola difieren en amplitud, hecho explicado por el conjunto de factores que determinan el arribo de un tsunami a la costa³. Las alturas máximas de ola modeladas presentan un buen

ajuste con las alturas de ola observadas por Sievers et al. (1963). En la bahía de Maullín, la máxima altura de ola computada alcanza los 14,5 m en la costa, en tanto, Sievers et al. (1963) indican que el nivel máximo del agua registro 14 m.

El límite de inundación obtenido por modelación en Maullín, se valida con el testimonio de sobrevivientes del tsunami real de 1960 (Atwater et al., 1999). En la Figura 7b se observa que la localización de las viviendas sociales se encuentra al interior del área de inundación. Sin embargo, el peligro es mayor en el sector Amortajado, debido a que la profundidad máxima de inundación fluctúa entre 2,8 y 4,2 m, en comparación con los 0,8 m del sector Carrizo (ver Figura 8). Considerando la materialidad de las viviendas, los efectos del tsunami serían destructores en el sector Amortajado. En tanto, en el sector El Carrizo las viviendas deberían resistir la inundación con daños menores.

Figura 7 Alturas de tsunami máximas en las costas del centro-sur de Chile y área de inundación en Maullín



³ En la costa un tsunami puede tener una amplia variedad de formas que dependen de la magnitud del fenómeno que lo induce, la dimensión y el periodo de las olas, las características batimétricas, la configuración de la costa y la situación de la marea (Wiegel, 1970).

Figura 8 Perfiles de profundidad máxima de inundación por tsunami y su relación con la localización de viviendas

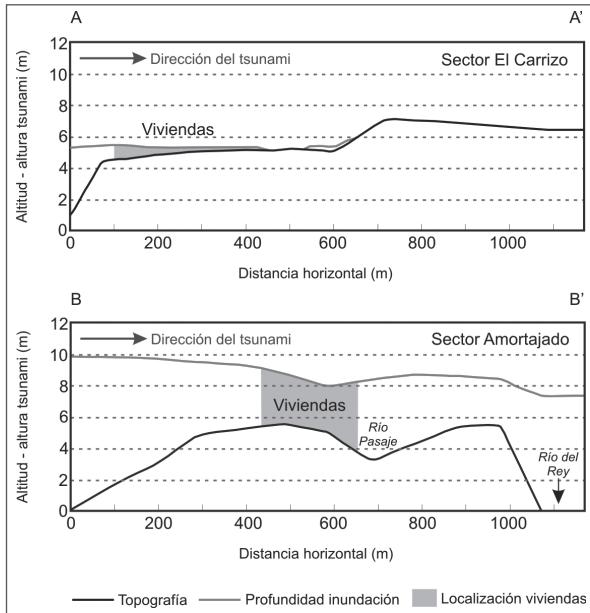


Figura 10 Depósitos de tsunami de 1960 en San Pedro Nolasco

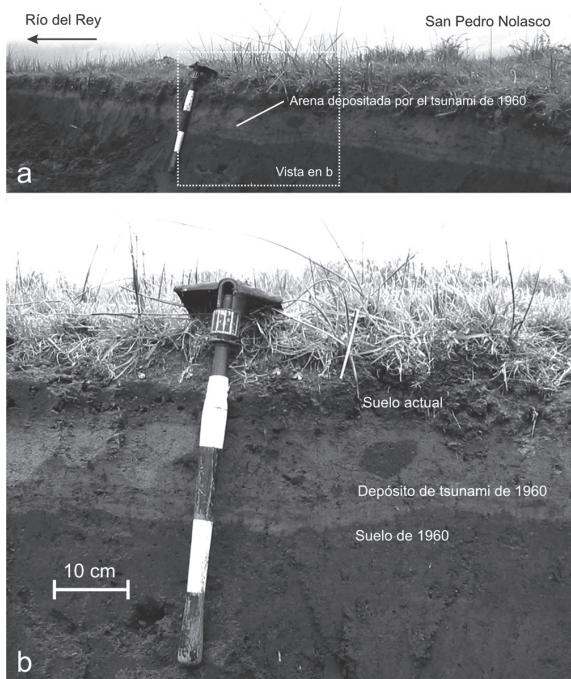
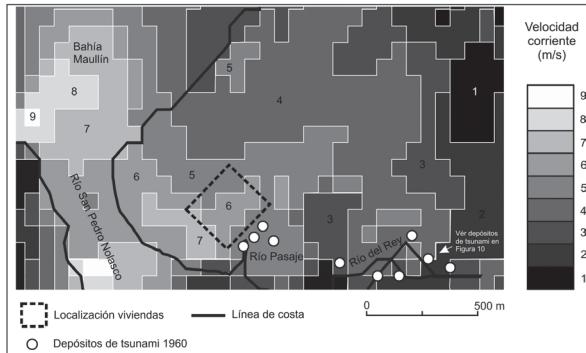


Figura 9 Máxima velocidad de la corriente del tsunami y localización de viviendas sociales



En el sector Amortajado, un segundo parámetro hidrodinámico que permite confirmar el riesgo de sus viviendas es la velocidad de la corriente. Efectivamente, en todo San Pedro Nolasco las mayores velocidades del tsunami se concentran en este sector. La Figura 9 muestra las velocidades máximas alcanzadas por el flujo, el que fluctúa entre 5 y 6 m/s en el lugar donde se emplazan las viviendas. La magnitud de la velocidad es altamente peligrosa, sobre todo si se consideran las características constructivas de las viviendas.

La Figura 10 muestra evidencias reales de la inundación producida por el tsunami de 1960 en San Pedro Nolasco, información que también permite validar los resultados de la inundación obtenida por modelación. Cuando un tsunami inunda zonas costeras bajas, tanto la energía involucrada en el proceso como la brevedad del evento generan depósitos muy distintivos de otros procesos costeros. En el área de estudio, estas evidencias se manifiestan como extensas capas de arena sobre el suelo sepultado de 1960 y bajo el suelo actual.

Considerando las máximas profundidades de inundación y velocidad de la corriente modeladas en el área de estudio, podemos confirmar el alto riesgo de tsunami que caracteriza la localización de las viviendas sociales en el sector Amortajado. Si relacionamos los parámetros hidrodinámicos máximos obtenidos, con los resultados de Koshimura y Yanagisawa (2007) después del tsunami del sudeste asiático de 2004, observaremos que la probabilidad de daño total es inminente, principalmente debido a la velocidad de la corriente (ver Figura 11).

La localización de las viviendas juega un rol clave en su elevada vulnerabilidad, efectivamente, se emplazan en un lugar que fue inundado por el tsunami de 1960,

hecho confirmado por la modelación del *tsunami*, los datos observados y las evidencias geológicas. Sin embargo, esta información no fue considerada al momento de construir las soluciones habitacionales para familias de escasos recursos. En la actualidad, después de entrevistar a sus habitantes podemos confirmar que ellos saben que se encuentran en riesgo, un 66% piensa que sus viviendas no resistirían un *tsunami*, no obstante, no tienen otra alternativa (ver Figura 12). Ciertamente, en el caso que se repitiera un escenario como el de 1960 o un equivalente a sus antecesores (Cisternas et al., 2005), independientemente que sus viviendas sean destruidas, su población ni siquiera cuenta con un sitio cercano para evacuar en caso de *tsunami*; la distancia a una zona segura (sector elevado) en el sector Amortajado se localiza a más de 2,5 km en dirección al este, evidenciándose la nula consideración de la amenaza de *tsunami* en el emplazamiento de las viviendas.

Figura 11 Probabilidad de daño en viviendas por *tsunami* – sector Amortajado

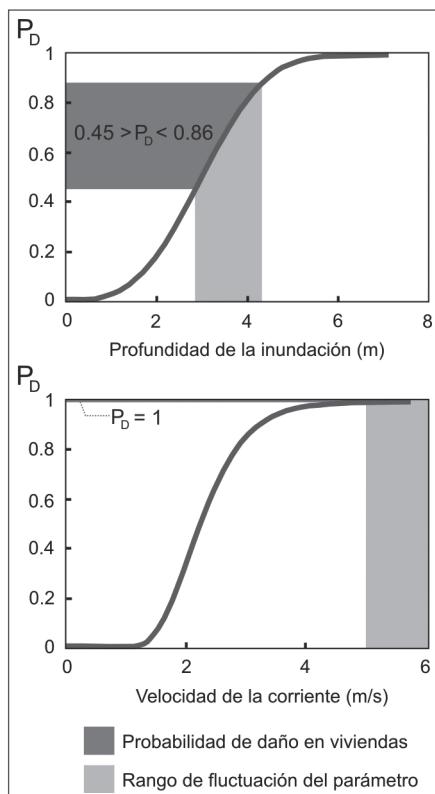
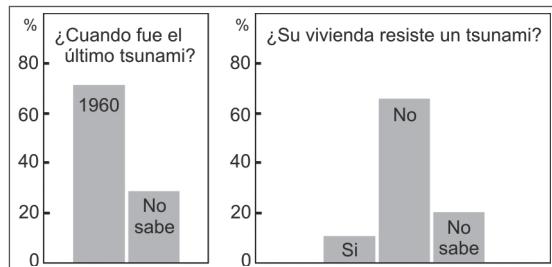


Figura 12 Conocimiento del riesgo y percepción de la resistencia de viviendas ante la amenaza de *tsunami*



Conclusiones

La construcción de viviendas sociales en áreas de riesgo de *tsunami* demuestra el desconocimiento y la falta de consideración de la recurrencia de eventos naturales extremos. Lamentablemente, Chile posee numerosos ejemplos de este hecho, evidenciando la incapacidad de aprender lecciones de eventos pasados. Solo han transcurrido casi cinco décadas del *tsunami* de 1960 y ya se han olvidado sus destructores efectos.

Mejorar la calidad de vida de los habitantes más pobres con una vivienda digna, no pasa solo por el bien material, la consideración del entorno y el emplazamiento de la vivienda juega un rol clave. Los estados de angustia asociados a la incertidumbre de vivir expuesto a algún tipo de peligro, evidentemente afectan la calidad de vida. Independiente del tamaño del proyecto inmobiliario, por muy pequeño que sea, no puede pasar por alto la historia del territorio donde se localizarán las viviendas. El costo de subestimar el pasado puede ser muy alto.

La modelación de *tsunami* permite comprender potenciales escenarios de riesgo, información que, una vez validada, se transforma en la base para reducir el riesgo de desastre. Sus resultados confirman que la amenaza de *tsunami* se comporta de forma diferenciada al interior del área de inundación. Efectivamente, si bien ambos grupos de viviendas sociales del sector Amortajado y El Carrizo se encuentran al interior del área de inundación, el riesgo es lejos superior en el sector Amortajado.

La estimación de parámetros hidrodinámicos de una inundación producida por *tsunami*, permiten evaluar potenciales daños en viviendas. Si bien en este trabajo se utilizaron funciones de fragilidad de daño de viviendas

derivadas de los efectos del gran *tsunami* de 2004, equivalente al *tsunami* chileno de 1960, es recomendable desarrollar estimaciones propias, de acuerdo a la tipología de viviendas costeras en Chile.

La amenaza de *tsunami* sobre viviendas no se debe interpretar como una restricción al desarrollo urbano y rural de las zonas costeras. Sin embargo, las lecciones aprendidas en la última década nos deben hacer reflexionar en cuanto a cómo construimos nuestras viviendas en la costa; dónde las localizamos; y cuál sería la respuesta de ellas ante la presencia de un *tsunami*. Ciertamente, se presenta toda una línea de investigación para el diseño y construcción de viviendas anti *tsunami*. No se debe olvidar que los grandes *tsunamis* son eventos poco frecuentes, sin embargo, cuando ocurren son altamente destructivos.

Agradecimientos

Agradecemos a todos los participantes en los trabajos de terreno y a la gente de Maullín. Destacamos el apoyo del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile el que nos facilitó el acceso al código para la modelación de *tsunami* (TUNAMI-N2) y nos colaboró con información batimétrica de alta resolución. Esta investigación ha sido financiada por la Vicerrectoría Adjunta de Investigación y Doctorado de la Pontificia Universidad Católica de Chile, proyecto Límite N° 01/2007 y por el proyecto FONDECYT 1060227. Los resultados publicados en este artículo forman parte de la investigación de doctorado realizada por Marcelo Lagos, en el Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, Universidad de Concepción, Chile.

Referencias

1. Andrade, M.; Aguirre, C.; Mora, M. (2007). Antecedentes para una evaluación de la satisfacción residencial de los beneficiarios del Fondo Solidario de Vivienda (FSV). Revista de la Construcción, vol. 6, N° 2, pp. 42-51.
2. Atwater, B.; Cisternas, M.; Bourgeois, J.; Dudley, W.; Hendley, J.; Stauffer, P. (1999). Surviving a Tsunami—Lessons from Chile, Hawaii, and Japan. Circular 1187 USGS, p. 18.
3. Barrientos, S.; Ward, S. (1990). The 1960 Chile earthquake: Inversion for slip distribution from surface deformation. Geophysical Journal International, vol. 103, pp. 589-598.
4. Cisternas, M.; Atwater, B.; Torrejón, F.; Sawai, Y.; Machuca, G.; Lagos, M.; Eipert, A.; Youlton, C.; Salgado, I.; Kamataki, T.; Shishikura, M.; Rajendran, CP.; Malik, J.; Rizal, Y.; Husni, M. (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. Nature, vol. 437, pp. 404-407.
5. EM-DAT (2008). Emergency Events Database [En línea]. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Université Catholique de Louvain – École de Santé Publique, Brussels, Belgium.
<http://www.emdat.be>. [10 de marzo de 2008].
6. Ferrando, A. (2002). La ciudad sin Urbanismo: instalación residencial junto a secciones andinas inestables, dunas activas, bancos de arena y rodados fluviales. Revista de Urbanismo, N° 5, p. 18.
7. Ghobarah, A.; Saatcioglu, M.; Nistorb, I. (2006). The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure. Engineering Structures, vol.28, pp. 312-326.
8. Goto, C.; Ogawa, Y. (1992). Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme. Dept. of Civil Engineering, Tohoku University. Translated for the TIME Project by N. Shuto.
9. Goto, C.; Ogawa, Y.; Shuto, N.; Imamura, F. (1997). Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. IUGG/IOC TIME Project Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides, 1997, N° 35, p. 126.
10. Gusiakov, V. (2005). Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific. Marine Geology. vol.215, N° 1-2, pp. 3-9.
11. Hidalgo, R. (2005). La vivienda social en Chile y la construcción del espacio urbano en el Santiago del siglo XX. Ed. Pontificia Universidad Católica de Chile y Centro de Investigaciones Diego Barros Arana. Santiago de Chile. p. 503.

12. Inoue, S.; Wijeyewickrema, A.; Matsumoto, H.; Miura, H.; Gunaratna, P.; Madurapperuma, M.; Sekiguchi, T. (2007). Field Survey of Tsunami Effects in Sri Lanka due to the Sumatra–Andaman Earthquake of December 26, 2004. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 164, pp. 395-411.
13. Iwasaki, T.; Mano, A. (1979). Two-dimensional numerical computation of tsunami run-ups in the Eulerian description. Twenty-sixth Conference on Coastal Engineering, Tokyo, Japan, pp. 70-74.
14. Kanamori, H. (1977). The Energy Release in Great Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, Nº 20, pp. 2981-2987.
15. Koshimura, S.; Yanagisawa, H. (2007). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using the numerical model and satellite imagery. 5th International Workshop on Remote Sensing Applications to Natural Hazards. Washington DC, pp. 1-6.
16. Kuroiwa, J. (2004). Disaster Reduction: Living in harmony with nature. Chapter 4.2: Tsunamis. Quebecor World, Lima, p. 495.
17. Lagos, M. (2000). Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 27, pp. 93-102.
18. Lagos, M.; Cisternas, M. (2007). Using tsunami deposits and observed tsunami heights to test source models of 1960 Chile earthquake. *Eos Transaction AGU*, 88(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract T43B-07.
19. Lagos, M.; Cisternas, M. (2008). El nuevo riesgo de tsunami: considerando el peor escenario. *Scripta Nova – Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, vol. XII, Nº 270 (29), pp. 1-8.
20. Mansinha, L.; Smylie, D. (1971). The displacement field of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 61, Nº 5, pp. 1.433-1.440.
21. Mardones, M.; Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológicos: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *Revista EURE*, 27 81: 97-122.
22. MINVU. (2004). Chile: un siglo de políticas en vivienda y barrio. Pehuén Editores. Santiago de Chile, p. 359.
23. Plafker, G.; Savage, J. (1970). Mechanism of the Chilean earthquakes of May 21 and 22, 1960. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 81, pp. 1.001-1.030.
24. Reese, S.; Cousins, W.; Power, W.; Palmer, N.; Tejakusuma, I.; Nugrahadi, S. (2007). Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java – field observations after the July 2006 Java tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 7, pp. 573-589.
25. Saborido, M.; Fernández, V.; Villena, M. (2006). Informe final de evaluación programa Fondo Solidario de Vivienda. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Subsecretaría. Santiago de Chile. p. 132.
26. Satake, K. (2002). Tsunamis, in W.H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, C. Kisslinger (eds.). *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, 81A, pp. 437-451.
27. Sepúlveda, S.; Rebollo, S.; Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, vol. 158, Nº 1, pp. 83-95.
28. Sheth, A.; Sanyal, S.; Jaiswal, A.; Gandhi, P. (2006). Effects of the December 2004 Indian Ocean Tsunami on the Indian Mainland. *Earthquake Spectra*, vol. 22 (S3), pp. 435-473.
29. Sievers, H.; Villegas, G.; Barros, B. (1963). The seismic sea wave of 22 may 1960 along the Chilean coast. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 53, Nº 6, pp. 1.125-1.190.
30. Shuto, N. (1993). Tsunami intensity and disasters. In *Tsunamis in the World*, S. Tinti, ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 197-216.
31. Smith, W.; Sandwell, D. (1997). Seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, vol. 277, pp. 1.957-1.962.
32. Stein, S.; Okal, E. (2005). Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature*, vol. 434, pp. 581-582.
33. UN-ISDR (2004). *Living with Risk, A global review of disaster reduction initiatives*. Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR). p.382.

34. Unesco-IOC (2006). Tsunami Glossary. IOC Information document N° 1221, UNESCO, París.
35. Veyl, C. (1961). Los sismos y las erupciones de mayo de 1960 en el sur de Chile. Boletín Sociedad Chilena de Química, vol. 11, N° 1-2, pp. 20-32.
36. Weischet, W. (1963). Further observations of geologic and geomorphic changes resulting from the catastrophic earthquake of may 1960, in Chile. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 53, N° 6, pp. 1.237-1.257.
37. Wiegel, R. (1970). Tsunamis. In Wiegel, R. ed. Earthquake engineering. Ed. Prentice-Hall, USA, pp. 253-306.
38. Youlton, C.; Atwater, B.; Cisternas, M. (2003). Westward decrease in postseismic uplift in the region of the 1960 Chile earthquake. Geological Society of America (GSA). Annual Meeting. Paper N° 238-27.