



MATRIZ DE RIESGO DE TSUNAMI

Boris Argandoña Castro*

Los Tsunamis son uno de los riesgos naturales que cada día está más presente en la memoria de las personas, tanto por sus efectos en la infraestructura de las actividades costeras como en la pérdida de vidas humanas; es el caso de Sumatra (2004) y Aysén (2007). Como una forma de afrontar este fenómeno en forma didáctica, se definirá una metodología práctica para mitigarlo a través de una - Matriz de Riesgo de Tsunami -, sustentado tanto en antecedentes científicos como en experiencias en base a la percepción de las personas a este tipo de eventos.

- Definición de Tsunami.

De la palabra japonesa, Tsu: Puerto, Nami: Ola, "Ola de Puerto", que define al sistema de ondas de gravedad del océano, que siguen a cualquier disturbio de la superficie libre, de escala grande y de corta duración" (Van Dorm, 1965).

"Tsunami son las ondas de agua de gran longitud (con períodos en el rango de 5 a 60 minutos, o más largos), generadas, impulsivamente por mecanismos tales como explosiones volcánicas en islas (Ej.: Krakatoa, 1883); deslizamientos de tierra submarinos (Ej.: Bahía de Sagame, Japón, 1933); caída de rocas a bahías, canales o al océano (Ej.: Fiordo Aysén, 2007); desplazamientos tectónicos asociados con terremotos (Ej.: tsunami de Valdivia, 1960) y explosiones submarinas de dispositivos nucleares" (Wiegel, 1970).

"Un tsunami es una serie de ondas oceánicas generadas por un disturbio impulsivo en el océano, o en un pequeño y conectado cuerpo de agua. Definido de este modo, el término incluye ondas generadas por desplazamientos abruptos del fondo oceánico, causados por terremotos,

deslizamientos de tierra submarinos o de la línea de la costa, erupciones volcánicas y explosiones" (Lockridge, 1985).

- Generación de un Tsunami.

Para que un sismo genere un Tsunami, es necesario que ocurran tres condiciones básicas:

- Que el epicentro del sismo, o una parte mayoritaria de su área de ruptura, esté bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 Km. (sismo superficial).
- Que ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas, es decir que la falla tenga movimiento vertical y no sea solamente de desgarre con movimiento lateral, y
- que el sismo libere suficiente energía en un cierto lapso de tiempo y que ésta sea eficientemente transmitida.

En la actualidad el conocimiento científico sobre la condición necesaria para un evento de estas características es insuficiente, no existiendo aún modelo teórico ni método operacional totalmente satisfactorio que permita determinar si un sismo es tsunamigénico (produce

* Capitán de Corbeta. Ingeniero Naval Hidrógrafo y Oceanógrafo Hidrógrafo Categoría "A" (F.I.G. y O.H.I.)

tsunami) o no, ni de qué “tamaño” (magnitud, intensidad, o altura de olas) será ese tsunami generado. Tradicionalmente se usó como indicador de certeza de generación de tsunami, que la Magnitud del Sismo (Ms) fuera mayor que 7.5, sin embargo este no es un indicador confiable para sismos muy grandes o de duración larga (mayor que 20 segundos).

Por otra parte, han ocurrido sismos de magnitud menor que 7.0, pero de larga duración, que han producido tsunamis desusadamente grandes respecto de lo esperable. El Momento Sísmico (Mo), que es proporcional al área de ruptura y a la dislocación vertical de la falla y que se determina de los registros de sismógrafos de banda ancha, es el parámetro que mejor estima la certeza de generación de tsunamis para Mo mayor que 1022 Newton-metros.

- **Origen de un Tsunami.**

En su zona de generación y mientras viajan por aguas profundas mar afuera, las olas de los tsunamis son de gran longitud (cientos de kilómetros) y poca altura (centímetros), lo que los hace inobservables visualmente desde embarcaciones o aviones; y se propagan a gran velocidad (cientos de kilómetros/hora). Sus períodos (lapso de tiempo entre el paso de dos olas sucesivas) son de 15 a 60 minutos. Los tsunamis no deben ser confundidos con las olas cortas de tormentas producidas

por el viento, que llegan usualmente a las costas, ni con las ondas mucho más extensas de las mareas que arriban una a dos veces todos los días.

- **Clasificación de un Tsunami.**

Los tsunamis se clasifican, en el lugar de arribo a la costa, según la distancia (o el tiempo de viaje) desde su lugar de origen, con el que se podrá determinar los tiempos de reacción de la población para mitigar sus efectos en:

- Tsunamis Locales, si el lugar de arribo en la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación (delimitada por el área de dislocación del fondo marino) del tsunami, o a menos de una hora de tiempo de viaje desde su origen.
- Tsunamis Regionales, si el lugar de arribo en la costa está a no más de 1.000 Km. de distancia de la zona de generación, o a pocas horas de tiempo de viaje desde esa zona.
- Tsunamis Lejanos, si el lugar de arribo está en costas extremo opuestas a través del Océano Pacífico, a más de 1.000 km. de distancia de la zona de generación y aproximadamente medio día o más de tiempo de viaje del tsunami desde esa zona.

Ejemplos: el Tsunami generado por un sismo en las costas de Chile el 22 de mayo de 1960, tardó minutos en llegar a Valdivia, aproximadamente 13 horas en llegar a Ensenada (México) y 22 horas a las costas de Japón.

- **Propagación y tiempos de viaje del Tsunami.**

En el desarrollo de un tsunami, desde su aparición, se distinguen tres etapas (Voit, 1987):

- Formación de la onda debido a la causa inicial y a su propagación cerca de la fuente;
- propagación libre de la onda en el océano abierto, a grandes profundidades; y



Turistas sorprendidos por el tsunami.

- propagación de la onda en la región de la plataforma continental, donde, como resultado de la menor profundidad del agua, tiene lugar una gran deformación del perfil de la onda, hasta su rompimiento e inundación sobre la playa.

Al acercarse las ondas de los tsunamis a la costa, a medida que disminuye la profundidad del fondo marino, disminuye también su velocidad y se acortan las longitudes de sus ondas. En consecuencia, su energía se concentra, aumentando sus alturas y las olas así resultantes pueden llegar a tener características destructivas al arribar a la costa.

Cómo se determinan los tiempos de arribo al borde costero:

- En la determinación de tiempos de arribo de las ondas de tsunami, el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (S.N.A.M.) emplea el software llamado T.T.T. (Tsunami Travel Time Calculation for the South America Region) creado en el Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, de Rusia, encabezado por el Dr. V. K. Gusiakov en coordinación con el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. En la "Imagen 1" se aprecian los tiempos de desplazamiento de la

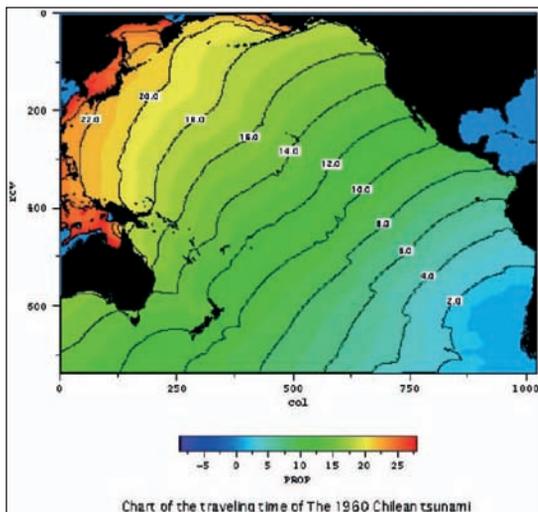


Imagen 1. Tsunami de 2004 en Ao Nany, Tailandia.

onda de un tsunami generado en la costa de Valdivia (Chile) y su propagación por la cuenca del Pacífico.

- Mediciones y escalas utilizadas.

Para poder estudiar en forma precisa los fenómenos tsunamigénicos, se ha determinado la medición de la liberación de energía de un sismo (Escala Richter), asociándola a los efectos de percepción de las personas (Mercalli) y sus efectos en las construcciones del borde costero (Sieberg) alemana al epicentro.

• Giuseppe Mercalli (1850 - 1914).

La Escala de Mercalli (Tabla 1), nombre del físico y geólogo italiano Giuseppe Mercalli, quien la desarrolló en el siglo XIX. Es una escala subjetiva, porque evalúa la "percepción" humana del sismo. Sirve para recolectar información en zonas donde no existen aparatos detectores, o instrumentos de medición. Se basa en lo que sintieron las personas que vivieron el sismo, o en los daños ocasionados. Cuando se utiliza esta escala, se habla de grados de intensidad.



Tsunami de 2004 en Ao Nany, Tailandia.

Escala modificada de Mercalli de Intensidades de Sismos.

Magnitud Escala Mercalli	Percepci n de las personas al Sismo – Terremoto.
I	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II	Se percibe s lo por algunas personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III	Se percibe en los interiores de los edificios y casas. Sin embargo, muchas personas no distinguen claramente que la naturaleza del fen meno es s'mica, por su semejanza con la vibraci n producida por el paso de un veh'culo liviano. Es posible estimar la duraci n del sismo.
IV	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. Muchas personas lo notan en el interior de los edificios a n durante el d'a. En el exterior, la percepci n no es tan general. Se dejan o'r las vibraciones de la vajilla, puertas y ventanas. Se sienten crujir algunos tabiques de madera. La sensaci n percibida es semejante a la que producir'a el paso de un veh'culo pesado. Los autom viles detenidos se mecen.
V	La mayor'a de las personas lo percibe a n en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas despiertan. Los l'quidos oscilan dentro de sus recipientes y a n pueden derramarse. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan. Los p'ndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la direcci n principal del movimiento s'mico.
VI	Lo perciben todas las personas. Se atemorizan y huyen hacia el exterior. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos fr giles. Los juguetes, libros y otros objetos caen de los armarios. Los cuadros suspendidos de las murallas caen. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se producen grietas en algunos estucos. Se hace visible el movimiento de los rboles, o bien, se les oye crujir. Se siente el ta ido de las campanas peque as de iglesias y escuelas.
VII	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. El fen'meno es percibido por los conductores de autom viles en marcha. Se producen da os de consideraci n en estructuras de alba iler'a mal construidas o mal proyectadas. Sufren da os menores (grietas) las estructuras comunes de alba iler'a bien construidas. Se da an los muebles. Caen trozos de estucos, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitect nicos. Las chimeneas d'biles se quiebran al nivel de la techumbre. Se producen ondas en los lagos; el agua se enturbia. Los terraplenes y taludes de arena o grava experimentan peque os deslizamientos o hundimientos. Se da an los canales de hormig n para regad'o. Suenan todas las campanas.
VIII	Se hace dif'cil e inseguro el manejo de veh'culos. Se producen da os de consideraci n y a n el derrumbe parcial en estructuras de alba iler'a bien construidas. En estructuras de alba iler'a bien proyectadas y construidas s lo se producen da os leves. Caen murallas de alba iler'a. Caen chimeneas en casa e industrias; caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Las casas de madera se desplazan y a n se salen totalmente de sus bases. Los tabiques se desprenden. Se quiebran las ramas de los rboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos. Aparecen grietas en el suelo h'medo, especialmente en la superficie de las pendientes escarpadas.
IX	Se produce p nico general. Las estructuras de alba iler'a mal proyectadas o mal construidas se destruyen. Las estructuras de alba iler'a bien construidas se da an y a veces se derrumban totalmente. Las estructuras de alba iler'a bien proyectadas y bien construidas se da an seriamente. Los cimientos se da an. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren da os considerables los dep sitos de agua, gas, etc. Se quiebran las tuber'as (ca er'as) subterr neas. Aparecen grietas a n en suelos secos. En las regiones aluviales, peque as cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.
X	Se destruye gran parte de las estructuras de alba iler'a de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera. Algunas estructuras de madera bien construidas, incluso puentes, se destruyen. Se producen da os en represas, diques y malecones. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, r'os, lagos, etc. sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las v'as f'reas quedan ligeramente deformados.
XI	Muy pocas estructuras de alba iler'as quedan en pie. Los rieles de las v'as f'reas quedan fuertemente deformados. Las tuber'as (ca er'as subterr neas) quedan totalmente fuera de servicio.
XII	El da os es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Tabla 1.

• **Charles Francis Richter (1900-1985).**

La Escala de Richter (Tabla 2), fue creada en 1935 por Charles Francis Richter, sismólogo nacido en 1900. Richter y Beno Gutenberg querían desarrollar una manera cuantitativa de comparar terremotos, que no dependiera de la localización del observador. Decidieron “tomar prestada” la idea de magnitud de los astrónomos, quienes la usaban para clasificar la brillantez de las estrellas, y extrapolarla a los fenómenos terrestres. A diferencia de la Escala de Mercalli, la de Richter mide la fuerza de los terremotos de acuerdo a su magnitud, es decir, la cantidad de energía liberada durante el sismo. Esta medición se realiza utilizando los datos que entregan los sismógrafos, que registran las ondas sísmicas. Por lo mismo, no tiene un límite de grados. Hasta el momento, la mayor magnitud registrada en el mundo corresponde a 9,5 grados, para el terremoto que ocurrió en Valdivia, Chile, en 1960. Esta es una escala

que utiliza datos científicos y no percepciones de la gente. Podemos determinar algunos posibles efectos esperados, de acuerdo a la magnitud registrada.

Magnitud Richter v/s Efectos del Terremoto.	
Magnitud Escala Richter	Efectos del Terremoto.
Menos de 3.5	Generalmente no se siente, pero es registrado.
3.5 a 5.4	A menudo se siente, pero si o causa daos menores.
5.5 a 6.0	Ocasiona daños ligeros a edificios.
6.1 a 6.9	Puede ocasionar da os severos en reas donde vive mucha gente.
7.0 a 7.9	Terremoto mayor. Causa graves da os.
8.0 o superior	Gran terremoto. Destruccin total a comunidades cercanas.

Tabla 2

• **Escala de Sieberg.**

La Escala Sieberg (Tabla 3), es una escala descriptiva de la intensidad de tsunami que se modificó posteriormente a la escala de Sieberg - Ambraseys descrita a continuación (Ambraseys 1962).

Escala modificada de Sieberg, intensidades del Tsunami.	
Magnitud Escala Sieberg	Efectos del Tsunami.
I	Muy suave. La ola es tan dñbil, que si o es perceptible en los registros de las estaciones de marea.
II	Suave. La ola es percibida por aquellos que viven a lo largo de la costa y est n familiarizados con el mar. Normalmente se percibe en costas muy planas.
III	Bastante fuerte. Generalmente es percibido. Inundacin de costas de pendientes suaves. Las embarcaciones deportivas pequeas son arrastradas a la costa. Daos leves a estructuras de material ligero situadas en las cercanías a la costa. En estuarios se invierten los flujos de los ríos hacia arriba.
IV	Fuerte. Inundacin de la costa hasta determinada profundidad. Daos de erosin en rellenos construidos por el hombre. Embancamientos y diques daados. Las estructuras de material ligero cercanas a la costa son daadas. Las estructuras costeras si idas sufren daos menores. Embarcaciones deportivas grandes y pequenos buques son derivados tierra adentro o mar afuera. Las costas se encuentran sucias con desechos flotantes.
V	Muy fuerte. Inundacin general de la costa hasta determinada profundidad. Los muros de los embarcaderos y estructuras si idas cercanas al mar son daados. Las estructuras de material ligero son destruidas. Severa erosión de tierras cultivadas y la costa se encuentra sucia con desechos flotantes y animales marinos. Todo tipo de embarcaciones, a excepcin de los buques grandes, son llevadas tierra adentro o mar afuera. Grandes subidas de agua en ríos estuarinos. Las obras portuarias resultan daadas. Gente ahogada. La ola va acompaada de un fuerte rugido.
VI	Desastroso. Destruccin parcial o completa de estructuras hechas por el hombre a determinada distancia de la costa. Grandes inundaciones costeras. Buques grandes severamente daados. rboles arrancados de raíz o rotos. Muchas vctimas.

Tabla 3



Imagen satelital de la NASA en Sri Lanka el 26-dic-2004.

- **Señalética de Tsunami.**

Existen señales internacionales utilizadas para determinar las zonas afectadas del borde costero a los efectos del Tsunami, objeto sea conocida e identificada oportunamente por la población (Imagen 2).



Imagen 2.

- **Sistema Nacional de Alarma de Maremotos.**

Desde 1966, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (S.H.O.A.) opera el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (S.N.A.M.) y representa oficialmente al Estado de Chile ante el Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis del Pacífico (Imagen 3), cuyo centro de operaciones es el Pacific Tsunami Warning Center (P.T.W.C.) ubicado en Hawaii (Estados Unidos).



Imagen 3.

El S.N.A.M. y P.T.W.C. interactúan permanentemente por medio de una serie de elementos de comunicaciones y tecnológicos que monitorean los factores indicativos de un posible Tsunami.

Una vez confirmada la inminente ocurrencia de un Tsunami, el S.H.O.A. envía la información sobre los parámetros del terremoto y la hora estimada de arribo a los organismos civiles encargados de avisar a la población y a las Fuerzas Armadas con asiento en los puertos y caletas del litoral.

Asimismo, comparte con el sistema Internacional de Alerta de Tsunamis del Pacífico (P.T.W.C.), toda la información relativa a maremotos con origen en la costa de Chile, que pueda afectar a otros países de esta cuenca oceánica y viceversa.

El S.H.O.A., procesa los eventos ocurridos (terremotos), evaluando en base a la información disponible los grados de alerta, siendo éstos los siguientes:

- **Información de Sismo.**

Comunica la ocurrencia de sismos en territorio nacional, con el objeto de evitar acciones o incertidumbre en la población.

- **Alerta de Tsunami.**

Comunica la ocurrencia del sismo y posibilidad de generación de tsunami.

• **Alarma de Tsunami:**

Comunica la confirmación de la generación de un tsunami.

De acuerdo a los grados de alerta, será la respuesta a la amenaza, objeto mitigar la pérdida de vidas humanas y la infraestructura del borde costero, siendo fundamental la educación de la población en la forma de reacción al evento tsunamigénico.

- **Matriz de Riesgo de Tsunami.**

Conociendo las definiciones, características generales de un Tsunami, los procedimientos de la difusión de la información (alertas), y principalmente las formas de cuantificar tanto por la percepción como científicamente la magnitud y sus efectos, se definió la "Matriz de Riesgo de Tsunami" (Tabla 4 y 5), como

la forma fácil, práctica y oportuna de evaluar el fenómeno de un sismo que puede estar asociado a un efecto de Tsunami, con el propósito de realizar las primeras acciones tendientes a mitigar los efectos producidos, que han ocasionado daños importantes a la infraestructura costera, su actividad comercial, turística y militar, con pérdida de vidas humanas, en eventos ampliamente documentados gracias a la ciencia y medios de comunicación.

Para la utilización de esta Matriz, es necesario conocer principalmente la Escala Mercalli, ya que es la base -primer eslabón- de esta cadena de información del evento y sus efectos que afectará a su usuario, que serán corroborados por las mediciones científicas y la información difundida en el corto plazo por las autoridades competentes en cuanto a la magnitud, intensi-

Mercalli	Richter	Sieberg	Matriz de Riesgo de Tsunami	Grados de Alerta
Intensidad del sismo	Efectos terremoto	Intensidad Tsunami	Código del Riesgo	SHOA - ONEMI
I	Menos de 3.5	I - Muy suave	Imperceptible	Información de Sismo
II				
III	3.5 a 5.4	II - Suave	Despreciable	Alerta de Tsunami
IV				
V	5.5 a 6.0	III - Bastante fuerte	Menor	Alerta de Tsunami
VI				
VII	6.1 a 6.9	IV - Fuerte	Moderado	Alerta de Tsunami
VIII				
IX	7.0 a 7.9	V - Muy fuerte	Serio	Alarma de Tsunami
X				
XI	8.0 o superior	VI - Desastroso	Crítico	Alarma de Tsunami
XII				

Tabla 4: Anverso.

Escala de Mercalli de Intensidades de Sismos.	
Escala	Percepción del Terremoto
I	No se advierte sino por unas pocas personas al interior de casas y edificios.
II	Se percibe sólo por algunas personas en reposo al interior de casas y edificios.
III	En general se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV	En el interior los objetos colgantes oscilan visiblemente. Se sienten crujir algunos tabiques de madera.
V	La mayoría de las personas lo percibe también en el exterior. En los interiores, durante la noche, muchas despiertan.
VI	Lo perciben todas las personas. Se atemorizan y huyen hacia el exterior.
VII	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie.
VIII	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas.
IX	Se produce pánico general. Los cimientos se dañan. Las estructuras de madera son removidas de sus cimientos. Sufren daños considerables los depósitos de agua, gas, etc. Aparecen grietas también en suelos secos.
X	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería y madera de toda especie. Se producen daños en represas, diques y malecones. El agua de canales, ríos, lagos, etc. sale proyectada a las riberas. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.
XI	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías (cañerías subterráneas) quedan totalmente fuera de servicio.
XII	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Tabla 5: Reverso.

dad, efectos y grados de alerta, pero que será tardía en caso de la necesidad de reaccionar oportunamente si se requiere y de estar ubicados inmediatamente en el lugar donde se manifiesta el fenómeno "sísmico - tsunamigénico" en el borde costero.

- **Conclusiones.**

Los riesgos producidos por fenómenos de la naturaleza, principalmente los descritos en el presente trabajo, son cada vez más documentados y siguen produciendo pérdidas materiales a la actividad comer-

cial, turística, militar y otras; además de la pérdida de vidas humanas asentadas en el borde costero. Chile, siendo un país marítimo, debe consolidar el concepto de Mar Presencial en todos sus vértices, siendo uno de ellos el ámbito científico, el cual entrega un potencial enorme de aporte a los intereses marítimos, es por ello que contar con una "Matriz de Riesgo de Tsunami", mitigará en forma práctica y oportuna los efectos producidos por los fenómenos tsunamigénicos en el borde costero de nuestro país.



BIBLIOGRAFÍA

1. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile: www.shoa.cl/
2. Oficina Nacional de Emergencia: www.onemi.cl/
3. National Earthquake Information Center: <http://neic.usgs.gov/>
4. Centro Internacional de Información de Tsunamis: www.prh.noaa.gov/itic/
5. Sistema de Alerta de Tsunamis en el Pacífico: <http://ioc.unesco.org/itsu/>

PUBLICACIONES O PROYECTOS RELACIONADOS:

1. Tesis de Grado para optar al Título de Ingeniero Naval Hidrógrafo y Oceanógrafo, año 2000, del Teniente 2° Boris Argandoña Castro.
2. "Determinación de la vulnerabilidad de la Base Naval de Talcahuano, ante un Tsunami" (Revista de Marina N°4, 2005).
3. Proyecto presentado en Seminario "Hacia un Plan de Contingencia de las Empresas de Talcahuano ante un Tsunami", organizado y realizado en el Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano. (Agosto 2008).
4. Proyecto presentado en Seminario "Terremotos y Tsunamis", organizado y realizado en la Universidad Santo Tomás, Sede Concepción. (Agosto 2008).