

Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile

MARCELO LAGOS LOPEZ

Instituto de Geografía
Pontificia Universidad Católica de Chile

RESUMEN

Este artículo analiza los tsunamis ocurridos en Chile, sobre la base del estudio de variables de orden físico que, relacionadas, permiten caracterizar el fenómeno. Para ello se elabora una base de datos de síntesis de los tsunamis de origen cercano a nuestras costas para el período 1562–2000, considerando la localización del evento, la magnitud (M) del sismo generador, la profundidad del hipocentro, la magnitud (m) del tsunami y la cota máxima de inundación (run-up). De este modo, se definen: frecuencia de ocurrencia, tipología de eventos sísmicos y su correlación con la magnitud del tsunami generado. Finalizando, se realiza una caracterización espacial del fenómeno, en función de su localización a lo largo del territorio de Chile continental.

ABSTRACT

This article analyzes the tsunamis happened in Chile, on the base of variables that, related, they allow to characterize the phenomenon. For it is elaborated a database synthesis from the tsunamis of near origin to our coast for the period 1562-2000, considering the event localization, generator earthquake magnitude (M), hypocenter depth, tsunami magnitude (m) and the maximum bench mark of flood (run-up). This way, they are defined occurrence frequency, seismic events type and their correlation with the magnitude of the generated tsunami. Concluding, is carried out a space characterization of the phenomenon, in function of their localization along the continental territory of Chile.

INTRODUCCION

En la relación de la dinámica de procesos naturales y la localización de actividades del hombre, los *tsunamis* se encuentran entre los más terribles y complejos fenómenos físicos. Son eventos naturales extremos, poco frecuentes, pero de rápida generación, responsables de numerosas pérdidas de vidas y extensa destrucción en localidades costeras.

Existe consenso para designar con la palabra *tsunami* a aquel fenómeno que ocurre en el mar, generado principalmente por un disturbio sísmico que impulsa y desplaza verticalmente la columna de agua originando un tren de ondas largas, con un período que va de varios minutos hasta una hora, que se propaga a gran velocidad en todas direcciones desde la zona de origen, y cuyas olas al aproximarse a las costas alcanzan alturas de grandes proporciones, descargando su energía sobre ellas con gran poder, infligiendo una vasta destrucción e inundación. (Wiegel, 1970; Iida e Iwasaki, 1983; SHOA, 1984; ITSU, 1999).

Los *tsunamis* de origen cercano son aquellos cuyos focos generadores se localizan próximos a la línea de costa. Estos son los principales responsables de daños en Chile y sus efectos pueden alcanzar distantes territorios litorales de la

cuenca del Océano Pacífico. Por el contrario, *tsunamis* generados en regiones lejanas del Pacífico, no han causado impacto en el borde costero nacional.

En Chile, desde la Colonia existen antecedentes de *tsunamis* y de sus devastadores efectos. Numerosos autores han recopilado esta información con fines complementarios. El contar con información base, lo más detallada posible, es clave al momento de realizar cualquier estudio que involucre el fenómeno *tsunami*.

Este artículo tiene como objetivo presentar una caracterización general actualizada de los *tsunamis* de origen cercano que han afectado las costas de Chile.

LA AMENAZA DE TSUNAMI

La constante amenaza de *tsunami* sobre las costas de nuestro territorio, se sustenta por la localización geográfica de Chile frente a una zona de subducción cortical, proceso que involucra la generación de sismos. Los terremotos son el principal mecanismo generador de estas ondas, siempre y cuando presenten magnitudes superiores a 6,5 en la *escala de Richter*; hipocentros superficiales (inferiores a 60 km) y epicentros oceánicos

y continentales cercanos, a la línea de costa¹ (Iida, 1983). A medida que aumenta la magnitud (M) de un terremoto, y/o disminuye la profundidad del foco, la magnitud (m) del *tsunami* se incrementa, y sus efectos se verán potenciados por las características batimétricas, distancia del epicentro a la línea de costa y su configuración; estado de la marea y morfología de la topografía en superficie, incluyendo pendientes y grado de rugosidad derivado de construcciones, árboles y otros obstáculos en tierra.

En nuestro país, el riesgo de *tsunami* toma relevancia al momento de considerar el continuo crecimiento urbano y rural de localidades costeras, donde la tendencia a urbanizar zonas muy próximas al mar, se caracteriza por su escasa planificación y ordenamiento objetivo en función de tal amenaza. Por otra parte, *tsunamis* históricos que han azotado nuestras costas son el fiel reflejo de procesos tectónicos recurrentes en el tiempo. De estos, destaca el evento de mayo de 1960, el cual cobró 2.000 vidas y pérdidas evaluadas en 550 millones de dólares (SHOA, 2000), sin considerar el impacto y los daños generados en las costas de California, Hawaii, Japón e islas de Oceanía.

La preocupación por el estudio de los *tsunamis*, en varios lugares del mundo, últimamente se ha visto potenciada debido a las recientes consecuencias destructivas que han tenido fenómenos de esta naturaleza. La década de los noventa presentó doce eventos de importante magnitud; cuyas consecuencias tuvieron un saldo de 4.347 pérdidas de vidas y más de un millón de dólares en daños a la propiedad (ITSU, 1999). La tabla 1 muestra una síntesis de *tsunamis* destructivos ocurridos en el período 1975–2000. En ella, se observa que la mayoría de los eventos se han producido en el límite de las regiones costeras de Asia oriental y Oceanía; este hecho se asocia a la importante densidad de bordes de placas convergentes existentes en el área y al ambiente de islas predominantes. Además, las costas americanas no han estado exentas de estos eventos, concentrándose la actividad generadora de *tsunamis* en la zona de convergencia de la Placa de Cocos con las Placas Norteamericana y del Caribe, afectando las costas de México (1995) y Nicaragua (1992). En tanto, la zona de subducción que involucra a las Placas de Nazca y

Sudamericana ha producido dos eventos de importancia, afectando las costas de Perú (1996) y Colombia (1979).

Tabla 1

Tsunamis destructivos período 1975-2000

Fecha			Localización	N° muertes estimadas
día	mes	año		
29	11	1975	Hawai, USA	2
17	08	1976	Filipinas	8.000*
19	08	1977	Indonesia	189
18	07	1979	Indonesia	540
12	09	1979	Nueva Guinea	100
12	12	1979	Colombia	500
26	05	1983	Mar de Japón	100
02	09	1992	Nicaragua	168
12	12	1992	Isla Flores, Indonesia	1.000
12	07	1993	Isla Okushiri, Japón	230
03	06	1994	Java, Indonesia	222
04	10	1994	Isla Shikotan, Rusia	11
14	11	1994	Filipinas	74
09	10	1995	Manzanillo, México	1
01	01	1996	Sulawesi, Indonesia	9
17	02	1996	Irian Jaya, Indonesia	110
23	02	1996	Perú	12
17	07	1998	Papua Nueva Guinea	2.500
26	11	1999	Vannuatu	10

* El número de muertes puede incluir víctimas del terremoto.

Fuente: Modificado de ITSU, 1999.

ANTECEDENTES

El conocimiento detallado de estadísticas de *tsunamis* ocurridos en Chile, es una labor prioritaria para cualquier estudio de riesgo costero. Se debe considerar que este trabajo se ve condicionado por los antecedentes históricos registrados, existiendo información a partir del año 1562. También, producto de la extensión del litoral chileno, la estrechez de planicies litorales y la gradual localización de asentamientos humanos, existe una importante probabilidad que eventos locales hayan afectado lugares no habitados y, por lo tanto, no existen registros de sus consecuencias.

Por otra parte, una mínima caracterización de *tsunami* implica poseer antecedentes respecto a la localización del epicentro del sismo generador, magnitud del sismo, profundidad del hipocentro, alturas de ola y su período, localidades afectadas, además de los daños y número de muertes, entre otros. Se debe considerar que gran parte de la información requerida se basa en instrumentos y tecnología que en Chile recién comienzan a ins-

¹ Iida postula que para terremotos de hipocentros poco profundos (inferiores a 60 km.), con magnitudes inferiores de 6,4 en la escala de Richter es improbable el desarrollo de un *tsunami*, mientras que magnitudes superiores a 7,75 en la misma escala pueden originar *tsunamis* de alto riesgo.

talarse en la primera década del 1900. Por lo tanto, todos los eventos anteriores a esta fecha se caracterizan sobre la base de estimaciones derivadas de la intensidad del sismo registrado.

En nuestro país, desde hace tres décadas, se han elaborado listados de *tsunamis* ocurridos en Chile. Lomnitz en 1970 realiza un listado de *tsunamis* históricos originados frente al litoral chileno estimando las magnitudes (M) de los sismos generadores. Godoy en 1975 completa las descripciones y les asigna la magnitud (m) o grado de *tsunami* en la escala de Inamura. Pilasi (1978) agrega cinco *tsunamis* a la lista de Godoy. El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA, 1984-1995) publica un listado de 106 *tsunamis*, incluidos *tsunamis* que no produjeron daños. Monge en 1993 basado en el trabajo de Godoy y Pilasi, publica un listado de *tsunamis* generadores de daño y los ordena en función de la actual división política administrativa. Lorca *et al.* (1994) realiza un listado de sismicidad histórica incluyendo en sus efectos la intensidad del sismo y si realmente generó *tsunami*.

A escala global existen notables esfuerzos de instituciones que poseen completas bases de datos en línea relacionadas con eventos naturales extremos, es el caso del *National Geophysical Data Center* (NGDC), el cual cuenta con registros de *tsunamis* entre el 2000 a.C. y 1997 d.C. para todo el mundo, incluido Chile.²

Si bien existe una clara oferta de antecedentes de *tsunamis*, se debe considerar que no todos poseen el mismo número de registros o la misma cantidad de campos de información. Además, numerosos eventos carecen de los datos requeridos por cada campo predefinido. De este modo, la combinación y el complemento de diversas fuentes, permite elaborar una base de datos estándar para caracterizar el fenómeno en estudio.

METODOLOGIA

Para realizar la caracterización del fenómeno *tsunami* se elabora una base de datos síntesis, sustentada en las siguientes fuentes de información:

1. Listado de *tsunamis* generadores de daño, elaborado por Monge en 1993. Esta lista sintetiza y complementa el trabajo realizado por Lomnitz

(1970), Godoy (1975) y Pilasi (1978). En ella se presentan los siguientes campos de información: ubicación (región administrativa), fecha, grado (m) del *tsunami* y magnitud Richter (M) del sismo en rangos aproximados. El número de registros alcanza 35 eventos, entre 1562 y 1960.

2. Listado de sismicidad histórica, elaborado por Lorca *et al.* en 1994. Esta lista se presenta ordenada en función de zonas sísmicas de norte a sur, donde se localizan sismos con magnitudes superiores a 7,0 en la escala de Richter. Considera los siguientes campos de información: fecha, latitud y longitud (formato decimal), magnitud del sismo y efectos, en este último campo se menciona la intensidad del sismo y cuando corresponde, la existencia de un *tsunami*, clasificándolos como importante, mediano, pequeño, local y dudoso. El número de registros generadores de *tsunami* alcanza 46 eventos, entre 1562 y 1985.
3. Relación de los principales maremotos que han afectado a la costa de Chile, elaborado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile en 1995. Listado ordenado cronológicamente. Considera los siguientes campos de información: fecha, hora GMT, latitud y longitud (formato decimal), magnitud Richter (M) del sismo, profundidad en km., lugar de observación, altura de la ola y consecuencias. Posee 105 registros entre 1570 y 1985.
4. *Tsunami Event Database*, mantenida por el *National Geophysical Data Center* (Colorado, USA). Base de datos en línea que posee un sistema de búsqueda sobre la base de coordenadas geográficas norte-sur y este-oeste. El rango considerado para identificar *tsunamis* de origen cercano a las costas de Chile fue entre los 17,5° y 56° de Latitud Sur y entre los 70° y 76° de Longitud Oeste. Además se indica la causa de origen del evento, para este trabajo sólo se consideraron eventos generados por terremotos. Esta base de datos abarca los siguientes campos: daños, fecha, hora, latitud y longitud del terremoto (formato decimal), magnitud del terremoto, profundidad en km., *run-up* (cota máxima de inundación), magnitud del *tsunami* en la escala de Iida³, intensidad del *tsunami* en la escala de Soloviev⁴, probabilidad del even-

² Para mayor información visitar <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/tsu.html>

³ La magnitud del tsunami es definida por Iida *et al.* (1967) como $m = \log 2 h$, donde "h" es la máxima altura de inundación en superficie (*run-up*).

⁴ La intensidad de tsunami es definida por Soloviev y Go (1974) como $I = \log 2/2 h$, donde "h" es la máxima altura de inundación en superficie (*run-up*).

Tabla 2

Escala de grados de *tsunami* según Inamura e Iida

Grado <i>tsunami</i> <i>m</i>	Altura de la ola (m)	Cota máxima de inundación <i>r</i> (m)	Descripción de los daños
0	1 - 2	1 - 1.5	No produce daños.
1	2 - 5	2 - 3	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5 - 10	4 - 6	Hombres, barcos y casas son barridos.
3	10 - 20	8 - 12	Daños extendidos a lo largo de 400 km de la costa.
4	> 30	16 - 24	Daños extendidos sobre más de 500 km a lo largo de la línea costera.

Fuente: Monge, 1993.

to, causa del evento, número de muertes, área de localización, referencias y comentarios. Presenta 98 registros, entre 1562 y 1997.

El criterio para definir los campos de información de la base de datos síntesis, se basó en la existencia y similitud de antecedentes de las fuentes. Los campos utilizados fueron los siguientes: año, día, mes, latitud, longitud, magnitud del sismo, profundidad del hipocentro, magnitud del *tsunami* y *run-up*.

Los campos definidos se caracterizaron de la siguiente forma: la latitud y longitud se expresa en formato decimal y corresponde a la localización del epicentro del sismo generador del *tsunami*. La magnitud del sismo se expresa en ondas superficiales (*M_s*) y existe una incertidumbre de un cuarto de grado o más, especialmente para los eventos ocurridos antes del año 1900. La profundidad del hipocentro se expresa en kilómetros. La magnitud del *tsunami* se basa en la escala de grados, según Inamura (1949) e Iida (1963) descrita por Monge en 1993 (ver tabla 2). El *run-up* se expresa en metros y corresponde al lugar de la costa donde los efectos del *tsunami* son máximos.

Posteriormente, mediante técnicas estadísticas se relacionan variables tales como: magnitud *M* del sismo, magnitud *m* del *tsunami* y cota máxima de inundación (*run-up*).

Finalizando, se realiza una caracterización espacial del fenómeno *tsunami*, en función de su localización a lo largo del territorio de Chile continental. Para ello, la información fue introducida y analizada en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

RESULTADOS GENERALES

Se genera una base de datos estándar con 102 registros de *tsunamis* de origen cercano para el

período 1562-1997 (ver tabla 3). Todos los eventos presentan fecha y localización en coordenadas geográficas. Un 92% posee la magnitud *M* del sismo generador y un 62% la profundidad del hipocentro. Cada registro tiene asignada su magnitud de *tsunami* *m* y un 38% presenta su cota máxima de inundación (*run-up*).

Frecuencia de *tsunami*

Desde mediados del siglo XVI que existen antecedentes de *tsunami* en las costas de Chile (ver gráfico 1). Durante el período de 1550 al año 1800 se registran trece eventos cada quince años en promedio. En este tramo, claramente se identifican destructores *tsunamis*, situación que favorece el registro histórico. Predominan los eventos *m*=3 y se destaca el *tsunami* de 1730 con un *m*=4. Para el período 1800-1900 se incrementan los registros a 21 eventos, caracterizándose este tramo por la ocurrencia de más de un *tsunami* en un mismo año, es el caso de los eventos de 1849, 1868, 1869, y 1871. Sobresalen los devastadores *tsunamis* de 1868 y 1877 con magnitudes *m*=4. Durante el período 1900-octubre de 2000 los registros son de 68 *tsunamis*, predominando eventos que no produjeron daños, este aumento se justifica por la existencia de instrumental capaz de detectarlos. Sobresale el *tsunami* de 1922 y el destructor evento de mayo de 1960.

Del total de *tsunamis* sólo un 3,9% presenta magnitud *m*=4, representado por los eventos de 1730, 1868, 1877 y 1960. Por el contrario, los eventos *m*=0 representan un 64,7% incrementándose sus registros desde 1900 en adelante (ver gráfico 2).

En la tabla 4 se observa que los *tsunamis* de *m*=0 poseen la mayor frecuencia de ocurrencia (*F_o*) y probabilidad observada (*P_o*), presentándose cada 5,6 años con una probabilidad del 65%.

Tabla 3

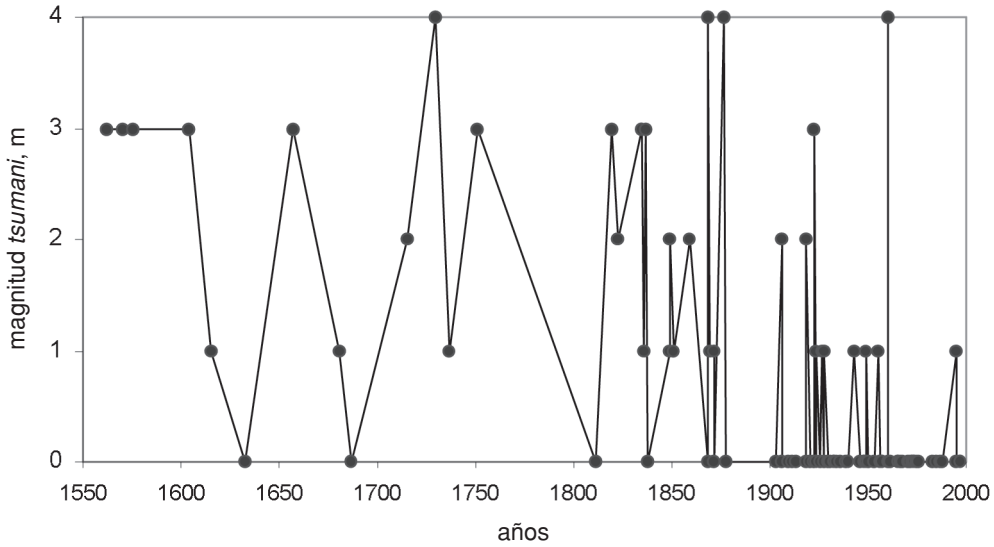
Base de datos estándar de registros de tsunamis

Nº	Año	Día/ Mes	Lat S	Lon W	M	Prof (km)	m Ts	Run-up (m)	Fuente				Nº	Año	Día/ Mes	Lat S	Lon W	M	Prof (km)	m Ts	Run-up (m)	Fuente				
1	1562	28 10	-38,0	-73,5	8,0		3	16	1	2	4	52	1927	21 11	-44,6	-73,0	7,1	33	1	2,8	1	2	3	4		
2	1570	08 02	-37,0	-73,0	8,5		3	4	1	2	3	4	53	1928	20 11	-22,5	-70,5	7,1	33	0				3	4	
3	1575	16 12	-39,8	-73,2	8,5		3		1	2	3	4	54	1928	01 12	-35,0	-72,0	8,4	25	1		1	2	3	4	
4	1604	24 11	-17,9	-70,9	8,4		3		1	2	3		55	1930	28 12	-28,5	-71,0	6,0	33	0	1			3	4	
5	1615	16 09	-18,6	-71,0	7,5	40	1	4	1	2	3	4	56	1931	18 03	-32,5	-72,0	7,1	33	0				3	4	
6	1633	14 05	-41,8	-74,0			0				2		57	1933	23 02	-20,0	-71,0	7,6	40	0			2	3	4	
7	1657	15 03	-37,0	-73,0	8,0		3	8	1	2	3	4	58	1934	04 12	-19,5	-69,5	6,9	130	0				3	4	
8	1681	10 03	-18,5	-70,3	7,5		1		1		3	4	59	1936	13 07	-24,5	-70,0	7,3	60	0	1		2	3	4	
9	1687	12 07	-32,8	-70,7	7,3		0				3	4	60	1939	25 01	-36,3	-72,3	8,3	60	0			3	4		
10	1715	22 08	-18,5	-70,4	7,5		2		1	2	3	4	61	1939	18 04	-27,0	-70,5	7,4	100	0				3	4	
11	1730	08 07	-32,5	-71,5	8,7		4	16	1	2	3	4	62	1940	04 10	-22,0	-71,0	7,3	75	0			2	3	4	
12	1737	24 12	-43,0	-74,0	7,5		1		1		4		63	1940	11 10	-41,5	-74,5	7,0	33	0				3	4	
13	1751	25 05	-36,8	-74,0	8,0		3	3,5	1	2	3	4	64	1943	06 04	-30,8	-73,3	8,3	33	1	1	1	2	3	4	
14	1811	19 11	-33,0	-71,4			0				2		65	1946	02 08	-26,5	-70,5	7,9	60	0				3	4	
15	1819	11 04	-27,0	-71,5	8,5		3		1	2	3	4	66	1948	26 12	-22,5	-69,0	7,0	100	0	0,7		2	3	4	
16	1822	19 11	-33,0	-71,6	8,5		2	3,5	1	2	3	4	67	1949	20 04	-38,0	-73,5	7,3	70	0				3	4	
17	1835	20 02	-36,8	-73,0	8,2		3	15	1	2	3	4	68	1949	17 12	-54,0	-71,0	7,7	33	1	0,7	1	2	3	4	
18	1836	03 07	-22,6	-70,3	7,5		1	2	1	2	3	4	69	1950	30 01	-53,5	-71,5	7,0	33	0				3	4	
19	1837	07 11	-42,5	-74,0	8,5		3		1	2			70	1953	06 05	-36,5	-72,5	7,6	60	0				3	4	
20	1838	07 05	-36,7	-73,3			0				2		71	1955	19 04	-30,0	-72,0	7,1	33	1	3	1	2	3	4	
21	1849	18 11	-30,0	-71,5	6,7		1				4		72	1956	08 01	-19,0	-70,5	7,1	55	0				3	4	
22	1849	17 12	-29,9	-71,4	7,5		2	5	1	2	3	4	73	1956	18 12	-25,5	-71,0	7,0	33	0				3	4	
23	1851	26 05	-27,0	-71,6	7,2		1	3	1	2	3	4	74	1957	29 07	-23,5	-71,5	7,0	33	0				3	4	
24	1859	05 10	-27,0	-70,0	7,7		2		1	2	3	4	75	1960	21 05	-37,5	-73,5	7,3	33	0			2	3	4	
25	1868	14 09	-36,7	-73,2			0				2		76	1960	22 05	-39,5	-74,5	8,7	33	4	25	1	2	3	4	
26	1868	16 10	-33,1	-71,7			0				2		77	1960	01 11	-38,5	-75,1	7,2	55	0				3	4	
27	1868	13 08	-18,6	-71,0	8,5	33	4	15	1	2	3	4	78	1961	18 10	-36,7	-73,0	6,5	15	0				3	4	
28	1869	24 08	-18,6	-70,0	6,8		1	2			4		79	1965	23 02	-25,7	-70,5	7,0	80	0				3	4	
29	1869	24 08	-19,6	-70,2	7,4		1		1	2	3	4	80	1965	22 03	-31,9	-71,5	6,0	58	0				3	4	
30	1871	25 03	-35,0	-72,5	7,5		1	1	1	2	4		81	1965	03 10	-42,9	-75,2	6,5	31	0				3	4	
31	1871	05 10	-20,1	-71,3	7,5		0				3	4	82	1966	28 12	-25,5	-70,7	7,5	32	0	1			3	4	
32	1871	28 12	-41,5	-73,0			0				2		83	1967	15 11	-28,7	-71,2	6,2	15	0				3	4	
33	1877	09 05	-21,0	-70,3	8,5		4	21	1	2	3	4	84	1967	20 12	-21,7	-69,5	7,5	0	0,7				4		
34	1878	14 02	-36,8	-73,0			0				2		85	1967	21 12	-21,8	-70,0	7,3	33	0	0,7		2	3	4	
35	1903	07 12	-28,5	-71,0	6,5	33	0	0,7			3	4	86	1970	14 06	-52,0	-73,8	6,6	10	0				3	4	
36	1906	16 08	-33,0	-72,0	8,6	25	2	3,6	1	2	3	4	87	1970	19 06	-22,2	-70,5	7,0	52	0				3	4	
37	1906	26 12	-18,0	-71,0	7,0	33	0				3		88	1970	28 11	-20,9	-69,8	6,0	33	0				3	4	
38	1909	08 06	-25,0	-73,0	7,6	33	0				3	4	89	1971	08 07	-32,5	-71,2	6,6	58	0	1,2			3	4	
39	1911	15 09	-20,0	-72,0	7,3		0				3	4	90	1972	08 06	-30,5	-71,8	6,6	39	0				3	4	
40	1913	28 07	-17,0	-74,0	7,0		0				3		91	1972	29 12	-30,6	-71,0	6,0	60	0				3	4	
41	1913	06 08	-17,0	-74,1	7,9	33	0				3		92	1973	05 10	-32,9	-71,9	6,5	14	0	0,4			3	4	
42	1918	20 05	-28,5	-71,5	7,9	80	0				3	4	93	1974	20 08	-38,1	-73,5	7,0		0				3		
43	1918	04 12	-26,0	-71,0	7,5	33	2	5	1	2	3	4	94	1975	13 03	-26,0	-75,0	6,7		0				3	4	
44	1920	20 08	-38,0	-73,5	7,0	15	0	1,4			2	3	4	95	1975	10 05	-35,7	-74,6	7,8		0				3	
45	1922	06 01	-16,5	-73,0	7,2	33	0				3		96	1983	04 10	-26,5	-70,6	7,4	15	0	0,4		2	3	4	
46	1922	07 11	-28,0	-72,0	7,0	33	0				3	4	97	1985	03 03	-33,9	-71,6	7,8	33	0	0,6		2	3	4	
47	1922	10 11	-28,5	-70,0	8,3	25	3	9	1	2	3	4	98	1987	05 03	-24,5	-70,2	7,3	62	0	0,2			4		
48	1923	17 02	-35,3	-72,4			0				2		99	1988	05 02	-24,8	-70,0	6,7	37	0				4		
49	1923	07 05	-28,8	-71,8	7,0	60	1			1	3		100	1995	30 07	-23,4	-70,5	7,8	33	1	3			4		
50	1925	15 05	-26,0	-71,5	7,1	50	0				3	4	101	1995	01 11	-28,7	-71,3	6,3	20	0	0,1			4		
51	1926	09 12	-28,0	-71,0	6,0	33	0	1,5			3	4	102	1997	15 10	-30,9	-74,4	6,8	74	0				4		

Fuentes: 1 Monge, 1993.
 2 Lorca et al., 1994.
 3 SHOA 1995.
 4 NGDC, 2000.

Gráfico 1

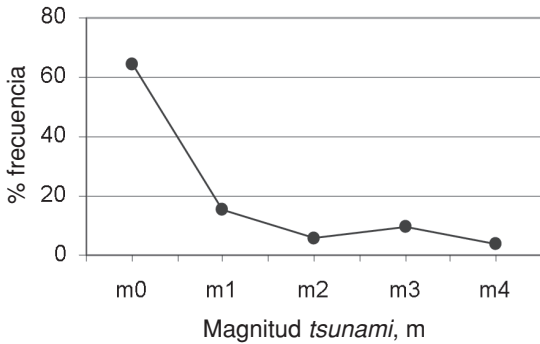
Cronología de *tsunamis* en función de su magnitud *m* para el período 1562-2000 (102 eventos)



Fuente: Elaboración propia con datos de Tabla 3.

Gráfico 2

Frecuencia de *tsunamis* en función de su magnitud *m*. (102 eventos)



Fuente: Elaboración propia con datos de Tabla 3.

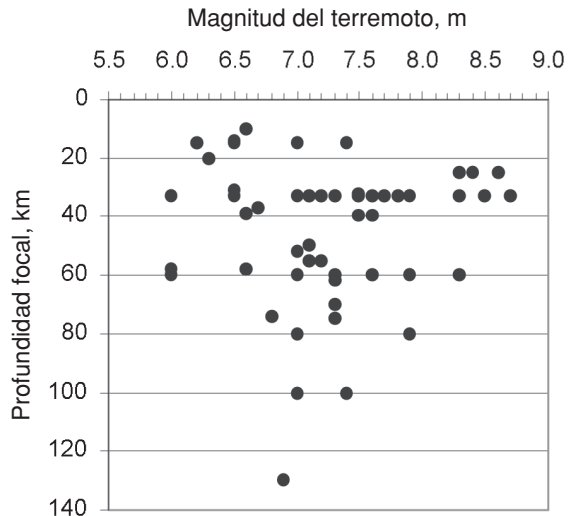
Al contrario, los temidos *tsunamis* magnitud cuatro muestran el menor rango de F_0 con 67,5 años y una P_0 de 4%. Este hecho ratifica la baja frecuencia de eventos destructores.

Relación sismo-foco

Las magnitudes de sismos generadores de *tsunami* varían entre 6,0 y 8,7 M_s y la profundidad de los hipocentros fluctúan entre los 15 y 130 km. La relación entre la magnitud M de terremo-

Gráfico 3

Relación entre la magnitud M de terremotos generadores de *tsunami* y su profundidad focal (63 eventos)



Fuente: Elaboración propia con datos de Tabla 3.

tos generadores de *tsunami* y su profundidad focal (gráfico 3) indica la concentración mayoritaria de eventos a profundidades inferiores a los 60 km. En el gráfico 4 se observa que a medida que aumenta la magnitud de *tsunamis* generadores de

Tabla 4

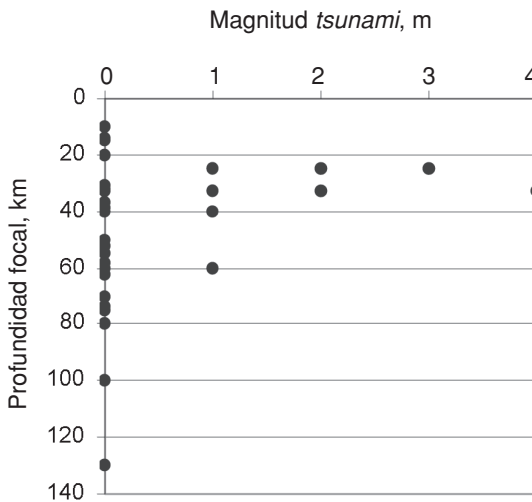
Frecuencia de ocurrencia y probabilidad observada de *tsunamis* en Chile

Magnitud <i>Tsunami</i> <i>m</i>	N° Eventos	Tiempo* (Años)	Frecuencia de Ocurrencia	Probabilidad Observada
4	04	270 (1730-2000)	67.5	0.04
3	10	438 (1562-2000)	43.8	0.10
2	06	285 (1715-2000)	47.5	0.06
1	16	385 (1615-2000)	24.1	0.15
0	66	367 (1633-2000)	05.6	0.65
Total	102			1.00

* El tramo considera hasta octubre de 2000.

Gráfico 4

Relación entre la magnitud de *tsunami* *m* y la profundidad focal del sismo generador (63 eventos)



Fuente: Elaboración propia con bases de datos de Tabla 3.

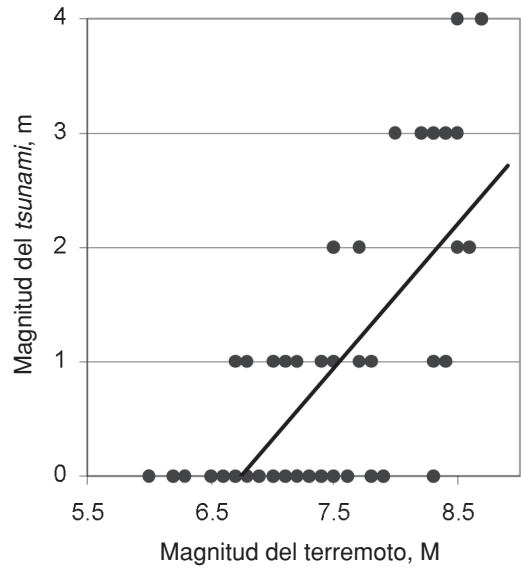
daño ($m=1-4$), disminuye la profundidad del foco. Los *tsunamis* $m=0$ se asocian a sismos con focos en un amplio rango de profundidades (15-130 km), se debe considerar que este tipo de eventos no produce daños.

Relación sismo-*tsunami*

Al relacionar la magnitud de los *tsunamis* *m* ocurridos en Chile con la respectiva magnitud del terremoto generador *M* (ver gráfico 5), se evidencia una positiva correlación ($r = 0,72$) que indica la dependencia entre la magnitud del sismo y la

Gráfico 5

Relación entre la magnitud del terremoto *M* y la del *tsunami* *m* (94 eventos)



Fuente: Elaboración propia con datos de Tabla 3.

magnitud del *tsunami*. Pero, debido a que *tsunamis* de escasa magnitud se presentan en un amplio rango *M*, el análisis de regresión implica una línea de tendencia poco representativa para determinadas regiones del país ($m=1.260 M-8.4904$). Esta situación indica la clara existencia de macrozonas propensas a la generación de *tsunamis* con sus propios atributos, sean estos función de sus características tectónicas, batimétricas y de configuración del borde costero. Es el caso de la ciudad de Arica (al norte de Chile), que tiene una historia de sismos generadores de destructivos

tsunamis que va desde 1604 a 1877, con un total de ocho eventos, y que presentan una fuerte correlación ($r = 0.97$) al igual que su línea de tendencia ($m=2,61 M - 18,37$).

Relación *tsunami-run-up*

Las mayores cotas de inundación producto de *tsunamis*, alcanzan los 25 m. sobre la línea de costa y se atribuyen a eventos de magnitud cuatro y estos últimos, presentan *run-up* que fluctúan entre los 15 y 25 m. El gráfico 6 presenta 39 eventos con registros de cota máxima de inundación alcanzada en superficie (*run-up*) y su relación con la magnitud m del *tsunami*. Si bien el aumento es similar a la cota máxima de inundación definida en la escala de grados de Inamura-Iida, existen diferencias para los eventos $m=1$ y $m=3$, los cuales sobrepasan los rangos predefinidos por la mencionada escala.

Localización de *tsunamis*

En el mapa 1 se observa la localización de sismos generadores de *tsunami* de magnitud m , se evidencia la alineación norte-sur coincidente con la zona de subducción y la clara existencia de *tsunamis* producidos por sismos con epicentros marítimos y continentales; estos últimos se concentran principalmente en áreas cercanas al borde costero y producen *tsunamis* de menor magnitud que los generados en el fondo oceánico. La acti-

vidad generadora de *tsunamis* se extiende desde los 17° 50' de Latitud Sur (LS) en el litoral del extremo norte hasta los 45° LS, presentándose zonas diferenciadas a lo largo de la línea de costa. Desde los 45° LS al extremo meridional de los 56° LS, la actividad tectónica generadora de *tsunamis* desaparece, presentándose eventos puntuales de carácter local.

Zona Norte

De norte a sur se observan claras zonas de actividad generadora de *tsunamis*. Entre los 17° 50' y los 21° de LS se localizan históricos *tsunamis* y destructores eventos del siglo XIX que afectaron la I Región, como son los eventos de 1604 ($m=3$), 1715 ($m=2$), 1868 y 1877 (ambos $m=4$).

La zona comprendida entre los 21° y 26° LS (II Región), se caracteriza por la escasa generación de *tsunamis*, se destacan los eventos de 1836 y 1995 (ambos $m=1$), complementados de *tsunamis* con magnitud $m=0$ de epicentro oceánico y continental.

Zona Central

Entre los 26° y 34° LS (III, IV, y V Regiones) se presenta una nutrida historia de *tsunamis*, donde los eventos destructores se caracterizan por haber sido generados por terremotos con magnitudes superiores a los 8,5 Ms, y mayoritariamente epicentros marítimos. Importantes son el *tsunami* de 1730 con magnitud $m=4$, cuatro eventos en el siglo XIX ($m=3-2$) y tres eventos en el siglo XX ($m=3-2$), donde destaca el *tsunami* del 7 de noviembre de 1922.

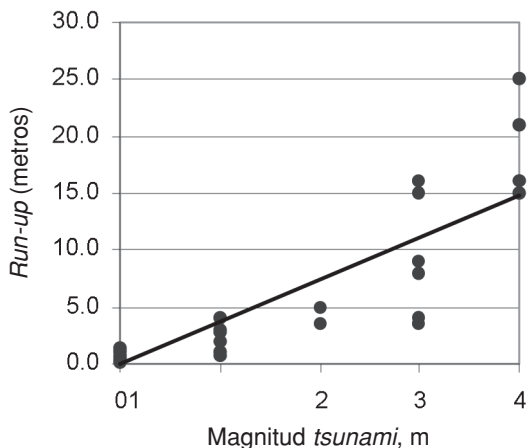
La zona comprendida entre los 34° y 36° LS (VI y VII Regiones) manifiesta una ausencia de actividad generadora de *tsunami*, localizándose en este tramo sólo cuatro eventos de menor magnitud. Sobresalen los *tsunamis* de 1871 y 1928, ambos con $m=1$ y epicentros en los 35° de Latitud Sur.

Zona Sur

Entre los 36° y los 41° LS se localizan los primeros registros de *tsunami* que existen en Chile, se presentan destructivos *tsunamis*, todos generados por terremotos de magnitud sobre 8 Ms. Se destaca la concentración de actividad en el Golfo de Arauco con tres eventos de magnitud $m=3$. Sobresale el devastador *tsunami* de 1960, producido por un terremoto 8,7 Ms, con epicentro oceánico localizado a los 39° 30' LS y 74° 30' de

Gráfico 6

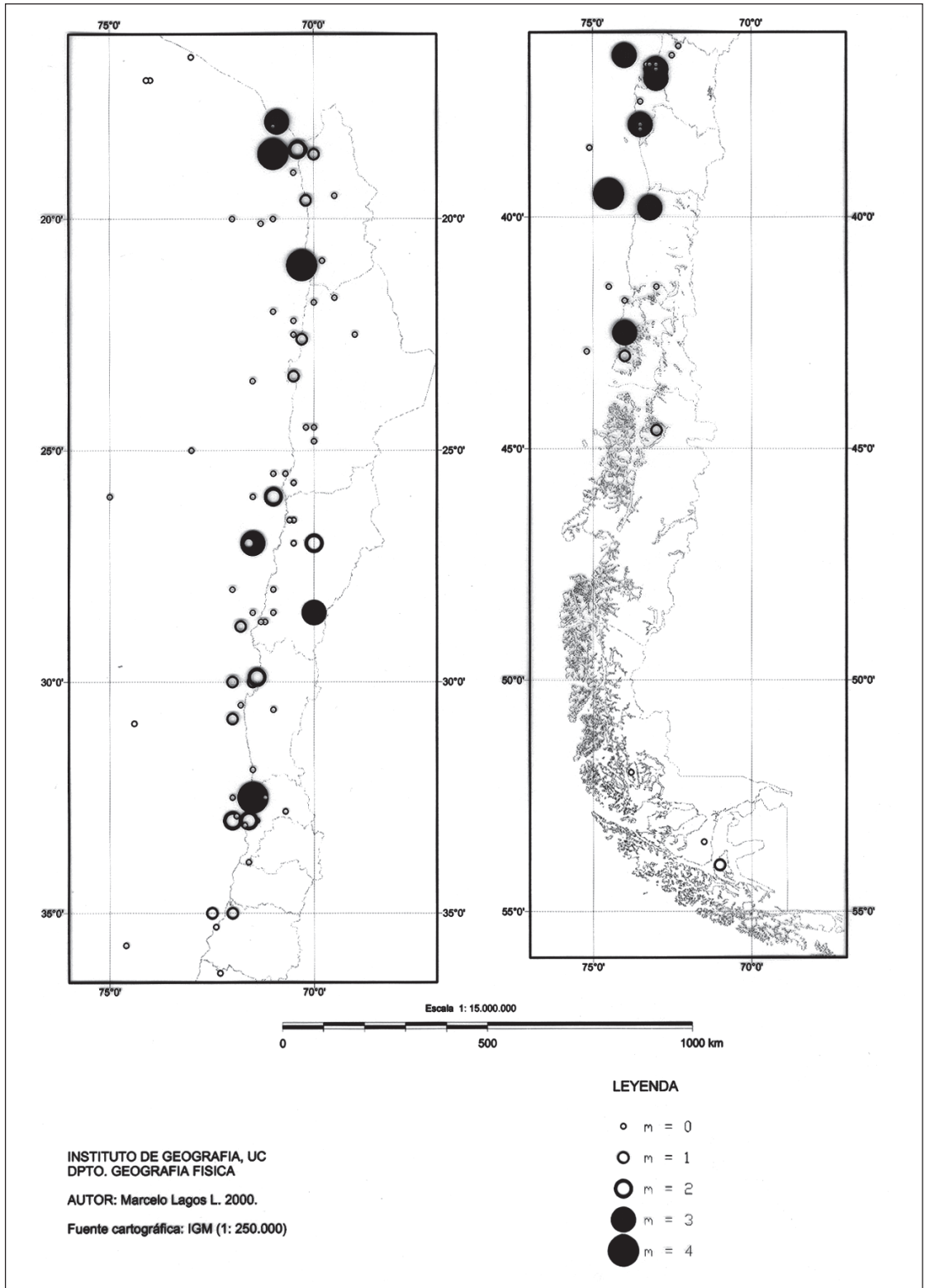
Relación entre la cota máxima de inundación (*Run-up*) y la magnitud del *tsunami* m (39 eventos)



Fuente: Elaboración propia con datos de Tabla 3.

MAPA 1

LOCALIZACION DE SISMOS GENERADORES DE *TSUNAMI*
EN FUNCION DE LA MAGNITUD *m*



Longitud Oeste (LW), su cota máxima de inundación alcanzó los 25 m.

Zona Austral

Se emplaza entre los 41° y 56° LS. La actividad generadora de *tsunamis* es escasa y se concentra entre los primeros 5° de latitud, involucrando la Isla Grande de Chiloé y sus alrededores, donde se agrupan siete eventos. Es importante mencionar que en este sector la frecuencia de ocurrencia de *tsunami* se presenta cada 100 años. Es así como en 1737, 1837 y 1927 ocurren eventos de magnitud 1, 3 y 1, respectivamente. Entre los 45° y 56° LS desaparece la generación de *tsunamis*, presentándose tres puntuales eventos de carácter local, se destaca el *tsunami* más austral ocurrido en 1949 con magnitud $m=1$, localizado a los 54° LS y 71° LW.

CONCLUSION

Desde el año 1562 que Chile posee un historial de importantes *tsunamis* que se han hecho presentes a lo largo de nuestras costas. Por lo tanto, el estudio de estos fenómenos implica conocer un conjunto de variables de orden físico que relacionadas permiten caracterizar e identificar su comportamiento potencial. Para ello, la elaboración de una base de información detallada y estándar es vital.

Los *tsunamis* generadores de daño con origen cercano a las costas de Chile presentan una baja frecuencia de ocurrencia; ello no implica que no exista amenaza, se debe considerar que eventos extremos presentan cotas de inundación del orden de 25 m, hecho que no siempre es considerado en la planificación de asentamientos humanos costeros. Esta situación se traduce en la actualidad, en que importantes urbanizaciones consolidadas y proyectos inmobiliarios se encuentran en riesgo ante la amenaza de *tsunami*.

Dada la extensión de nuestro litoral, la generación de *tsunamis* se ve condicionada por factores regionales y/o locales; de este modo, existen zonas diferenciadas, unas más o menos propensas a

la ocurrencia de eventos, situación derivada de sus características tectónicas, batimétricas y de configuración del borde costero.

Los sismos generadores de *tsunamis* poseen focos superficiales inferiores a los 60 km y se presentan con epicentros oceánicos y continentales cercanos a la línea de costa. Su localización se presenta en función de la zona de subducción, desde el extremo norte hasta los 45° LS., aproximadamente.

BIBLIOGRAFIA

- GODOY, H. (1975): *Metodología para la evaluación del riesgo de tsunami*. Santiago, Chile. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- IIDA, K. (1983): *Lecture note on seismology*. Nagoya, Japan. Seismic exploration group of Japan.
- IIDA, K., IWASAKI, T. (1983): *Tsunamis their science and engineering*. Tokyo, Japan. Terra Scientific Publishing Company.
- ITSU (1999): *Master Plan. Tsunami Warning System in the Pacific*. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. Second Edition, 32 p.
- LOMNITZ, C. (1971): *Terremotos y tsunamis en Chile*. Revista Geofísica Panamericana, Vol.1., pp. 151-178.
- LORCA, M., RECABARREN, M. (1994): *Terremotos y tsunamis o maremotos*. Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Comisión Oceanográfica Intergubernamental, Centro Internacional de Informaciones de *Tsunami*, 119 p.
- MONGE, J. (1993): *Estudios de riesgo de tsunami en costas chilenas*. Santiago, Chile. Jornadas chilenas de Sismología en ingeniería antisísmica, V.2. 1993, pp. 3-22.
- NGDC (2000): *Tsunami Event Database*. Colorado, USA. National Geophysical Data Center. Base de datos en línea <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/tsu.html>
- PILASI, F. (1978): *Riesgo de tsunami en la bahía de Quintero*. Santiago, Chile. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- SHOA (1984): *Maremotos en la costa de Chile*. Valparaíso, Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). 1ª edición, 48 p.
- SHOA (1995): *Maremotos en la costa de Chile*. Valparaíso, Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). 2ª edición, 48 p.
- SHOA (2000): *Cómo sobrevivir a un maremoto*. Valparaíso, Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). 1ª edición, 15 p.
- WIEGEL, R. (1970): *Earthquake engineering*. U.S.A. Prentice-Hall. Chapter 11 *Tsunamis*, pp. 253-306.