



Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales
INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

**EL TSUNAMI DEL 27-02-2010 EN EL POBLADO DE
SAN JUAN BAUTISTA, JUAN FERNÁNDEZ.**

DOC ICO 10-2010



EL TSUNAMI DEL 27-02-2010 EN ISLA ROBINSON CRUSOE, ARCHIPIÉLAGO JUAN FERNÁNDEZ

PREPARADO PARA:

Ilustre Municipalidad de Juan Fernández

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES
GRUPO DE INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

Av. Borgoño 16344 Montemar, Reñaca
Teléfonos (32) 2507824 - (32) 2507860
Fax (32) 2507859
www.ingenieriaoceanica.cl

JUNIO 2010

INFORMACION PROYECTO

DATOS GENERALES

Proyecto	El tsunami del 27-02-2010 en isla Robinson Crusoe, archipiélago Juan Fernández.
Mandante	Ilustre Municipalidad de Juan Fernández
Autores	<p>Patricio Winckler Grez Ingeniero Civil MSc. In Environmental Technology Master en Ingeniería de puertos y costas Académico Ingeniería Civil Oceánica</p> <p>Mauricio Reyes Gallardo Ingeniero Civil Master en Ingeniería Estructural y Geotécnica (c) Académico Ingeniería Civil Oceánica</p> <p>Ignacio Sepúlveda Oyarzún Ingeniero Civil (e) Profesor Ayudante Ingeniería Civil Oceánica</p>
Equipo de terreno	<p>Cristopher Zambra Araya Ingeniero Civil Oceánico (egresado)</p> <p>Mauricio Molina Pereira Ingeniero Civil Oceánico (egresado)</p> <p>Alejandro Vera Rail Ingeniero Civil Oceánico (egresado)</p> <p>Juan Pablo Jorquera Estudiante de Ingeniería Civil Oceánica</p>
Código interno	2010 UV – Tsunami Juan Fernández
Archivo	2010 UV - Tsunami Juan Fernández Final Rev.A MRG

CONTROL INTERNO

Revisión	Elaboró			Revisó			Aprobó			Observaciones
	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	
A	PWG	02/04/10		MRG	01/04/10		PWG	02/04/10		Para revisión I.M.J.F.
B	MRG	02/07/10		MRG	02/07/10		PWG	08/07/10		Considera segunda visita

CONTENIDOS

1	ALCANCES	6
2	DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO TSUNAMI	8
2.1	GENERALIDADES	8
2.2	DEFINICIONES	10
2.3	CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS PARA SAN JUAN BAUTISTA.....	11
2.3.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	11
2.3.2	DESCRIPCIÓN DE LA FÍSICA DEL TSUNAMI DEL 27-02-2010	13
3	TRABAJOS EN TERRENO	18
3.1	LEVANTAMIENTOS EFECTUADOS.....	18
3.1.1	VISITA COMPRENDIDA ENTRE EL 27-03-2010 Y EL 31-03-2010	18
3.1.2	VISITA COMPRENDIDA ENTRE EL 07-04-2010 Y EL 13-04-2010	18
3.1.3	EQUIPAMIENTO UTILIZADO EN LOS LEVANTAMIENTOS.....	19
3.1.4	CONTACTOS EFECTUADOS	20
3.2	RESULTADOS DE LOS LEVANTAMIENTOS.....	21
3.2.1	PUERTO FRANCÉS	22
3.2.2	BAHÍA EL PANGAL.....	23
3.2.3	BAHÍA CUMBERLAND	24
3.2.4	PUERTO INGLÉS.....	31
3.2.5	BAHÍA DEL PADRE	32
3.2.6	CALETA SELKIRK.....	33
4	DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL TSUNAMI	35
4.1	PÉRDIDAS HUMANAS Y DE ANIMALES POR AHOGAMIENTO	35
4.2	FALLAS DE TIPO ESTRUCTURAL, SOCAVACIÓN Y FALLAS DE FUNDACIONES.....	37
4.3	ARRASTRE DE EMBARCACIONES Y ELEMENTOS FLOTANTES.....	38
4.4	PÉRDIDA DE SERVICIOS BÁSICOS Y LÍNEAS DE VIDA.....	39
4.5	IMPACTOS SOBRE LA MORFOLOGÍA Y LOS ECOSISTEMAS MARINOS.....	41
4.6	CONTAMINACIÓN.....	42
5	RECOMENDACIONES	44
5.1	EVALUAR EL RIESGO DE TSUNAMIS	44
5.2	CONSIDERACIÓN DE CRITERIOS DE TSUNAMI EN INSTALACIONES COSTERAS ...	47
5.2.1	DISEÑO DE INSTALACIONES CONSIDERANDO CARGAS DE TSUNAMI	47
5.2.2	TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS ADECUADAS PARA ZONAS DE RIESGO	48
5.2.3	ARBOLEDAS DE PROTECCIÓN EN ZONAS DE RIESGO.....	50
5.2.4	LÍNEAS DE VIDA E INSTALACIONES ESCENCIALES PARA COMBATIR LA EMERGENCIA	51
5.3	INCORPORAR EL RIESGO DE TSUNAMIS EN LA PLANIFICACIÓN URBANA	52
5.4	IMPLEMENTAR UN PLAN DE EVACUACIÓN.....	54
5.5	IMPLEMENTAR UN PLAN DE EDUCACIÓN	55
5.6	RECUPERACIÓN DE LA MEMORIA HISTÓRICA.....	55
6	REFERENCIAS	56
	ANEXO 1: CONTACTOS EFECTUADOS DURANTE LA VISITA A TERRENO	58

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Isla Robinson Crusoe.	7
Figura 1-2: Imagen satelital poblado de San Juan Bautista.....	7
Figura 2-1: Definición de términos de tsunamis utilizados en este informe.	10
Figura 2-2: Diagrama espacio-temporal de terremotos y tsunamis históricos en Chile.	11
Figura 2-3: Magnitud del deslizamiento en la ruptura del terremoto del 27-02-2010.	13
Figura 2-4: Simulación numérica del tsunami del 27-02-2010 en el Océano Pacífico.	14
Figura 2-5: Registro del mareógrafo de Juan Fernández para el tsunami de 27-02-2010.	15
Figura 2-6: Vistas aéreas de San Juan Bautista antes y después del tsunami.	16
Figura 2-7: Extensión de la inundación en el poblado de San Juan Bautista.	17
Figura 2-8: Profundidad de la inundación en el sector del Cementerio.	17
Figura 3-1: Levantamiento topográfico efectuado en el sector del Muelle.....	19
Figura 3-2: Vista general de los sectores contemplados en los levantamientos.	21
Figura 3-3: Vista general de Puerto Francés.	22
Figura 3-4: Inundación en Puerto Francés.....	22
Figura 3-5: Ubicación de bahía El Pungal.....	23
Figura 3-6: Inundación en Bahía Cumberland.	24
Figura 3-7: Fotografías antes y después en San Juan Bautista, Bahía Cumberland.	24
Figura 3-8: Fotografías antes y después en San Juan Bautista, Bahía Cumberland.	25
Figura 3-9: Referencias principales en Bahía Cumberland.	27
Figura 3-10: Faro San Carlos antes y después del tsunami, en Bahía Cumberland.	28
Figura 3-11: Restos del faro San Carlos, en Bahía Cumberland.	29
Figura 3-12: Muelle en Bahía Cumberland, en la ribera norte de isla Robinson Crusoe.....	30
Figura 3-13: Línea probable de run-up en Puerto Inglés.	31
Figura 3-14: Inundación en Puerto Inglés.	31
Figura 3-15: Inundación en Bahía del Padre.	32
Figura 3-16: Infraestructura portuaria en Bahía el Padre.....	33
Figura 3-17: Isla Alejandro Selkirk (arriba), Caleta Selkirk (izq) y la Lobería (der).	34
Figura 4-1: Tumba de Maite Arredondo Recabarren en el Cementerio.....	36
Figura 4-2: Vista parcial de la zona arrasada por el tsunami.....	37
Figura 4-3: Socavación de fundaciones en el Pez Volador, cerca de la rampa.	38
Figura 4-4: Embarcación “Carrera”, hundida al este de la rampa.	38
Figura 4-5: Lancha pesquera “Alborada” desplazada desde la rampa.	39
Figura 4-6: Destrucción de la antena de Internet, tras la Municipalidad.	40
Figura 4-7: Destrucción de la antena de Canal 13.	40
Figura 4-8: Fondo marino en el sector El Pungal, Bahía Cumberland.....	41
Figura 4-9: Ubicación de Puerto Inglés, donde no se registraron grandes daños.....	42
Figura 4-10: Escombros flotantes el día posterior al tsunami en el sector del Palillo.....	43
Figura 4-11: Árboles contaminados con petróleo en el predio de la Sra. Isaira Condell.	43
Figura 5-1: Batimetría de la zona inmediata a la Isla Robinson Crusoe.	45
Figura 5-2: Batimetría 3D de la zona inmediata a la Isla Robinson Crusoe.	45
Figura 5-3: Batimetría de Bahía Cumberland, Isla Robinson Crusoe.	46

Figura 5-4: Estrategias para incorporar criterios de diseño de tsunamis en viviendas	48
Figura 5-5: Proyecto de vivienda social Tsunami-safe(r) house.....	49
Figura 5-6: Proyecto de vivienda social Tsunami-safe(r) house.....	50
Figura 5-7: Arboledas de protección propuestas para la ciudad de Hilo, Hawaii.	50
Figura 5-8: zona de inundación propuesta para el poblado de San Juan Bautista.	52
Figura 5-9: Propuesta del Plan Regulador de Juan Fernández, Sector San Juan Bautista.	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Características Técnicas de Equipos GPS.	19
Tabla 3-2: Estimación de fuerzas sobre el faro de Bahía Cumberland.....	29
Tabla 4-1: Relación de fallecidos y desaparecidos en Isla Robinson Crusoe.	36
Tabla 5-1: Matriz causa – efecto - medidas de mitigación ante un tsunami.	47

1 ALCANCES

El 27 de febrero de 2010, a hora local 3:34 AM, la zona central de Chile fue sacudida por un terremoto que alcanzó una magnitud de 8.8 grados en la escala de Richter, con epicentro 63 [km] al SO de Cauquenes y profundidad focal estimada en 35 [km] (NEIC). Como consecuencia del terremoto, se registraron ondas de tsunami que impactaron con gran intensidad aproximadamente 550 kilómetros a lo largo de la costa continental, desde San Antonio (33°35'S, 71°37'W) a Tirúa (38°20'S; 73°29'W), afectando también el Archipiélago Juan Fernández (33°37'S; 78°50'W), ubicado a 600 [km] de la costa.

El poblado de San Juan Bautista, ubicado en Bahía Cumberland (Figura 1-1 y Figura 1-2), fue impactado por ondas de tsunami que arrasaron con la zona baja del pueblo, dejando a su paso un total de 12 víctimas fatales, 6 desaparecidos, unas 50 familias damnificadas y un impacto en las principales actividades económicas de la isla como son la pesca artesanal y el turismo.

Como consecuencia de este evento, y en virtud del Convenio de Cooperación firmado entre la Ilustre Municipalidad de Juan Fernández y la Universidad de Valparaíso con fecha de 16 de enero de 2007, se conformó una comisión técnica de académicos de diversas especialidades, cuyo objetivo es establecer medidas en relación con la reconstrucción del poblado de San Juan Bautista.

Entre las medidas a corto plazo en que participa el Grupo de Ingeniería Civil Oceánica se contempla un levantamiento de la zona de inundación generada por el tsunami y la evaluación de daños en obras portuarias. Esta información será utilizada en la elaboración de un modelo de simulación hidrodinámica para el tsunami del 27-02-2010 y de otros eventuales tsunamis que pudieren afectar San Juan Bautista en el futuro, que en conjunto permitirán delimitar la zona de riesgo de inundación. Esta información forma parte de los antecedentes necesarios para proponer un plan de ordenamiento territorial en el sector bajo del poblado. Cabe mencionar que el Grupo de Ingeniería Civil Oceánica forma parte de una comisión internacional de expertos bajo la coordinación del International Tsunami Information Center, cuyo objetivo es evaluar las características de la inundación y las consecuencias sobre las instalaciones terrestres y portuarias mediante un levantamiento en toda la zona afectada.

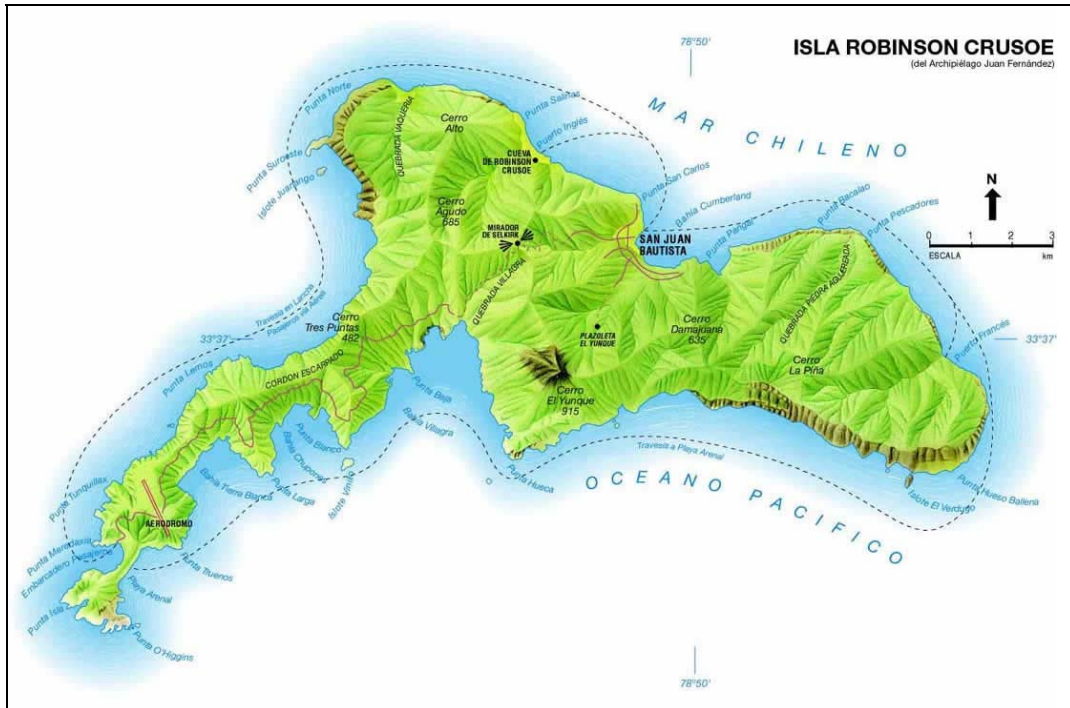
Este documento presenta la recopilación de antecedentes, los trabajos de levantamiento de información efectuados en terreno y algunas recomendaciones de carácter general que debieran contemplarse en la definición del plan de ordenamiento territorial y en planes de educación a la comunidad.

La Universidad de Valparaíso expresa su agradecimiento a la Armada de Chile por permitir el traslado del equipo de terreno en el Transporte Aquiles y en la Barcaza Valdivia, a la Ilustre Municipalidad de Juan Fernández por facilitar la elaboración de los trabajos, a la Srta. Keyla Alanis y a su familia por las gestiones que permitieron cumplir con la misión encomendada y a todos aquellos que hicieron de esta visita una instancia confortable a pesar de los padecimientos de los habitantes de San Juan Bautista.

Ante cualquier duda sobre este documento, se solicita contactar a los autores en la siguiente dirección:

Patricio Winckler Grez
 Grupo de Ingeniería Civil Oceánica
 Universidad de Valparaíso
 Patricio.winckler@uv.cl
www.ingenieriaoceanica.cl

Figura 1-1: Isla Robinson Crusoe.



Fuente: Proyecto Juan Fernández. Sistema híbrido eólico-diesel.

Figura 1-2: Imagen satelital poblado de San Juan Bautista.



Fuente: Google Earth.

2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO TSUNAMI

2.1 GENERALIDADES

Los tsunamis corresponden a ondas de período relativamente largo y baja probabilidad de ocurrencia, cuyos efectos a nivel costero son altamente dependientes del mecanismo que los genera y de las condiciones locales del emplazamiento. Los mecanismos de generación de tsunamis más comunes son los siguientes: terremotos submarinos, actividad volcánica, resonancias de las masas de agua, avalanchas submarinas, explosiones nucleares y tsunamis de origen atmosférico. Desde 1562 a la fecha, en Chile se han registrado 28 tsunamis de diferentes magnitudes¹, lo que sugiere una recurrencia de un tsunami cada 16 años. De ellos, los tsunamis más destructivos han sido generados por terremotos en los años 1730, 1835, 1868, 1877, 1922, 1960 y 2010, lo que sugiere una recurrencia cercana a los 50 años si se considera el borde costero nacional en su integridad.

Estas ondas pueden acumular suficiente energía para atravesar océanos. Se propagan como ondas gravitacionales, presentando un rango de períodos que varía entre 5 y 60 minutos y alturas menores a 1 [m] en mar abierto. Al aproximarse a la costa, los tsunamis incrementan su altura y pueden causar un impacto importante en las comunidades costeras. El daño puede manifestarse en muertes, destrucción de la infraestructura portuaria, en la inundación de grandes extensiones de terreno y en daño a los sistemas de transporte, redes de energía y de agua potable. El arrastre de objetos y substancias puede provocar contaminación ambiental y provocar enfermedades epidémicas en sectores poblados.

En general, los grandes terremotos en las costas de Chile presentan una zona de ruptura ubicada entre la fosa y 100 [km] al Este, en que se producen sollevamientos, y una zona interior entre 100 y 220 [km] al Oeste, en que se produce subsidencia. El contacto entre placas es rugoso, produciéndose un acoplamiento entre ellas y acumulación de energía en el período intersísmico. Los epicentros de estos sismos tsunamigénicos se localizan a unos 100 [km] de la fosa en el litoral y a una profundidad focal de hasta 60 [km]. Hasta la fecha se reconoce la existencia de 3 condiciones básicas para la generación de un tsunami de origen tectónico²:

- 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].
- 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.
- Que el sismo libere suficiente energía y que el mecanismo de falla a través del cual ésta es transformada en energía hidrodinámica sea efectivo.

En este sentido, se reconoce que no existe una relación binaria entre terremotos y tsunamis, puesto que un movimiento sísmico de magnitud considerable puede indistintamente generar un tsunami importante o no hacerlo.

¹ Los tsunamis registrados corresponden a 28 de octubre de 1562, 8 de febrero de 1570, 16 de diciembre de 1575, 24 de noviembre de 1604, 13 de mayo de 1647, 15 de marzo de 1657, 8 de julio de 1730, 25 de mayo de 1751, 11 de abril de 1819, 19 de noviembre de 1822, 20 de febrero de 1835, 7 de noviembre de 1837, 17 de noviembre de 1849, 26 de mayo de 1851, 5 de octubre de 1859, 13 de agosto de 1868, 9 de mayo de 1877, 16 de agosto de 1906, 4 de diciembre de 1918, 10 de noviembre de 1922, 1 de diciembre de 1928, 6 de abril de 1943, 22 de mayo de 1960, 28 de diciembre de 1966, 3 de marzo de 1985, 30 de julio de 1995, 21 de abril de 2007 y 27 de febrero de 2010.

² Estas condiciones son de carácter cualitativo y, de acuerdo al estado actual del conocimiento en la materia, no existe aún ningún modelo teórico ni método operacional totalmente satisfactorio y confiable que permita determinar el potencial tsunamigénico de un sismo.

Asimismo, se reconoce que la amplitud del tsunami no es necesariamente proporcional a la del terremoto y que no hay una reciprocidad clara entre ambos fenómenos. En términos energéticos, una fracción de entre un 0,5% y un 10% de la energía sísmica es efectivamente convertida en energía hidrodinámica.

El perfil de ondas resultante de un tsunami generado en océano abierto depende de los parámetros de su fuente, de las características de la región de propagación y del tiempo o distancia transcurridos desde el inicio de esa propagación. Su velocidad de propagación depende básicamente de la profundidad del agua por la cual atraviesa. Esto determina que durante su trayectoria, el tsunami se vea sujeto a fenómenos de refracción y dispersión de energía. Se sabe que la gran longitud de onda que presentan los tsunamis de origen sismotectónico, 100 a 300 [km], provoca que su propagación en océano abierto se realice casi sin pérdida de energía por fricción de fondo y con una amplitud de onda de unos cuantos centímetros, por lo que resultan imperceptibles para las embarcaciones.

En la costa, en cambio, la disminución de la profundidad y su configuración, genera la concentración de la energía cinética de las ondas; disminuye su longitud y crece su altura, alcanzando un gran poder destructivo con alturas que pueden llegar hasta los 20 o 30 [m]. Las mayores alturas han sido observadas en bahías angostas o semicerradas, por amplificación resonante, en desembocaduras de ríos y en bahías con presencia de islas. La altura alcanzada por un tsunami al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos; éstos son: características de las ondas en mar abierto, batimetría del fondo, configuración de la costa, de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión de las ondas en las distintas formaciones costeras, etc. Estos factores determinan que el arribo del tsunami a la línea costera sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura máxima (run-up), aún a cortas distancias a lo largo de ella.

Cabe mencionar que el factor batimétrico es relevante en la determinación de la intensidad y por ende de la cota máxima que puede alcanzar un tsunami en la costa. De esta forma, un relieve de gran irregularidad, puede redundar en cotas de inundación variables a lo largo de la costa, en tanto que una batimetría regular generará variaciones menores en la inundación.

El gran impacto de las ondas en la costa es atribuible a las fuerzas hidrodinámicas sobre las estructuras, causadas por la velocidad de las corrientes y contracorrientes inducidas por el arribo de las olas. La altura y período de éstas, determinan la cantidad de inundación en términos del run-up, fuerzas de elevación y de flotabilidad. Esencialmente hay dos tipos de fuerzas hidrodinámicas que afectan a las estructuras: una proviene del impacto directo de las olas al inundar el borde costero y la otra es debido a las fuerzas erosivas producidas durante el proceso de elevación y descenso del nivel del agua, originado por el flujo alrededor de las estructuras.

Los efectos secundarios sobre las estructuras son causados principalmente por las fuerzas erosivas del agua al interactuar con el medio. Ejemplos son la pérdida de soporte del suelo producto de la erosión del terreno o cuando las fuerzas de elevación crean momentos de giro, donde una estructura puede ser levantada de sus cimientos o una embarcación soltada de sus amarras. En esta situación, las estructuras son transportadas en la dirección de las corrientes y el daño es causado por objetos o despojos flotantes de embarcaciones, autos, construcciones, etc., al impactar éstos sobre otras estructuras. El impacto de objetos flotantes contra tanques de combustible y terminales o redes eléctricas suelen dar inicio a incendios.

2.2 DEFINICIONES

Las siguientes definiciones son útiles para la comprensión de este documento (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

Runup (R): Distancia vertical entre la elevación de la penetración del tsunami y la elevación de la línea de costa al momento del ataque del tsunami. Su unidad es en metros. *Ejemplo: $R = 4,5$ [m].*

Altura (H): Distancia vertical entre una cresta y un valle sucesivo. Su unidad es en metros. *Ejemplo: $H = 3,2$ [m].*

Desnivelación (η): Distancia vertical entre el nivel estático del agua y la superficie del agua del tsunami, y puede adoptar valores positivos o negativos. Su unidad es en metros respecto del nivel estático. *Ejemplo: $\eta = +2,5$ [m] o $\eta = -1,8$ [m].*

Velocidad (V): Velocidad del escurrimiento generado por el tsunami. Su unidad es en metros por segundo. *Ejemplo: $V = 4,8$ [m/s].*

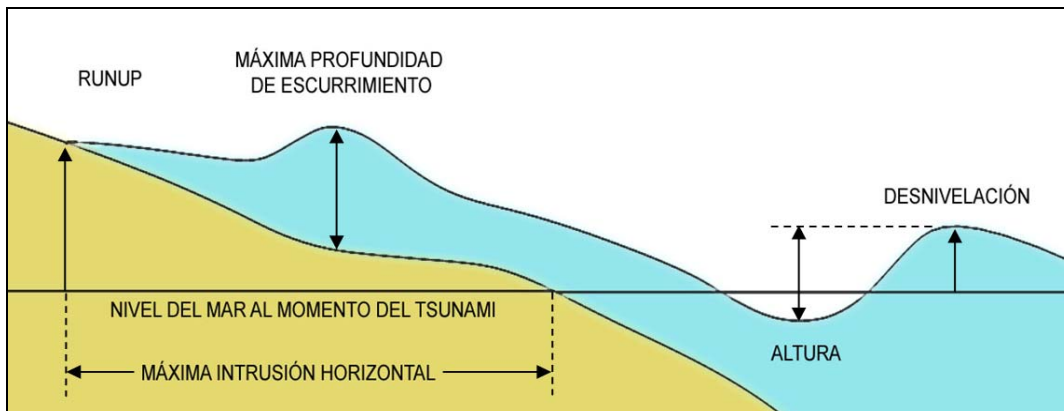
Nivel de reducción de sondas (NRS): Plano al cual están referidas las sondas o profundidades de una localidad. En Chile se adoptó como nivel de reducción de sondas el plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en el perigeo.

Cota de inundación (C): Distancia vertical entre el nivel de reducción de sondas y la superficie del agua del tsunami. Su unidad es en metros respecto de un nivel de referencia. *Ejemplo: $C = +6,0$ [m] NRS..*

Máxima profundidad de escurrimiento (P): Diferencia entre la elevación de la marca de agua local más alta y la elevación del suelo. Su unidad es en metros. *Ejemplo: $P = 5,2$ [m].*

Máxima intrusión horizontal (I): Penetración horizontal máxima del tsunami, o intrusión, desde la línea de costa. Su unidad es en metros. *Ejemplo: $I = 60$ [m]*

Figura 2-1: Definición de términos de tsunamis utilizados en este informe.



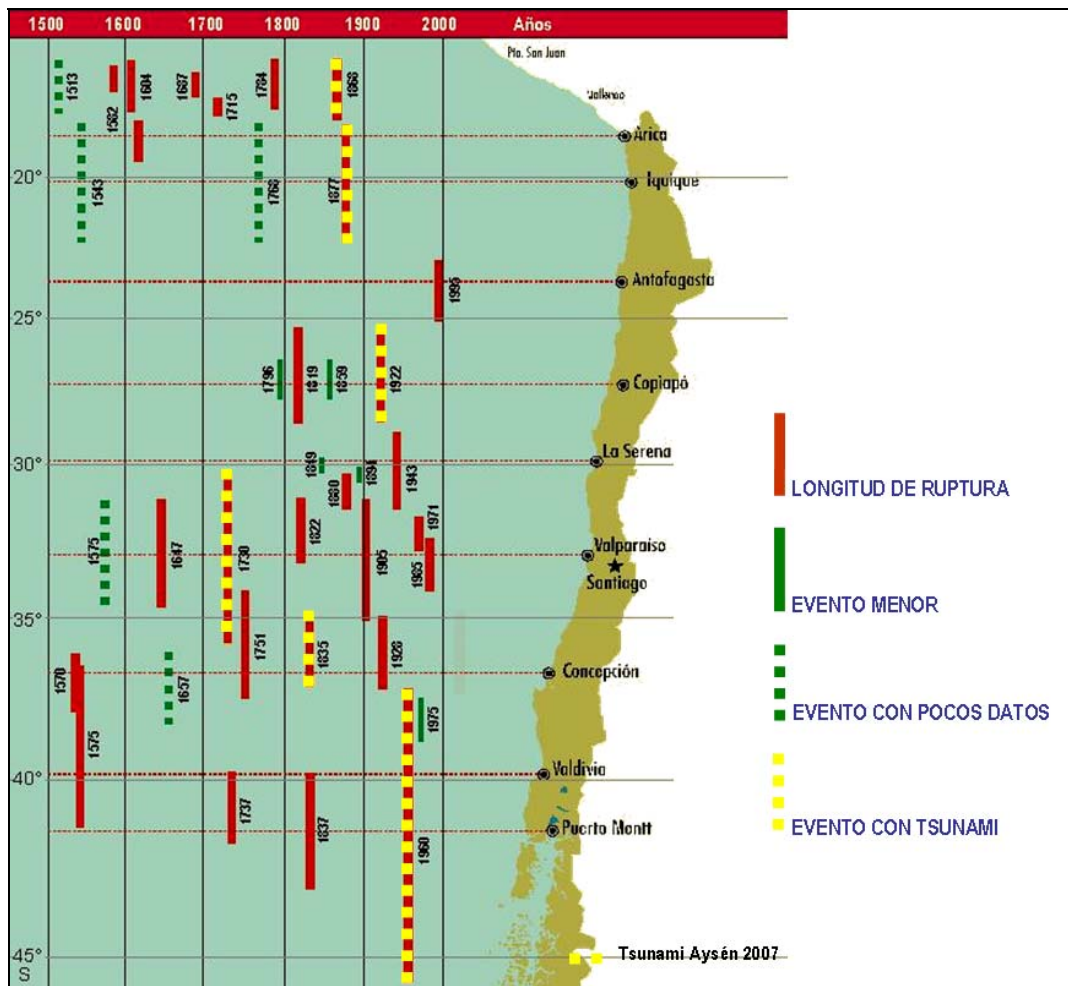
Fuente: Elaboración propia.

2.3 CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS PARA SAN JUAN BAUTISTA

2.3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El poblado de San Juan Bautista se ubica en la Bahía Cumberland, cuya configuración abierta hacia el norte lo convierte en blanco de tsunamis de campo lejano generados en la zona centro-norte de Chile y en otros lugares del cinturón de fuego del Océano Pacífico. Desde la llegada de los españoles, se cuenta con registros históricos de grandes tsunamis que han afectado las costas de Chile y que pueden haber impactado en forma directa Bahía Cumberland (Figura 2-2).

Figura 2-2: Diagrama espacio-temporal de terremotos y tsunamis históricos en Chile.



Fuente: Adaptado de información disponible en el Servicio Sismológico de Chile.

Las crónicas históricas indican que el 25 de mayo de 1751 se generó un terremoto de magnitud 8,5 y posterior tsunami que impactó al Archipiélago Juan Fernández, donde perecieron 35 personas incluyendo el Gobernador. Asimismo, el 20 de febrero de 1835 se generó un terremoto de magnitud 8 a 8,2 que afectó las instalaciones portuarias ubicadas en el poblado de San Juan Bautista. Por otra parte, algunos isleños reconocen el impacto del tsunami de 1922, cuya máxima inundación ha sido señalada mediante un monolito ubicado en San Juan Bautista, que no fue

localizado durante esta primera visita. Dada su orientación al norte, es altamente probable que los eventos de 1730, 1868 y 1877 hayan generado algún tipo de anomalía en la bahía. El terremoto de 1960 no generó grandes daños en Bahía Cumberland, según se desprende del documento *“El maremoto del 22 de mayo de 1960 en las costas de Chile”* (Ref.15), transcrito íntegramente a continuación:

A las 16.15 horas, momento en que comenzó la primera alteración en Bahía Cumberland se encontraba la mayoría de sus habitantes en el muelle o en sus cercanías observando la recalada de la goleta “Robinson Crusoe” que venía desde Valparaíso. El mar se recogió en forma lenta, aproximadamente 30 metros, medidos en sentido horizontal, produciendo gran desconcierto entre los presentes. Inmediatamente se tomaron precauciones para poner a salvo las embarcaciones menores que se encontraban en los varaderos. Siguió después seis a ocho ondas, cuya altura no fue apreciada pero que no causaron daños, con la excepción de arrastrar algunas embarcaciones que después fueron recuperadas. De lo sucedido al otro lado de la isla no hay antecedentes, pues su costa es totalmente deshabitada y de muy difícil acceso, pero seguramente esa costa fue afectada pues ella daba frente a la dirección de la cual provenían las ondas del maremoto”.

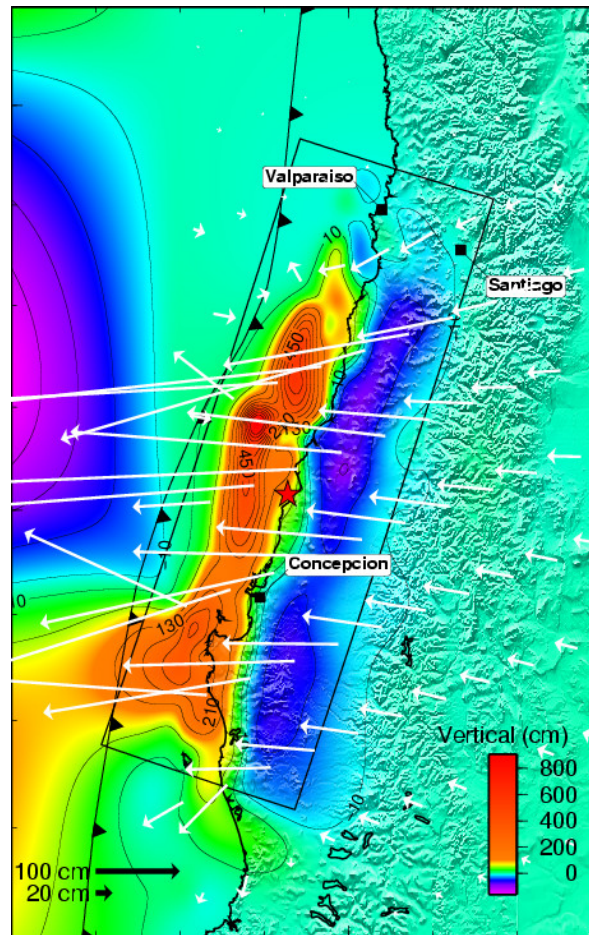
En forma espontánea, los isleños mencionan asimismo “subidas de mar” y “explosiones submarinas” sin fecha definida y comportamientos extraños de cangrejos y perros durante estos eventos, información que forma parte de la herencia cultural y debe ser refrendada con una recopilación bibliográfica en curso. En algunos casos se refieren como “mar boa”, a aquella anomalía asociada a una crecida impulsiva del nivel del mar, sin necesariamente romper como el oleaje generado por viento.

Históricamente, hay algunos registros de tsunamis en la Isla de Robinson Crusoe, los de mayor gravedad ocurridos en 1751 y en 1822. Considerando la historia sísmica y de tsunamis es esperable que sigan generándose eventos de campo lejano al norte del Archipiélago que eventualmente afectarán las zonas bajas del archipiélago. Asimismo, y a pesar del grado de protección que ofrece la bahía a los eventos generados en la costa de Chile ubicada al sur de ésta, es esperable que se generen inundaciones en San Juan Bautista, lo que queda en evidencia durante el evento del 27-02-2010.

2.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA FÍSICA DEL TSUNAMI DEL 27-02-2010

El 27 de febrero de 2010, a hora local 03:34 AM, la zona central de Chile fue sacudida por un terremoto que alcanzó una magnitud de 8.8 grados Richter, con epicentro 63 [km] al SO de Cauquenes, profundidad focal estimada en 35 [km]³, una zona de ruptura desde Pichilemu hasta el Golfo de Arauco y una longitud de ruptura estimada en 450 [km] (Figura 2-3).

Figura 2-3: Magnitud del deslizamiento en la ruptura del terremoto del 27-02-2010.



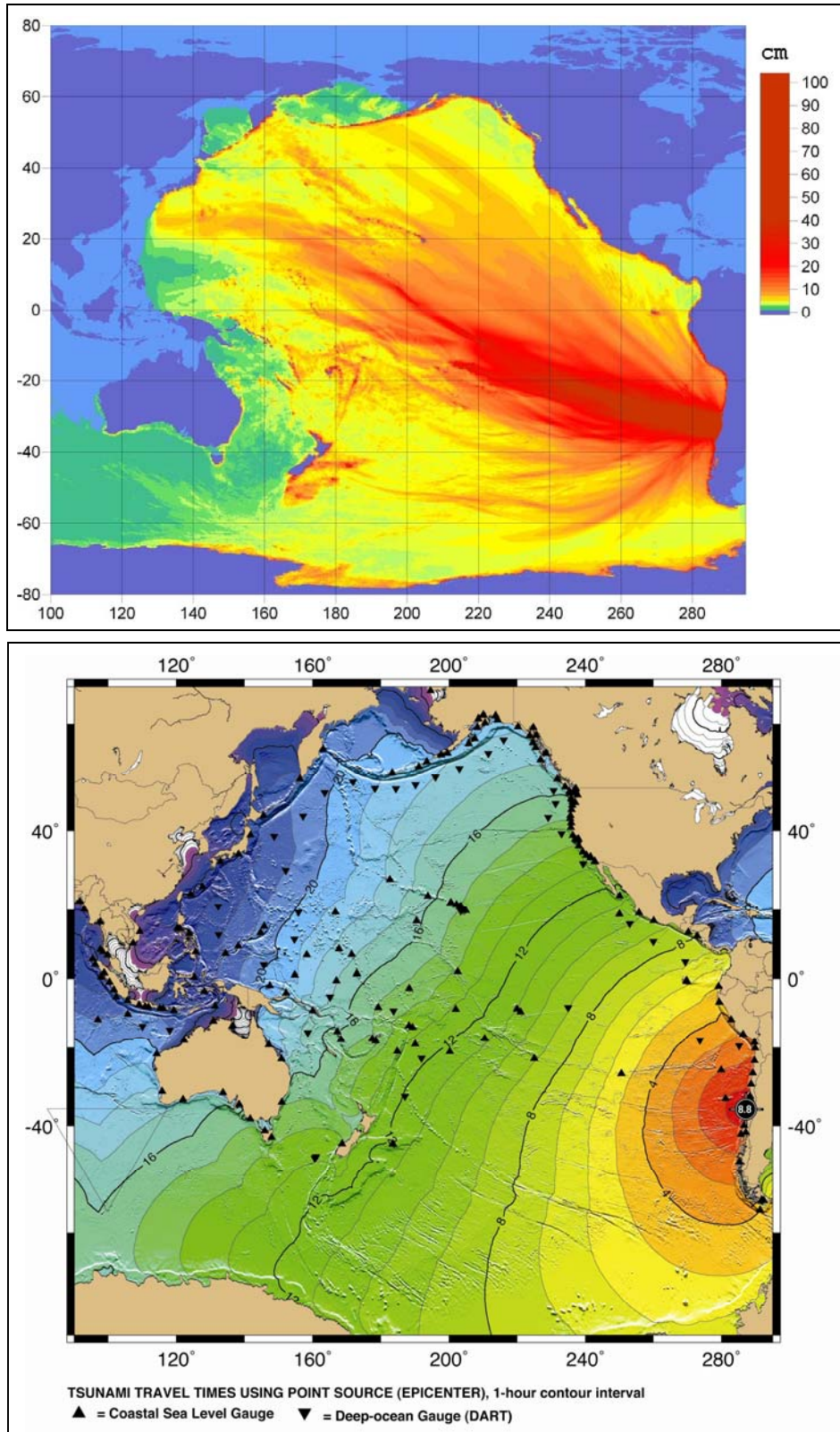
Fuente: http://tectonics.caltech.edu/slip_history/2010_chile/index.html.

El tsunami abarcó el Océano Pacífico con alturas inferiores a 1,0 [m]⁴, alcanzando las costas de Japón 22 horas después de ocurrido el terremoto, según se desprende de la simulación numérica del tsunami efectuada mediante el modelo MOST por la National Oceanographic and Atmospheric Administration, NOAA (Figura 2-4). Las ondas generadas alcanzaron las costas de la Isla Robinson Crusoe en forma de leves anomalías a partir de las 03:42 AM y como una o varias olas grandes a contar de las 04:23 AM, instante en que el mareógrafo del SHOA dejó de registrar (Figura 2-5).

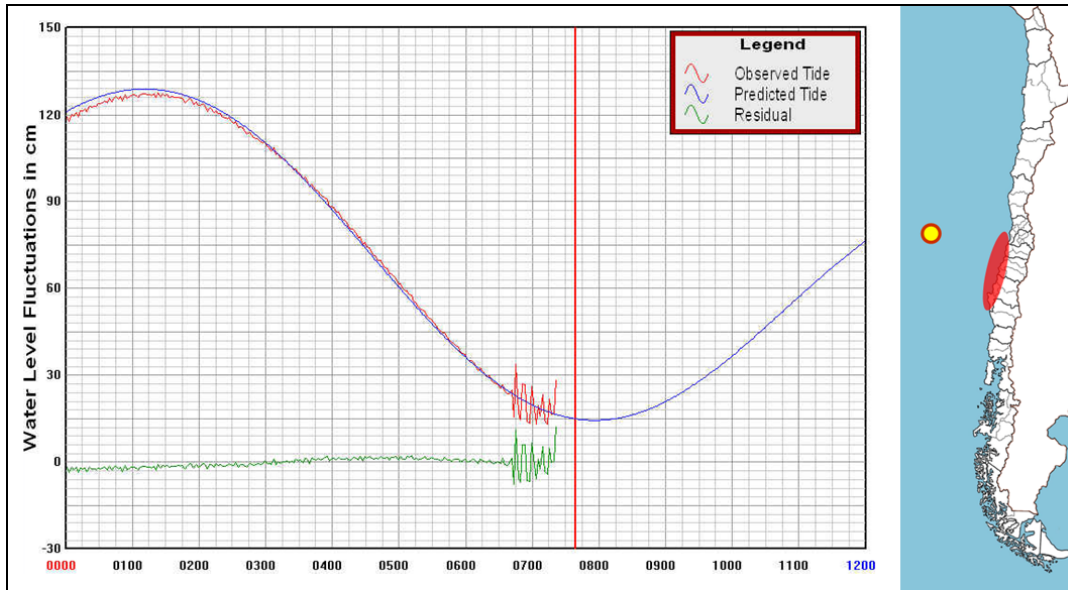
³ Información proporcionada por el NEIC: National Earthquake Information Center.

⁴ Estas alturas no representan las alturas en los asentamientos costeros que son deformados en la medida que se propagan a profundidades menores.

Figura 2-4: Simulación numérica del tsunami del 27-02-2010 en el Océano Pacífico.



Fuente: UNESCO/IOC-NOAA ITIC.

Figura 2-5: Registro del mareógrafo de Juan Fernández para el tsunami de 27-02-2010.

Fuente: <http://ioc3.unesco.org/itic/contents.php?id=667>.

Nota: La hora corresponde a zona horaria GMT y deben restarse 3 horas para obtener la hora local.

Las ondas del tsunami arrasaron la zona baja del poblado de San Juan Bautista, donde se encontraban la mayoría de los servicios públicos (Municipalidad, colegio, Correos de Chile, Capitanía de Puerto, Gimnasio Municipal, Notaría, Conaf) y gran parte de la actividad comercial y turística de la isla. La infraestructura turística se vio ampliamente dañada, puesto que aproximadamente el 80% de las hosterías y hospederías se ubicaban en la zona devastada (Ref.2). En la Figura 2-6 se presenta una fotografía aérea del poblado de San Juan Bautista antes del 27-02-2010 y en la Figura 2-7 se muestra el sector inmediato al muelle el 01-03-2010, totalmente devastado por las olas del tsunami.

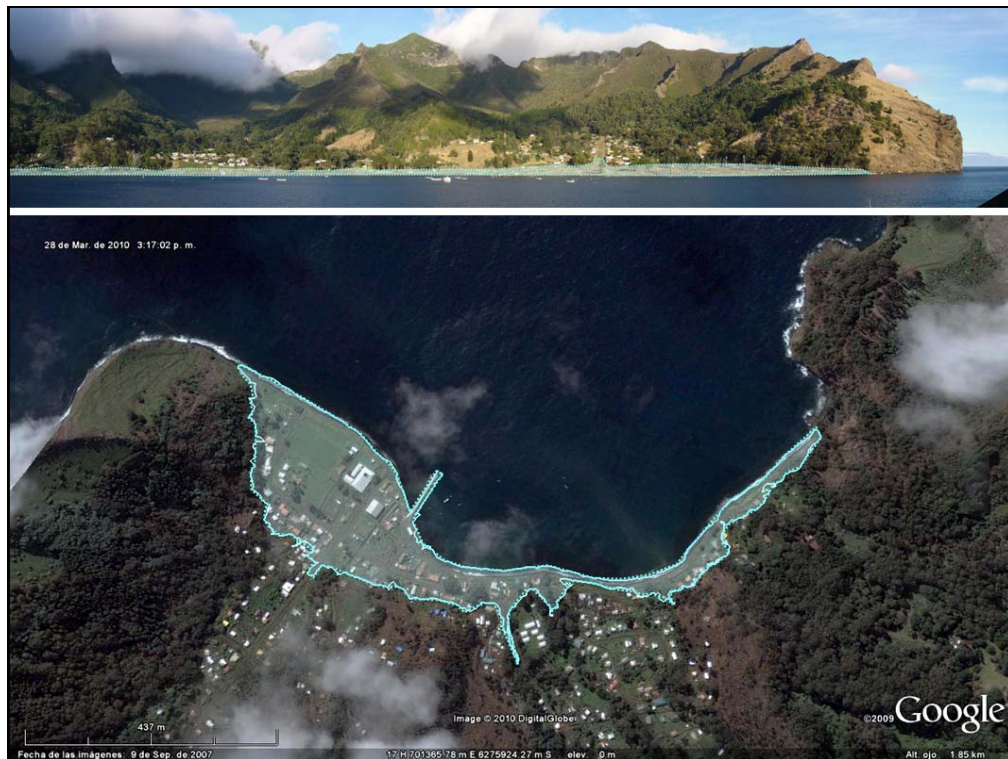
La inundación máxima alcanzó una intrusión horizontal de $I = 300$ [m] y un runup de $R = 20$ [m], según se desprende del levantamiento taquimétrico efectuado durante la salida a terreno (Figura 2-7). El máxima profundidad de escurrimiento en las cercanías del borde costero alcanzó por sobre los $P = 8$ [m] según se observa en las fotografías tomadas en el sector del Cementerio (Figura 2-8). Estas características del flujo evidencian el gran potencial destructivo de las ondas. El detalle de las mediciones en terreno se presenta en el capítulo 0 de este informe.

Figura 2-6: Vistas aéreas de San Juan Bautista antes y después del tsunami.



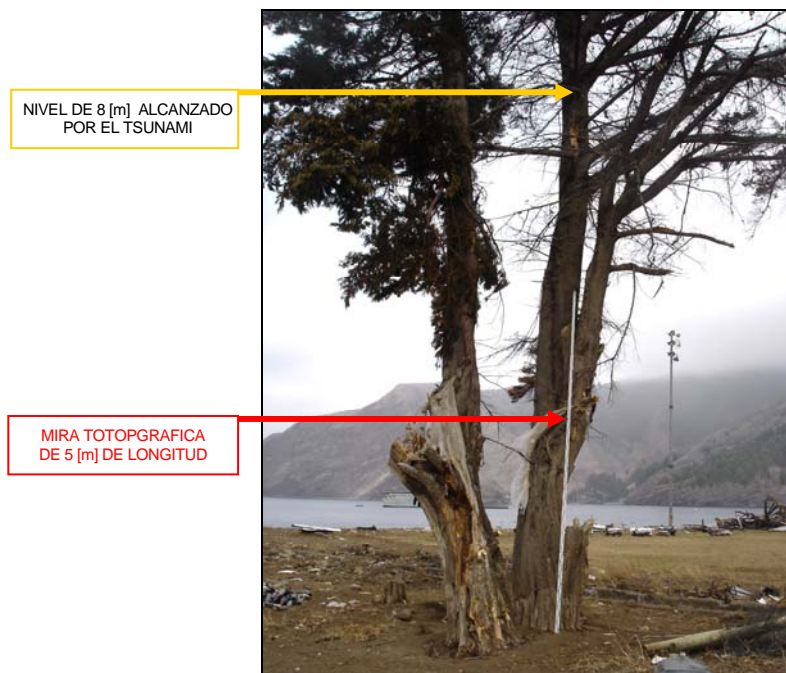
Fuente: Gentileza de Sr. Rudy Aravena Ortiz

Figura 2-7: Extensión de la inundación en el poblado de San Juan Bautista.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-8: Profundidad de la inundación en el sector del Cementerio.



Fuente: Elaboración propia.

3 TRABAJOS EN TERRENO

En este capítulo se detallan los trabajos efectuados por el equipo de terreno, en lo referido a la descripción de los efectos causados por el tsunami, los contactos y entrevistas efectuadas a isleños y autoridades además de los levantamientos topográficos de la zona de inundación.

3.1 LEVANTAMIENTOS EFECTUADOS

3.1.1 VISITA COMPRENDIDA ENTRE EL 27-03-2010 Y EL 31-03-2010

El equipo de trabajo en terreno fue conformado por el Ingeniero Civil Sr. Patricio Winckler Grez, especialista en ingeniería de puertos y costas, los Ingenieros Civiles Oceánicos (e) Sres. Christopher Zambra Araya y Mauricio Molina Pereira y el Estudiante de Ingeniería Civil Oceánica Sr. Juan Pablo Jorquera. La coordinación de los trabajos desde el continente fue efectuada por el Ingeniero Civil Sr. Mauricio Reyes Gallardo, docente de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica.

El equipo se embarcó en el Transporte Aquiles de la Armada de Chile, el cual zarpó desde Valparaíso el sábado 27-03-2010 a las 01:00 horas y arribó a Bahía Cumberland en la madrugada del domingo 28-03-2010. Por restricciones asociadas a la fecha de zarpe de la embarcación, los trabajos se efectuaron el día domingo y por tanto fueron de carácter preliminar, sin cubrir en su integridad la extensión de la zona inundada en San Juan Bautista. El retorno a Valparaíso fue el martes 30-03-2010 a las 17:00 horas.

El trabajo de terreno durante la primera visita se vio drásticamente limitado por el tiempo de permanencia del Transporte Aquiles en la rada de Bahía Cumberland. En efecto, para esa primera visita se dispuso de un tiempo de trabajo inferior a 12 horas con luz de día, permitiendo alcanzar información a nivel preliminar de las características de la inundación por tsunami en Bahía Cumberland.

3.1.2 VISITA COMPRENDIDA ENTRE EL 07-04-2010 Y EL 13-04-2010

El equipo de trabajo en terreno fue conformado por el Ingeniero Civil Sr. Mauricio Reyes Gallardo, especialista en ingeniería estructural y geotecnia, los Ingenieros Civiles Oceánicos (e) Sres. Christopher Zambra Araya, Alejandro Vera Rail y Mauricio Molina Pereira.

El equipo se embarcó en la Barcaza Valdivia de la Armada de Chile, el cual zarpó desde Valparaíso el miércoles 07-04-2010 y arribó a Bahía Cumberland el 08-04-2010. El retorno a Valparaíso fue el martes 13-04-2010. La segunda incursión a territorio insular tuvo un desarrollo más holgado, con la siguiente distribución de trabajos:

Jueves 08-04-2010	Reconocimiento general del sector bajo del poblado.
Viernes 09-04-2010	Levantamiento geodésico. Entrevista a pobladores.
Sábado 10-04-2010	Ascenso a mirador Selkirk y reconocimiento de Bahía Cumberland. Planificación de levantamiento en otras bahías. Preparación de batimetría para modelación.
Domingo 11-04-2010	Levantamiento de Bahía del Padre, Puerto Inglés, Puerto Francés y Bahía Pangal.

3.1.3 EQUIPAMIENTO UTILIZADO EN LOS LEVANTAMIENTOS

En la primera visita se efectuó un levantamiento taquimétrico orientado a definir los límites máximos de la inundación en San Juan Bautista, siguiendo la “Guía de campo para levantamientos posteriores a un tsunami” de UNESCO (Ref.24). Su utilizó un taquímetro, un nivel óptico y dos miras parlantes para evaluar cotas y dimensiones en planta de la inundación. Mediante GPS se efectuó un seguimiento de la zona de inundación. En la Figura 3-1 se presenta el amarre a la cota del SHOA, ubicada en el arranque del muelle en Bahía Cumberland.

Figura 3-1: Levantamiento topográfico efectuado en el sector del Muelle.



Fuente: Elaboración propia.

Durante la segunda visita el equipo de terreno contó con dos equipos GPS, con los cuales se registraron 250 puntos con información planimétrica y altimétrica. Los equipos utilizados son marca Garmin GPSMAP60csx, que además de contar con la recepción e información satelital, contienen una brújula de precisión menor a 2 grados sexagesimales y un sensor barométrico para perfeccionar la medición vertical siempre que éste se encuentre calibrado. La precisión horizontal es de aproximadamente 3 [m] y puede ser reducida mediante la búsqueda de más satélites. La Tabla 3-1 resume las características técnicas relevantes de estos equipos:

Tabla 3-1: Características Técnicas de Equipos GPS.

Garmin GPS60csx	
Precisión Horizontal	3 metros
Precisión Vertical	menor a 3 metros
Calibración	Brújula y sensor barométrico
Recepción satelital	12 canales
Cantidad de datos	1000 puntos
Coordenadas usadas	UTM datum WGS84 huso -17

Fuente: Elaboración propia.

Se midió de preferencia la zona inundada por el tsunami, definiendo los Run-up acusados por restos flotantes y algunos puntos en donde se podía estimar la altura de flujo desde los rastros en los árboles. Igualmente se hallaron objetos de los que se sabía su origen, de tal forma de obtener alguna información de las trayectorias de los flujos. Además, se dispuso de un taquímetro y miras graduadas. En cuanto a transporte marítimo, la Armada facilitó el desplazamiento del equipo de terreno en la lancha Arcángel y en dos botes zodiac pertenecientes a la dotación de la Barcaza Valdivia.

3.1.4 CONTACTOS EFECTUADOS

En la fase previa a la salida a terreno se efectuaron una serie de reuniones de coordinación con autoridades, instituciones y personas naturales interesadas en contribuir con la campaña de reconstrucción del poblado de San Juan Bautista. En principio, el Rector Sr. Aldo Valle Acevedo, directivos y académicos de la Universidad de Valparaíso recibieron con fecha 09-03-2010 al alcalde de Juan Fernández, Sr. Leopoldo González Charpentier, para definir los alcances del apoyo de la Universidad en el marco del compromiso que ha asumido para dar apoyo integral a la zona más allá de la emergencia. A partir de esta reunión se planificó la primera salida a terreno, cuyos resultados se sintetizan en este informe.

Durante los trabajos en terreno se tomó contacto con autoridades locales, pobladores y personas del continente que de alguna manera se vinculan con la isla y con las labores de reconstrucción. La lista de personas contactadas y sus afiliaciones se incluye en el Anexo 01 de este documento. Cabe destacar que durante la visita se identificaron diversas organizaciones que habían comprometido ayuda a la Isla Robinson Crusoe tales como la I. Municipalidad de Lo Barnechea o la iniciativa Levantemos Chile, ONG's como la Sociedad Bíblica Chilena, universidades como la Pontificia Universidad Católica de Chile a través de su estación de biología marina, la Universidad de Playa Ancha en lo referido a ordenamiento territorial y la Universidad Católica de Valparaíso, presente a través de una misión religiosa.

Asimismo, el Director de Obras Municipales de la I. Municipalidad de Juan Fernández, Sr. Antonio Salas Ponce, proporcionó antecedentes del proyecto de Plan Regulador Comuna Juan Fernández, en formato SIG, donde se encuentra la topografía del poblado de San Juan Bautista.

3.2.1 PUERTO FRANCÉS

Por su ubicación hacia el Este de Bahía Cumberland, la información respecto a los niveles alcanzados por la inundación en Puerto Francés es muy relevante para la caracterización del fenómeno. El sector fue afectado gravemente por el tsunami, desapareciendo un turista que fue arrastrado por efecto de la inundación y el refugio de CONAF resultó totalmente destruido. Lamentablemente, esas personas resultaron desaparecidas.

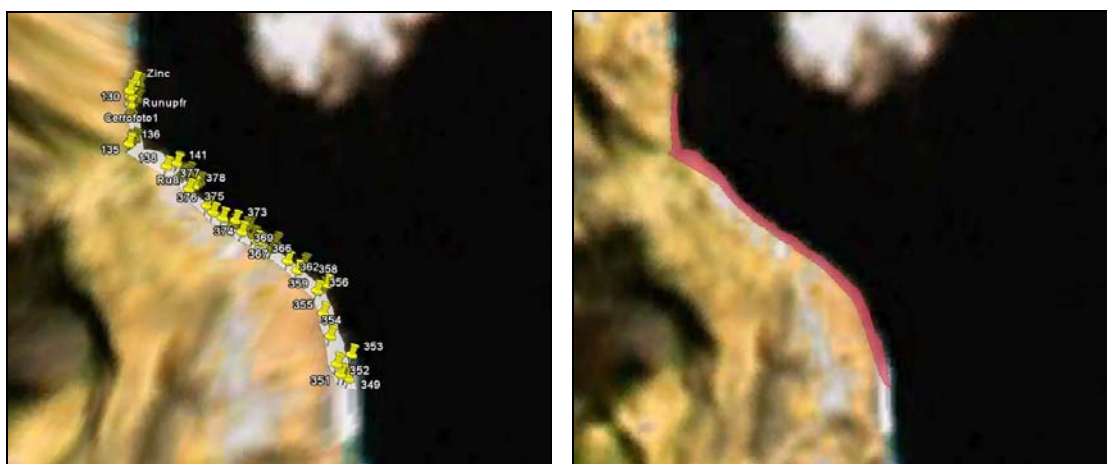
El terreno costero corresponde a un pequeño valle aluvial, con un canal natural de escurrimiento de aguas lluvias. En sus márgenes se ubicaba el refugio de CONAF y una zona de camping. No hay información cualitativa del fenómeno, pero se puede inferir que hubo un encajonamiento del flujo, con velocidades importantes y gran capacidad de arrastre. En la Figura 3-3 se muestran vistas de Puerto Francés y en la Figura 3-4 se presenta la inundación estimada en el sector.

Figura 3-3: Vista general de Puerto Francés.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-4: Inundación en Puerto Francés.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 BAHÍA EL PANGAL

La Bahía El Pangal se ubica inmediatamente al este de Bahía Cumberland (Figura 3-5). Corresponde a una rada natural de paredes acantiladas, con fondo rocoso e irregular, y una pequeña playa de rocas. Tiene en su costa algunas edificaciones, situadas a unos 10 o 12 [m] sobre el nivel medio del mar (Figura 3-6). En este sector se cuenta únicamente con registros cualitativos sobre la inundación, con run-ups de $R = 6$ [m] sobre el nivel medio del mar.

Figura 3-5: Ubicación de bahía El Pangal.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 BAHÍA CUMBERLAND

En Bahía Cumberland se recogió información detallada en sectores de topografía irregular o zonas con canalización del flujo. La Figura 3-6 se presenta la inundación estimada en el sector. La Figura 3-7 y Figura 3-8 presentan imágenes antes y después del tsunami.

Figura 3-6: Inundación en Bahía Cumberland.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-7: Fotografías antes y después en San Juan Bautista, Bahía Cumberland.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-8: Fotografías antes y después en San Juan Bautista, Bahía Cumberland.



Fuente: Elaboración propia.

Se sostuvo entrevistas con sobrevivientes y testigos oculares del tsunami, seleccionados de aquellas personas que habían logrado asumir los aspectos emocionales de la experiencia. No se entrevistó a personas que hubiesen sufrido pérdidas de familiares o que no quisieran conversar sobre su experiencia. En tal sentido, el equipo realizó las consultas a la psicóloga del consultorio, a fin de obtener recomendaciones sobre personas en condiciones de ser entrevistadas.

Las entrevistas permiten extraer las siguientes características sobre la evolución del fenómeno. Para facilitar la comprensión del texto se incluye la Figura 3-9, con las referencias principales citadas por los testigos.

- Algunos testigos señalan haber percibido un temblor leve pasadas las 3:30 AM, sin certeza respecto a la hora de percepción de ese sismo. De la interpretación de las entrevistas se estima una intensidad 2 a 3 en la escala de Mercalli.
- La manifestación inicial del tsunami ocurrió entre las 4:10 y 4:15 AM inundando hasta la mitad de la cancha de fútbol de manera lenta y silenciosa. Pudo ser observada por la luz proveniente de las instalaciones para estudios nucleares efectuados por entidades científicas extranjeras, según relataron los propios testigos. Cerca de esa posición se encontraba el generador de energía, que queda fuera de operación con la segunda ola.
- Algunas personas que permanecían despiertas observaron la irrupción inicial de la onda y dieron la alarma en forma oral. Luego del corte de energía, se oye el “gong” de alerta desde el cuartel de carabineros. Puede inferirse que la primera entrada de agua no generó suficiente ruido como para despertar a la totalidad de los residentes. Su carácter sorpresivo tampoco permitió avisos de alerta masivos. Testigos sorprendidos por el flujo en la zona baja del poblado, se percataron del tsunami por el ruido proveniente desde el sector “El Palillo”, con sonido asociable a vidrios y estructuras en rompimiento. La oscuridad no permitía observar el agua, pero se escuchaba su avance.
- Se observa una recogida del mar, descrita por una sobreviviente que quedó de pie sobre el fango. Se estima en alrededor de 30 a 50 [m] desde la línea de costa. La oscuridad reinante quita rigor a esta observación y explica el hecho que no todos los sobrevivientes se percataron de la recogida del mar.
- Luego de la recogida del mar se observa una ola desde el Este e inmediatamente una ola desde el Noroeste. A las 4:20 AM la inundación alcanza el inicio del camino La Pólvora. Testigos indican un burbujeo en la zona superior del flujo y remolinos en el sector de la plaza. Una segunda ola llegó de improviso nuevamente a gran velocidad, descrita desde el sector “El Palillo”. El mayor peligro lo configuraba la gran cantidad de escombros flotando y arrastrados por el agua.
- Luego de esta ola el desarrollo de la inundación fue errático, con corrientes importantes en la superficie, representadas por la traslación relativamente rápida de botes u otros elementos en flotación. Los botes habrían soltado amarras por efectos de una tercera ola proveniente desde el Oeste.
- Un testigo observó la destrucción del gimnasio, explicable por implosión debido a la presión hidráulica exterior, que provocó el colapso de la estructura metálica hacia su interior. Ocurrió poco después de pérdida la energía eléctrica. La inundación alcanzó niveles elevados a velocidad tal que produjo “burbujas” interiores en las viviendas, con su consiguiente flotación, traslado y ruptura final por desprendimientos techumbres. La ruptura de ventanales en la primera ola generó flujos que expulsaron a personas y objetos desde el interior de las estructuras.

- Los sobrevivientes que permanecían flotando se hallaban detrás de la zona de escombros flotantes (mar adentro). Hubo maniobras de rescate que fueron abortadas por la irrupción de la segunda y tercera ola. Los testigos no indican estimaciones de la recogida, pues aparentemente por la oscuridad reinante no se pudo visualizar.

Figura 3-9: Referencias principales en Bahía Cumberland.



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

3.2.3.1 ESTIMACIÓN DE LA INUNDACIÓN EN EL SECTOR DEL FARO SAN CARLOS

La Armada de Chile disponía de un faro de 8 [m] de altura a los pies del acantilado oeste de Bahía Cumberland, materializado en fibra de vidrio con base de hormigón armado (Figura 3-10). El tsunami provocó su desplazamiento por flotación y posterior fractura estructural, hallándose sólo los restos de la base de hormigón y parte de la estructura vertical. El desplazamiento en planta alcanzó unos 10 [m] hacia el oeste de la posición original (Figura 3-11).

De acuerdo a las propiedades geométricas y dinámicas del faro, se estimó el nivel de inundación mínimo que garantiza la flotación del faro, cálculo que permite en forma indirecta, evaluar la profundidad del flujo en el sector. Los resultados se presentan en la Tabla 3-2, a partir de la cual se puede estimar que la profundidad mínima de escurrimiento que garantiza flotación es de 4,25 [m] sobre la cota del sello de fundación.

Figura 3-10: Faro San Carlos antes y después del tsunami, en Bahía Cumberland.



Fuente: Elaboración propia y Google Earth.

Figura 3-11: Restos del faro San Carlos, en Bahía Cumberland.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-2: Estimación de fuerzas sobre el faro de Bahía Cumberland.

ESTRUCTURA	VOLUMEN [m ³]	DENSIDAD [ton/m ³]	PESO MATERIAL [ton]	ALTURA DE AGUA SOBRE SELLO DE FUNDACIÓN [m]	VOLUMEN DESPLAZADO [m ³]
				4,25	
BASE H.A.	6,13	2,4	14,7		6,13
Ancho	[m]	3,5			
Largo	[m]	3,5			
Alto	[m]	0,5			
BASE CÓNICA TRUNCADA DE FIBRA DE VIDRIO	0,05	1,6	0,1		2,37
Diámetro superior	[m]	1,64			
Diámetro inferior	[m]	2,34			
Altura	[m]	0,74			
Espesor	[m]	0,01			
ESTRUCTURA CILÍNDRICA DE FIBRA DE VIDRIO	0,38	1,6	0,6		6,50
Altura	[m]	7,3			
Diámetro	[m]	1,64			
Espesor	[m]	0,01			

EMPUJE TOTAL [ton]	15,4
PESO TOTAL [ton]	15,4
FLOTACIÓN	SÍ

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.2 DAÑOS EN EL MUELLE DE BAHÍA CUMBERLAND

A continuación se presentan las observaciones efectuadas por el ingeniero Sr. Guillermo Jaramillo Castro de la Dirección de Obras Portuarias del MOP con fecha 05-03-2010, y corroboradas por los autores de este documento en calidad de especialistas en obras portuarias.

La infraestructura portuaria de Bahía Cumberland se encuentra en buenas condiciones, sin daños estructurales que afecten su funcionamiento. En el caso de Bahía Cumberland el muelle no se encuentra en condiciones de recibir el atraque de embarcaciones mayores debido a la destrucción parcial de las defensas de caucho.

El borde costero de Bahía Cumberland resultó seriamente afectado, dado que prácticamente todas las estructuras de defensa existentes en el área utilizada por los pescadores resultaron dañadas. En el sector sur del muelle, el muro que protegía la explanada de servicio para los pescadores se volcó en una longitud de 40 [m] aproximadamente por efecto de socavación. En el costado norte del muelle se volcaron los muros de hormigón que protegen la rampa existente. Tanto los boxes como las instalaciones de servicio utilizadas por los pescadores resultaron totalmente destruidas. Producto de las acciones hidrodinámicas asociadas a la marea y el oleaje se espera que continúe la socavación y arrastre de material en dicho sector, por lo que debieran tomarse las medidas preventivas antes de la ocurrencia de los temporales de invierno. La solución provisoria de gaviones propuesta por la DOP debe ser secundada por una solución definitiva de emergencia a construir durante la primavera de 2010.

Figura 3-12: Muelle en Bahía Cumberland, en la ribera norte de isla Robinson Crusoe.



Fuente: Elaboración propia. Fotografía tomada un mes después del tsunami.

3.2.4 PUERTO INGLÉS

Ubicado hacia el Oeste de Bahía Cumberland, Puerto Inglés es uno de los lugares de mayor atractivo turístico de la isla, pues en éste se ubica una caverna donde Alejandro Selkirk residió en su permanencia como único habitante. Cuenta con una playa rocosa de pronunciada pendiente, al término de un valle aluvial relativamente extenso y con una canalización natural de escurrimiento de aguas lluvias. Se observaron escasos antecedentes que permitiesen inferir una cota de inundación por tsunami, asumiéndose como línea probable de run-up la propia defensa natural de bolones, en su cota media, que se indica en Figura 3-13 y Figura 3-14.

Figura 3-13: Línea probable de run-up en Puerto Inglés.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-14: Inundación en Puerto Inglés.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-16: Infraestructura portuaria en Bahía el Padre.

Fuente: Gentileza de Srta. Keila Alanis. Fotografía tomada antes del tsunami.

3.2.6 CALETA SELKIRK

El poblado de Selkirk se ubica en la costa oriente de la isla homónima, y no cuenta con abrigo natural ni artificial (Figura 3-17). Es habitado en forma esporádica, para faenas de pesca, caza o administración de CONAF, y la noche del 27 de febrero de 2010 había gente residiendo en ella. Por ese motivo, al momento de ocurrido el tsunami los pobladores de Robinson Crusoe suponían lo peor para quienes habían estado esa noche en Selkirk. Sin embargo, la onda de tsunami prácticamente pasó desapercibida en la rada de Selkirk, con un run-up cercano a 3 [m]. Según testigos, en el sector de la Lobería, la inundación alcanzó unos 200 [m] en planta. Las imágenes siguientes describen las zonas señaladas.

Figura 3-17: Isla Alejandro Selkirk (arriba), Caleta Selkirk (izq) y la Lobería (der).



Fuente: Elaboración propia.

4 DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR EL TSUNAMI

En la literatura se reconocen una serie de daños directos asociados al impacto de tsunamis, los cuales se presentan en este capítulo mediante ejemplos registrados luego del terremoto y tsunami del 27/02/2010 en el poblado de San Juan Bautista. Los daños observados se agrupan en los siguientes aspectos:

- Pérdidas humanas y de animales por ahogamiento
- Fallas de tipo estructural, socavación y fallas de fundaciones
- Arrastre de embarcaciones y elementos flotantes
- Pérdida de servicios básicos y líneas de vida
- Impactos sobre la morfología y los ecosistemas marinos
- Contaminación

4.1 PÉRDIDAS HUMANAS Y DE ANIMALES POR AHOGAMIENTO

La cifra de fatalidades en la isla Robinson Crusoe alcanzó 12 muertos y 6 desaparecidos (Tabla 4-1). Parte de los muertos fueron enterrados en el cementerio, como por ejemplo Maite Arredondo Recabarren, hija de un Guardaparque (Figura 4-1), y otros fueron llevados al continente. El cementerio fue devastado por las olas y gran parte de las osamentas desaparecieron por las corrientes de resaca, dejando sólo algunas lápidas en pie.

A diferencia de lo ocurrido en el continente, no se sintió un movimiento telúrico significativo en el Archipiélago, razón por la cual pocos de los habitantes de la zona afectada estaban despiertos al momento del ataque de las olas. Diversos son los relatos de personas que salvaron sus vidas nadando en aguas turbulentas, algunas aferradas a escombros o árboles, con la escasa iluminación que proporcionaba la luna llena en una noche parcialmente nublada. Parte de estas entrevistas ha sido grabada en video por el equipo de terreno y está en proceso de edición.

Tabla 4-1: Relación de fallecidos y desaparecidos en Isla Robinson Crusoe.

Nº	Relación de Fallecidos	Calidad	Edad	Nacionalidad
1	Luis Amador López Camacho	Fallecido	65	Chilena
2	Alma Berta Gómez Olmos	Fallecido	61	Chilena
3	Paula Ayerdi Retamales	Fallecido	28	Chilena
4	Elsa Silva Saavedra Saavedra	Fallecido	50	Chilena
5	María Angélica Erices Oñate	Fallecido	35	Chilena
6	Luis Petersen Herrera	Fallecido	92	Chilena
7	Juan Palma Azocar	Fallecido	65	Chilena
8	Isabel Araya Pino	Fallecido	55	Chilena
9	Maite Arredondo Recabarren	Fallecido	13	Chilena
10	Matías Brito Schiller	Fallecido	7	Chilena
11	Víctor Manuel Contreras Bravo	Fallecido	S.D.	S.D.
12	María Inés Herrera Guerrero	Fallecido	S.D.	Chilena
13	Javier Escalona Chamorro	Desaparecido	8	Chilena
14	Dora Camacho	Desaparecido	70	Chilena
15	María Angélica Pérez	Desaparecido	37	Chilena
16	Acsa Chamorro Green	Desaparecido	18	Chilena
17	Joaquín Ortiz Fajardo	Desaparecido	8	Chilena
18	Miguel Marin	Desaparecido	29	Española

Fuente: Adaptado de la Ref.3. Nota: S.D. = Sin Data.

Figura 4-1: Tumba de Maite Arredondo Recabarren en el Cementerio.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 FALLAS DE TIPO ESTRUCTURAL, SOCAVACIÓN Y FALLAS DE FUNDACIONES

Se detectaron fallas por impacto y flotación en prácticamente todas las edificaciones ubicadas en la zona inundada (Figura 2-6 y Figura 2-7). Al cierre de este informe, un grupo de isleños trabaja en la elaboración de un catastro individualizado de los daños y pérdida de vidas generados sobre todas las edificaciones afectadas por el tsunami que complementa al catastro preliminar efectuado por la ONEMI, y que se encuentra adjunto al presente documento.

Los daños están asociados a las fuertes corrientes de resaca y a flotación de viviendas livianas y elementos flotantes, que contribuyen al potencial destructivo de las ondas. A modo de ejemplo, en la Figura 4-2 se muestra una vista parcial de la zona afectada: en primer plano se observan las fundaciones (poyos) de las instalaciones la I. Municipalidad, que resultó completamente destruida por el ataque de las olas.

Figura 4-2: Vista parcial de la zona arrasada por el tsunami



Fuente: Elaboración propia.

El tipo de fallas generalizada en las fundaciones se presenta en la Figura 4-3, donde se observan los restos del pub El Pez Volador, ubicado en la primera línea de edificaciones del borde costero. Los "poyos" fueron contruidos con bases de hormigón de unos 20 a 30 [cm], que colapsaron debido a la socavación general del suelo y a la socavación local producto de la interacción del flujo con la estructura. Asimismo, se observa que la unión entre los "poyos" y las vigas que soportan el piso de la vivienda es débil, lo que genera un desprendimiento de la parte superior de la estructura, actuada por fuerzas hidrodinámicas de presión (proporcionales a la profundidad del flujo), de arrastre (proporcionales a la velocidad del mismo) y flotación. Las uniones entre muros y de muros con techumbres también evidenciaron desprendimiento en aquellos pocos casos en que pudieron identificarse (gran parte de los escombros no permitían identificación alguna) lo que denota una debilidad constructiva que debe subsanarse.

En la sección 0 de este documento se proponen recomendaciones para tipologías de viviendas adecuadas para zonas de riesgo de inundación, propuestas por equipos de ingenieros y arquitectos después del tsunami del 26-12-2004 en Sumatra-Andamán, Océano Índico, donde fallecieron alrededor de 250.000 personas y gran parte de las viviendas e instalaciones costeras colapsaron. El estudio y adaptación de estas recomendaciones debe efectuarse como parte de los trabajos necesarios para la reconstrucción del poblado de San Juan Bautista.

Figura 4-3: Socavación de fundaciones en el Pez Volador, cerca de la rampa.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 ARRASTRE DE EMBARCACIONES Y ELEMENTOS FLOTANTES

Las ondas arrastraron a la gran mayoría de las embarcaciones ubicadas en Bahía Cumberland, provocando el naufragio de algunas y el vertido de combustibles en el agua. A modo de ejemplo, se menciona el caso de la embarcación “Carrera”, atracada al oeste del muelle antes del ataque de las olas, y que fuera desplazada por sobre el mismo y depositada a unos 200 [m] al este, según se observa en la esquina inferior derecha de la Figura 4-4. Al momento del cierre de esta edición, se temía por el eventual vertido del combustible de los estanques que aparentemente aun estaban depositados.

Figura 4-4: Embarcación “Carrera”, hundida al este de la rampa.

Fuente: Elaboración propia.

Otro ejemplo lo constituye la lancha “Alborada” (Figura 4-5), que se ubicaba sobre un carrito en el sector de la rampa, y que fue desplazada al Este por las olas en alrededor de 110 [m] hasta impactar un árbol.

Figura 4-5: Lancha pesquera “Alborada” desplazada desde la rampa.



Fuente: Elaboración propia.

4.4 PÉRDIDA DE SERVICIOS BÁSICOS Y LÍNEAS DE VIDA

Gran parte de las instalaciones de telecomunicaciones y servicios básicos fueron arrasadas por las olas, dejando prácticamente paralizada a la isla luego del tsunami. A modo de ejemplo, en el centro de la Figura 4-6 se muestra el estado de destrucción de la antena de Internet, y en la Figura 4-7 se ilustra la antena de canal 13.

Figura 4-6: Destrucción de la antena de Internet, tras la Municipalidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-7: Destrucción de la antena de Canal 13.



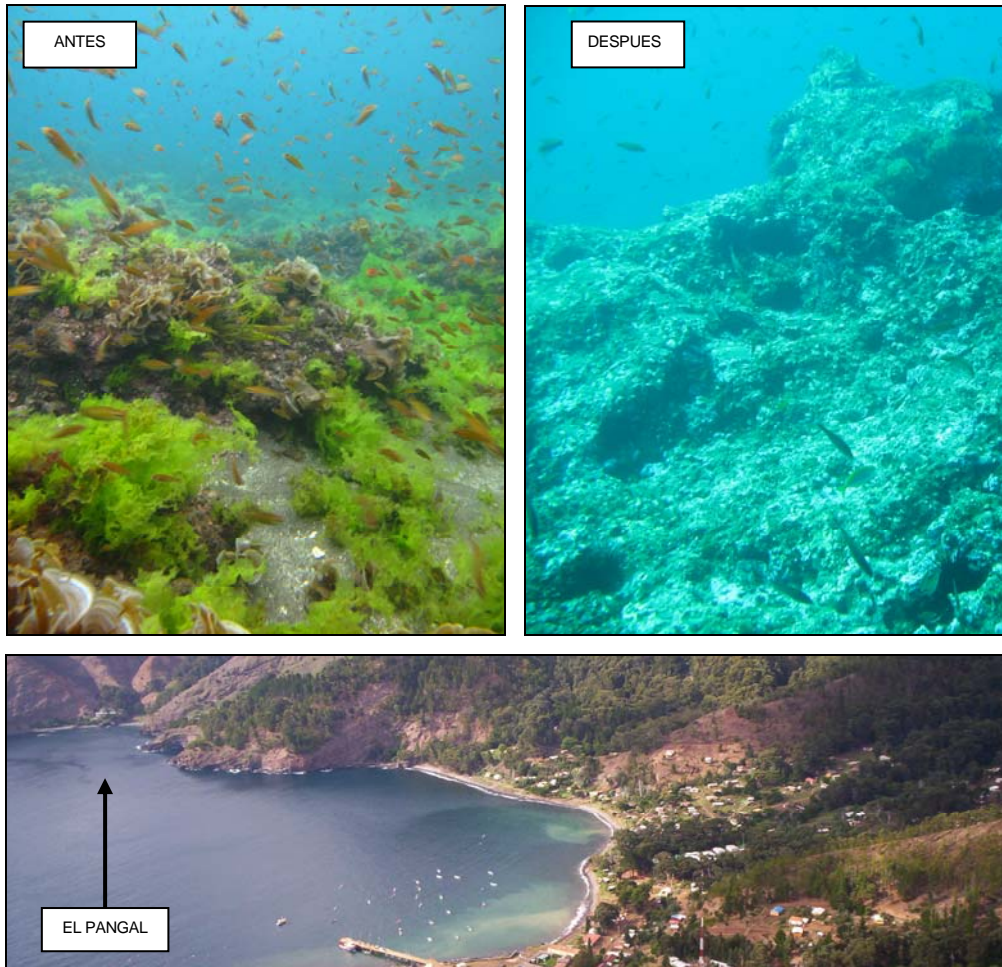
Fuente: Elaboración propia.

En la sección 5.2.4 de este documento se presentan algunos criterios de emplazamiento y estructuración de líneas de vida e instalaciones esenciales para combatir la emergencia.

4.5 IMPACTOS SOBRE LA MORFOLOGÍA Y LOS ECOSISTEMAS MARINOS

De acuerdo a una inspección submarina efectuada por el Biólogo Marino Sr. Florian Schneider en la zona de El Pangal el 28-03-2010, en el extremo occidental de Bahía Cumberland, se modificó drásticamente el ecosistema debido al arrastre de las rocas que daban sustrato a la fauna bentónica entre la superficie y los 15 [m] de profundidad. Por efecto del tsunami, estas formaciones fueron reemplazadas por arena y rocas de tamaño menor, en tanto que las cuevas existentes que albergaban comunidades de peces, esponjas y equinodermos fueron cubiertas por los sedimentos. Las rocas desplazadas tenían dimensiones de varios metros, lo que sugiere la presencia de corrientes con una gran capacidad de arrastre. Las pocas rocas remanentes fueron "blanqueadas" de organismos bentónicos por la rodadura de las mismas e impacto con otros escombros. Incluso a 20 [m] de profundidad se evidenciaron efectos significativos que se asocian a un desplazamiento de masas de agua en toda la columna de agua, dada la condición de onda larga del tsunami en su arribo a profundidades bajas. El tsunami arrastró organismos vivos a la superficie y se encontraron pepinos de mar, peces, estrellas, pulpos y langostas en la zona de inundación.

Figura 4-8: Fondo marino en el sector El Pangal, Bahía Cumberland.

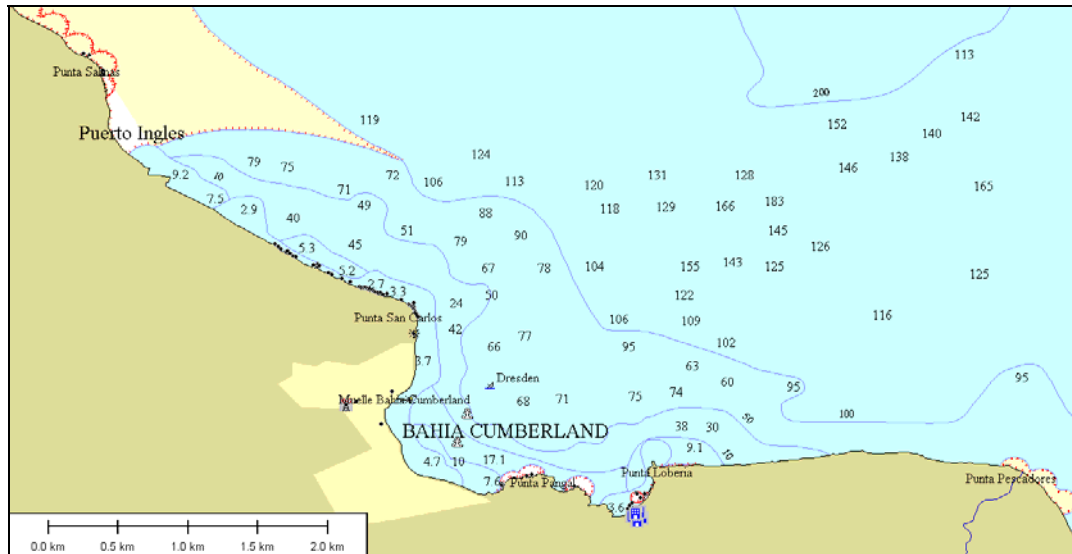


Fuente: Gentileza del Sr. Florian Schneider.

En el sector Puerto Inglés, a 1, 5 [km] al este de Bahía Cumberland (Figura 4-9) no se observaron alteraciones significativas del fondo marino. El fondeo de dos correntómetros, ubicados a 5 y 36 [m] de profundidad, constituido de dos muertos de 70 [kg] c/u y línea de anclaje de acero, no experimentó desplazamientos. Esto sugiere que la hidrodinámica del tsunami fue muy sensible a las condiciones locales de Bahía Cumberland y menor en sectores más abiertos, donde las aceleraciones advectivas debidas al cambio de la batimetría tienden a ser menores. En condiciones normales, las corrientes alcanzan máximos superficiales en torno a 0,5 [m/s].

Cabe mencionar que la isla Robinson Crusoe constituye un ecosistema único, debido a su alto grado de endemismo. Esta característica difiere con el continente, donde las corrientes litorales generan un flujo larval con dirección predominante sur a norte. En consecuencia, es esperable que el sistema ecológico experimente una regeneración lenta e incluso puede darse un proceso irreversible debido a la alteración significativa de la red trófica.

Figura 4-9: Ubicación de Puerto Inglés, donde no se registraron grandes daños.



Fuente: Carta digitalizada del SHOA.

4.6 CONTAMINACIÓN

Por efecto del flujo de resaca del tsunami, se removieron grandes cantidades de material que fueron depositados en el fondo y quedaron flotando en la bahía. En el sector El Palillo se acumularon elementos flotantes según se observa en la Figura 4-10, proporcionada por el Sr. Rudy Aravena Ortiz, Presidente Cámara de Comercio y Turismo Isla Robinson Crusoe.

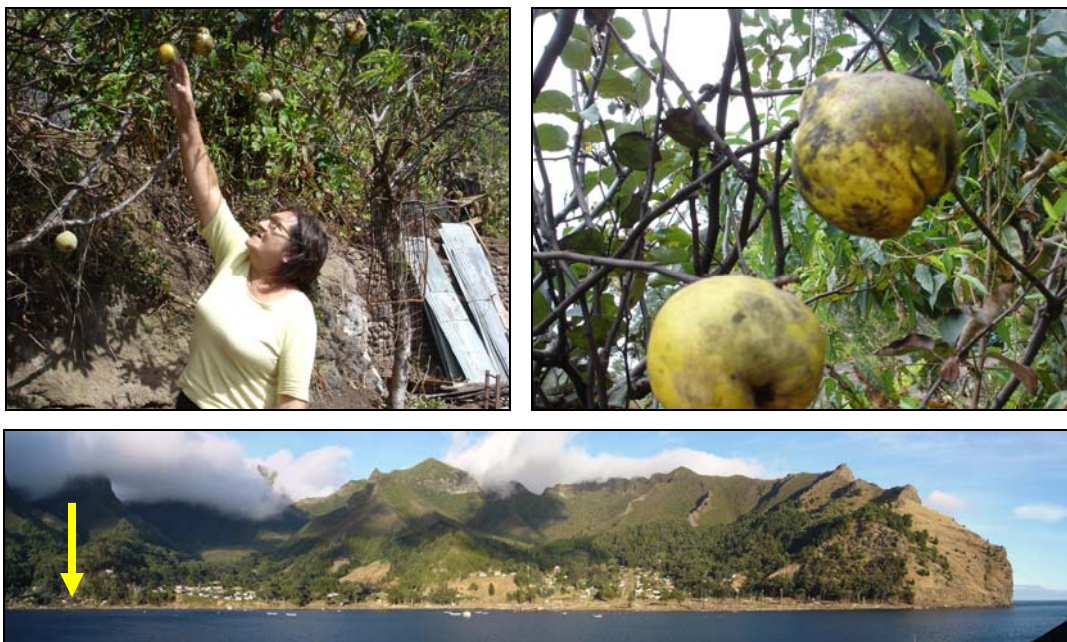
Figura 4-10: Escombros flotantes el día posterior al tsunami en el sector del Palillo.



Fuente: Gentileza de Sr. Rudy Aravena Ortiz.

La contaminación por escombros en el fondo de la bahía y en los sectores bajos del poblado de San Juan Bautista fue sucedida asimismo por contaminación de hidrocarburos provenientes de los estanques de acumulación utilizados en motores y generadores eléctricos ubicados en la zona arrasada. A modo de ejemplo, en la Figura 4-11 se presenta el caso de árboles de membrillo contaminados con petróleo en el predio de la Sra. Isaira Condell, ubicado en el sector del Palillo.

Figura 4-11: Árboles contaminados con petróleo en el predio de la Sra. Isaira Condell.



Fuente: Elaboración propia.

5 RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan una serie de recomendaciones que servirán para definir las acciones de reconstrucción de la zona afectada por el tsunami en el poblado de San Juan Bautista. En general, los principios a considerar en este proceso que se proponen desde las perspectivas de la ingeniería, planificación y educación, son los siguientes:

- Evaluar el riesgo de tsunamis
- Considerar criterios de tsunami en instalaciones costeras
- Incorporar el riesgo de tsunamis en la planificación urbana
- Implementar un plan de evacuación
- Implementar un plan de educación
- Recuperar la memoria histórica del Archipiélago

El detalle de cada una de estas acciones se presenta a continuación:

5.1 EVALUAR EL RIESGO DE TSUNAMIS

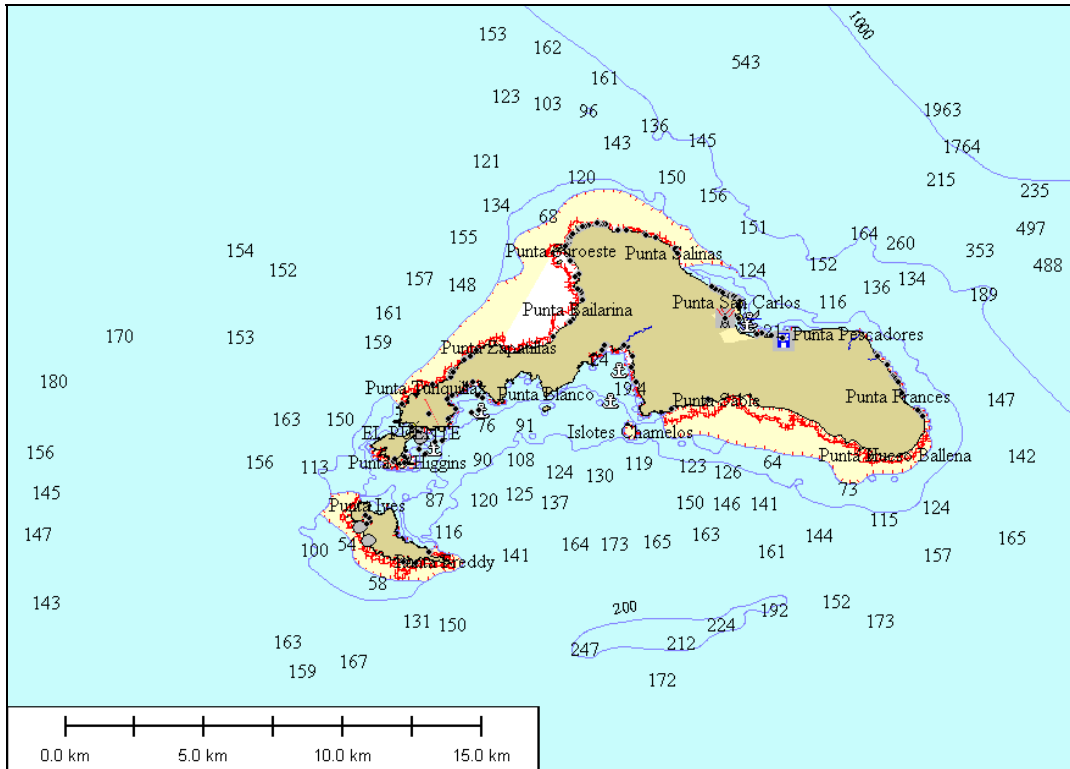
La evaluación del riesgo de tsunami se basa en la ejecución de las siguientes tareas:

1. Estudiar las fuentes de generación, fenómenos de propagación e impacto para tsunamis de campo lejano de origen tectónico.
2. Estudiar las fuentes de generación, fenómenos de propagación e impacto para tsunamis generados por remociones en masa en el mismo archipiélago⁵.
3. Mediante modelación numérica estimar la máxima inundación, campos de altura y de velocidades debidos a tsunamis desde el origen hasta su proceso de término.
4. Determinar las cargas hidrodinámicas de tsunami para el diseño estructural de los distintos elementos de las futuras obras marítimas y terrestres.
5. Evaluar la vulnerabilidad mediante la definición de variables geodemográficas adaptadas a cada localidad en particular.
6. Evaluar el riesgo mediante el cruce de la información de vulnerabilidad de la localidad y el peligro de tsunami.
7. Definir medidas de mitigación del daño orientadas a minimizar la pérdida de vidas y el daño de las obras marítimas y terrestres.

Este trabajo está siendo realizado por el Grupo de Ingeniería Oceánica y se espera tener resultados a mediados de año, debido a la complejidad del trabajo y escasez de recursos.

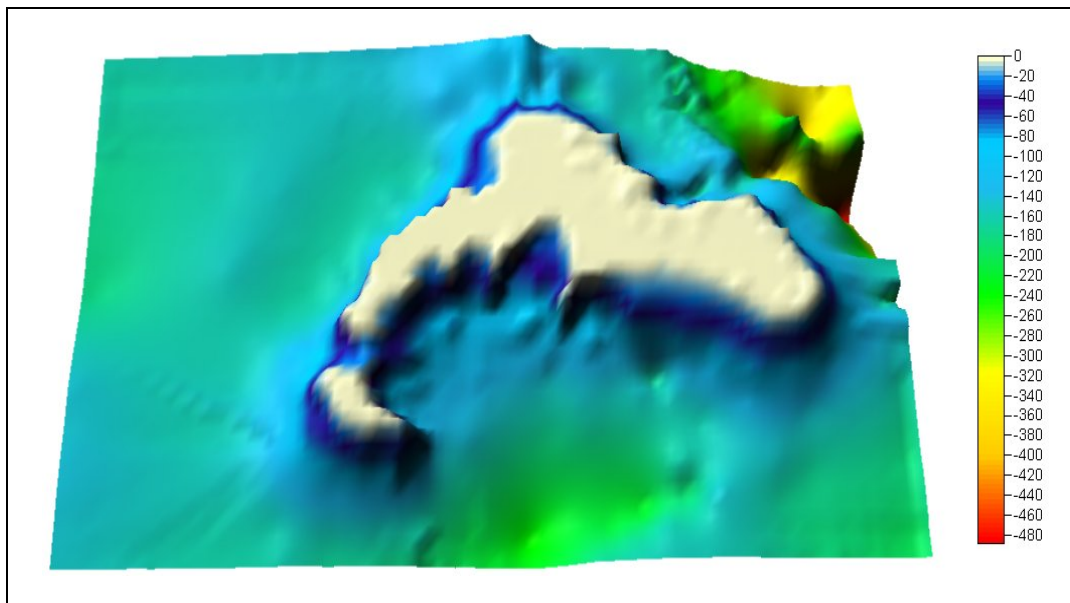
⁵ Se recomienda evaluar el riesgo asociado a las remociones en masa -tanto emergidas como sumergidas- que pudieren ocurrir en el borde costero inmediato a Bahía Cumberland, pues pueden estar asociadas a la generación de tsunamis de origen local en el poblado de San Juan Bautista. La batimetría que conforma el Archipiélago Juan Fernández y en particular de la isla Robinson Crusoe es de gran pendiente (Figura 5-1 a Figura 5-2), aspecto que sugiere una alta susceptibilidad a deslizamientos.

Figura 5-1: Batimetría de la zona inmediata a la Isla Robinson Crusoe.



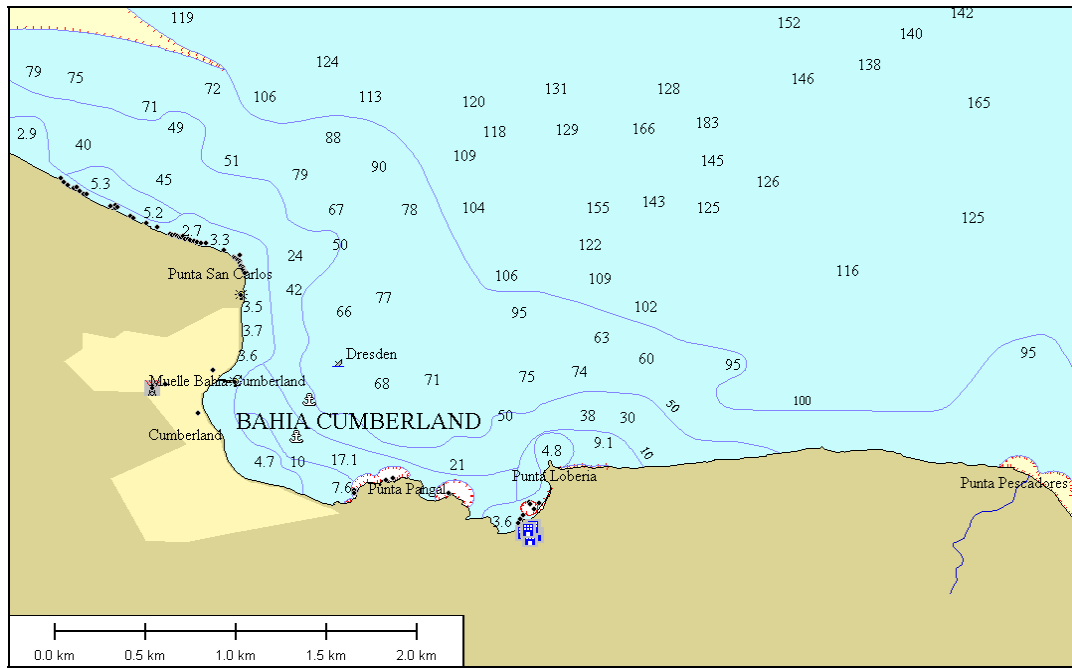
Fuente: Carta digitalizada del SHOA.

Figura 5-2: Batimetría 3D de la zona inmediata a la Isla Robinson Crusoe.



Fuente: Carta digitalizada del SHOA.

Figura 5-3: Batimetría de Bahía Cumberland, Isla Robinson Crusoe.



Fuente: Carta digitalizada del SHOA.

5.2 CONSIDERACIÓN DE CRITERIOS DE TSUNAMI EN INSTALACIONES COSTERAS

5.2.1 DISEÑO DE INSTALACIONES CONSIDERANDO CARGAS DE TSUNAMI

En la Tabla 5-1 se presentan una serie de causas, efectos y medidas de mitigación del riesgo de tsunami que debieran ser adoptadas tanto en la planificación y diseño de futuras obras.

Tabla 5-1: Matriz causa – efecto - medidas de mitigación ante un tsunami.

Causa	Efecto	Medida de mitigación
Inundación	Fundación y pisos inferiores inundados.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
	Falla en sistemas mecánicos, eléctricos y de comunicación.	Instalar equipamiento importante en pisos ubicados sobre el nivel de inundación.
	Daño a las construcciones, personas, y amoblado.	Proteger, reforzar y anclar depósitos de materiales peligrosos.
	Contaminación con materiales de alto contenido salino.	Evaluar la capacidad de soporte del suelo y utilizar materiales de construcción resistentes.
	Fuerzas hidrostáticas: Presión causada por diferentes niveles a ambos lados de un muro.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
		Diseñar los muros para fuerzas de presión hidrostáticas.
		Utilizar aperturas en las paredes que eviten los diferenciales de nivel y anclajes resistentes.
	Flotación.	Ubicar edificaciones en sectores altos (sobre el nivel de inundación) y uso de anclajes.
Saturación y disminución de la capacidad de soporte del suelo.	Evitar la construcción sobre taludes potencialmente afectos a inundación.	
	Evaluar la condición del suelo inundado.	
Corrientes	Fuerzas hidrodinámicas de impacto y de arrastre.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
		Diseño considerando fuerzas hidrodinámicas y uso de anclajes resistentes.
	Impacto de escombros.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación.
		Diseñar edificaciones considerando fuerzas hidrodinámicas de impacto.
Socavación.	Utilizar fundaciones profundas y elementos de protección al pie de la obra.	
Rompimiento	Fuerzas hidrostáticas	Diseño para oleaje rompiente.
	Impacto de escombros.	Ubicar edificaciones en sectores altos o elevarlas sobre el nivel de inundación. Diseño estructural considerando fuerzas de impacto.
Flujo de resaca	Inestabilidad estructural de muros de contención.	Diseño considerando suelos saturados y dotar de drenes eficientes.
	Socavación.	Utilizar fundaciones profundas y elementos de protección al pie de la obra.
Incendio	Ignición de materiales inflamables	Ubicar estanques de sustancias inflamables en zonas seguras y utilizar materiales resistentes al fuego.

Fuente: Elaboración propia.

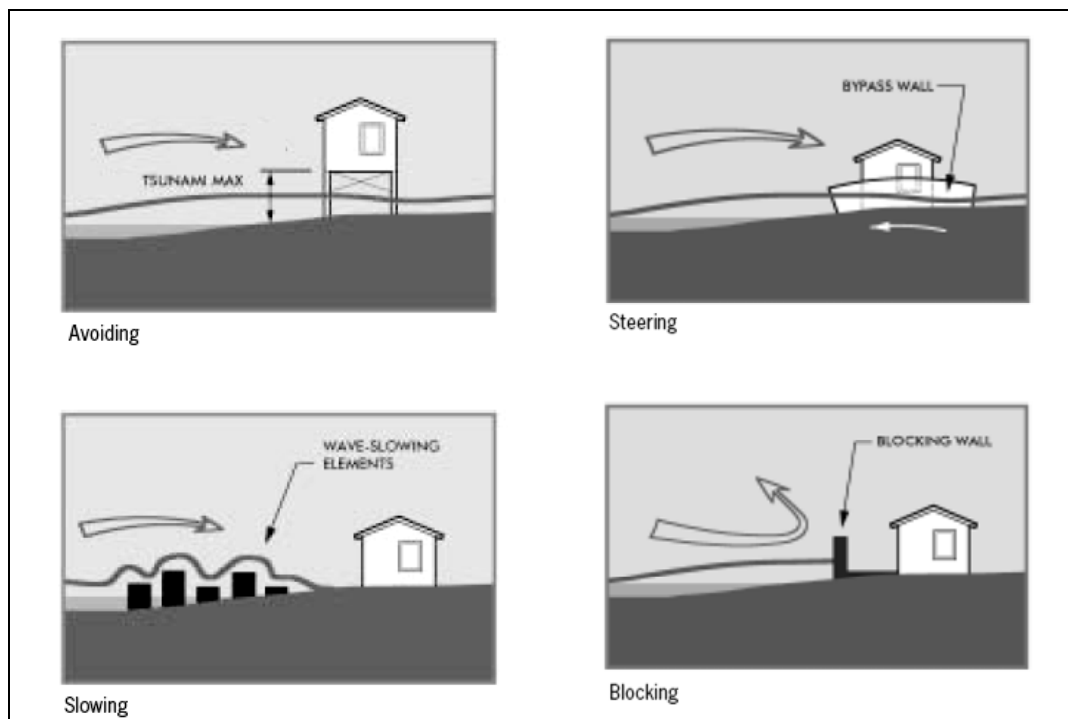
5.2.2 TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS ADECUADAS PARA ZONAS DE RIESGO

Existen técnicas básicas de mitigación que pueden ser aplicadas en proyectos para reducir el impacto de tsunami (Figura 5-4):

- Evitar áreas inundables mediante estructuras altas tipo palafitos (avoiding)
- Disminuir las corrientes mediante el uso de elementos rugosos (slowing)
- Desviar el flujo mediante obras de defensa perimetrales (steering)
- Bloquear el flujo mediante obras de defensa costera (blocking)

Estas estrategias pueden ser usadas en forma separada o combinadas dentro de una más amplia. Los métodos pueden ser usados en forma pasiva para permitir la pasada de los tsunamis a través de un área sin causar mayor daño o bien pueden ser usados construyendo estructuras resistentes que sean capaces de soportar las fuerzas de un tsunami. Estructuras firmes, tales como paredes, terrazas y bermas compactadas, estructuras de estacionamientos y otras construcciones rígidas pueden bloquear la fuerza de las ondas. Sin embargo, este bloqueo puede dar como resultado una amplificación de la altura de la onda y la energía de ésta puede ser refractada o redirigida hacia otra área.

Figura 5-4: Estrategias para incorporar criterios de diseño de tsunamis en viviendas



Fuente: NTHMP (2001). "Designing for Tsunamis".

Debido a la escasez de terrenos disponibles en San Juan Bautista, no es posible ubicar todas las edificaciones lejos de las áreas potencialmente inundables, por lo que el diseño de la edificación y su construcción jugarán un rol crítico en el desempeño de las estructuras en el evento de un tsunami.

Un buen desempeño depende de las siguientes consideraciones:

- Ubicación de la edificación y su configuración (tamaño, forma, elevación y orientación)
- Intensidad y frecuencia del peligro de tsunami seleccionado para el diseño
- Diseño estructural y no estructural
- Estructura y materiales
- Confiabilidad requerida para la estructura
- Capacidades profesionales de los diseñadores
- Calidad de la construcción

El diseño y construcción de las edificaciones que se emplacen en zonas potencialmente inundables deberá enfocarse en las fuerzas asociadas al evento tsunamigénico o sus efectos como la presión del agua, boyantes, corrientes y olas, impacto de restos y fugo.

Después del tsunami de Sumatra-Andaman, ocurrido el 26 de diciembre de 2004, se formularon una serie de proyectos orientados al diseño y construcción de viviendas sociales de bajo costo en zonas de riesgo de tsunami. En general, estas soluciones consideran la elevación de la casa, la generación de ejes estructurantes más complejos que los simples muros perimetrales (de forma de dar mayor rigidez a la estructura), el uso de anclajes al suelo y sistemas de sujeción entre elementos estructurales robustos. Cabe mencionar que este tipo de soluciones deben considerar la realidad local, en cuanto a temperaturas, precipitación, humedad, disponibilidad de materiales, existencia de animales e insectos, tradiciones, entre otros, que demandan de la asistencia de especialistas.

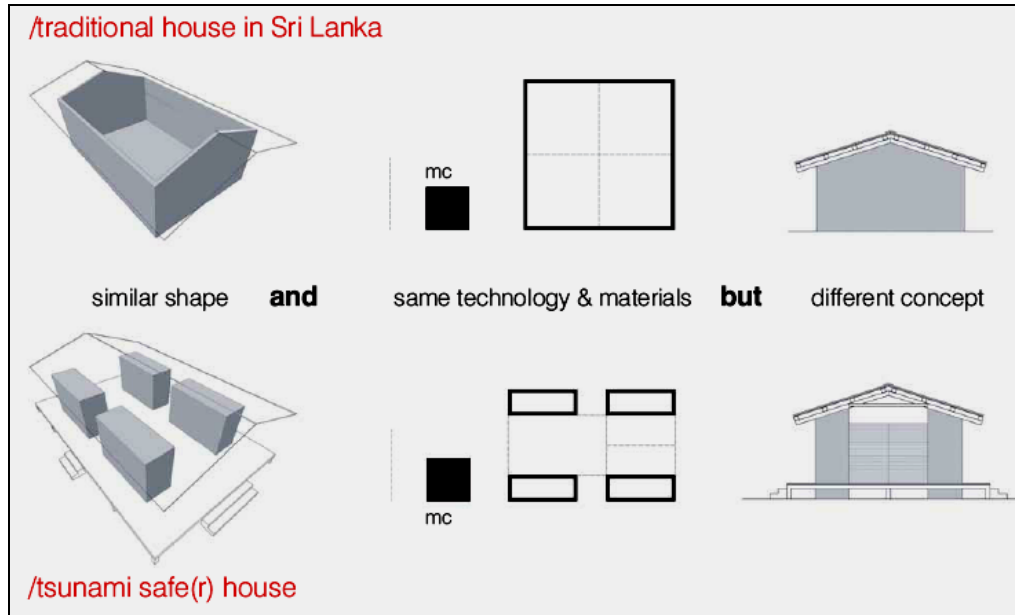
Un ejemplo de este tipo de soluciones es la propuesta por Tenzin Priyadarshi, del MIT, en 2005 para la Prajnopaya Foundation. El proyecto "*Tsunami-safe(r) house: A design for the prajnopaya foundation*" contempla algunos de estos elementos y es de fácil acceso en Internet (Figura 5-5).

Figura 5-5: Proyecto de vivienda social Tsunami-safe(r) house.



Fuente: Priyadarshi, T. (2005) "Tsunami-safe(r) house".

Figura 5-6: Proyecto de vivienda social Tsunami-safe(r) house.

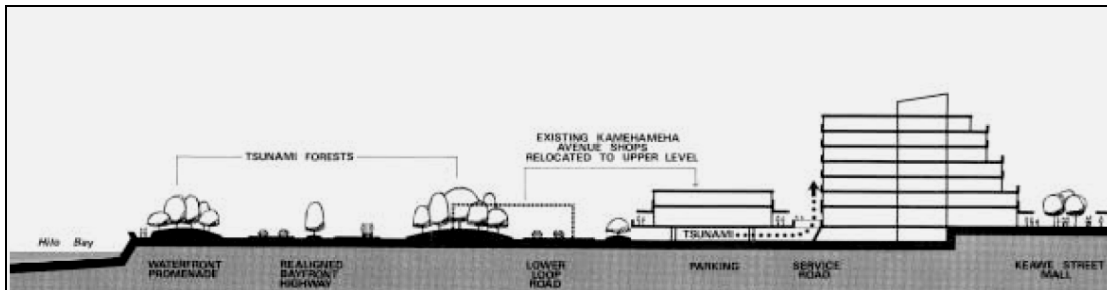


Fuente: Priyadarshi, T. (2005) "Tsunami-safe(r) house".

5.2.3 ARBOLEDAS DE PROTECCIÓN EN ZONAS DE RIESGO

Un de las técnicas para disminuir las corrientes generadas por el tsunami, involucran la creación de fricción que reduzca el destructivo poder de las ondas. Esto se logra diseñando zanjas, pendientes, arboledas de protección y bermas que puedan detener y filtrar los restos o escombros acarreados por las ondas. Las técnicas para guiar la fuerza de las ondas de tsunami lejos de las zonas vulnerables consisten en implementar estructuras estratégicamente espaciadas, tales como paredes anguladas y zanjas o usando superficies pavimentadas que generen una vía de fricción lenta para que el agua continúe su paso. Naturalmente, estos arreglos denominados "tsunami forests" requieren de espacio suficiente en la zona costera y requiere del uso de especies de buena adaptación al clima local, con raíces profundas y vegetación frondosa, de modo de disipar la energía de las ondas. En la Figura 5-7 se muestra una propuesta de Arboledas de protección propuestas para la ciudad de Hilo, Hawaii. Por supuesto en el caso bajo estudio las consideraciones ambientales para este tipo de decisiones deben estar contextualizadas a la situación endémica y patrimonial de la flora y fauna de la isla.

Figura 5-7: Arboledas de protección propuestas para la ciudad de Hilo, Hawaii.



Fuente: NTHMP (2001). "Designing for Tsunamis".

5.2.4 LÍNEAS DE VIDA E INSTALACIONES ESCENCIALES PARA COMBATIR LA EMERGENCIA

Como medida de planificación del uso del suelo, se debiera considerar un ordenamiento territorial en las zonas de alto riesgo, basado en el tipo de actividad, funcionalidad e importancia de las edificaciones y, en la medida de lo posible, ubicar las siguientes instalaciones a cotas superiores a +20 [m] sobre el nivel del mar en el poblado de San Juan Bautista:

- Sistemas de generación y transmisión de electricidad, subestaciones de control.
- Sistemas de recepción, almacenamiento y distribución de gases.
- Sistemas de comunicación terrestre (tendido eléctrico y tuberías).
- Antenas de comunicación vía satélite.
- Sistemas de emisión de televisión y radio.
- Sistemas de almacenamiento de agua potable.
- Oleoductos.
- Sistemas autónomos de generación eléctrica.
- Estanques de almacenamiento de aguas y materiales peligrosos.
- Terminales de carga / descarga de combustibles.
- Sitios de almacenaje de materiales químicos y radiactivos.

En cuanto a la materialidad y tipo de estructuración de las edificaciones, se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- En aquellos casos en que las instalaciones de alta peligrosidad deban ser emplazadas en los sectores críticos, se debieran proteger ya sea mediante anclajes o muros de defensa. La protección mediante este tipo de estructuras constituye una buena medida para minimizar la acción hidrodinámica del tsunami y, aún cuando no sean suficientemente robustas para reflejar completamente las ondas, pueden ayudar a la mitigación del daño.
- Los edificios de hormigón armado, acero o mampostería presentan una alta resistencia al ataque de un tsunami, en tanto que edificaciones de madera, albañilería u otros materiales livianos son susceptibles de colapsar ante estos. Por ende, se recomienda utilizar hormigón armado en aquellas edificaciones ubicadas de zonas de alto riesgo.
- Se recomienda diseñar las estructuras costeras considerando los efectos de estabilidad estructural, socavación al pie u otros mecanismos asociados al ataque de un tsunami.
- Aquellas edificaciones que no son imprescindibles luego de un evento desastroso y pueden admitir daño estructural debieran ser diseñados para resistir tsunamis con bajo potencial destructivo.
- Las instalaciones de alta peligrosidad, en cambio, debieran ser diseñadas para soportar un tsunami potencialmente destructivo, de manera de garantizar su operatividad e integridad luego del ataque de un tsunami.
- Los niveles inferiores de los edificios debieran ser diseñados de manera de albergar los sitios de uso público (lobby, estacionamientos, servicios, etc.) y debieran permitir el paso del agua a través de elementos no estructurales (tabiques u otros) que cedan ante el ataque de la onda.
- Se sugiere reforzar las construcciones en estado de deterioro estructural y, dotar, en la medida de lo posible, de anclajes resistentes al suelo de fundación.

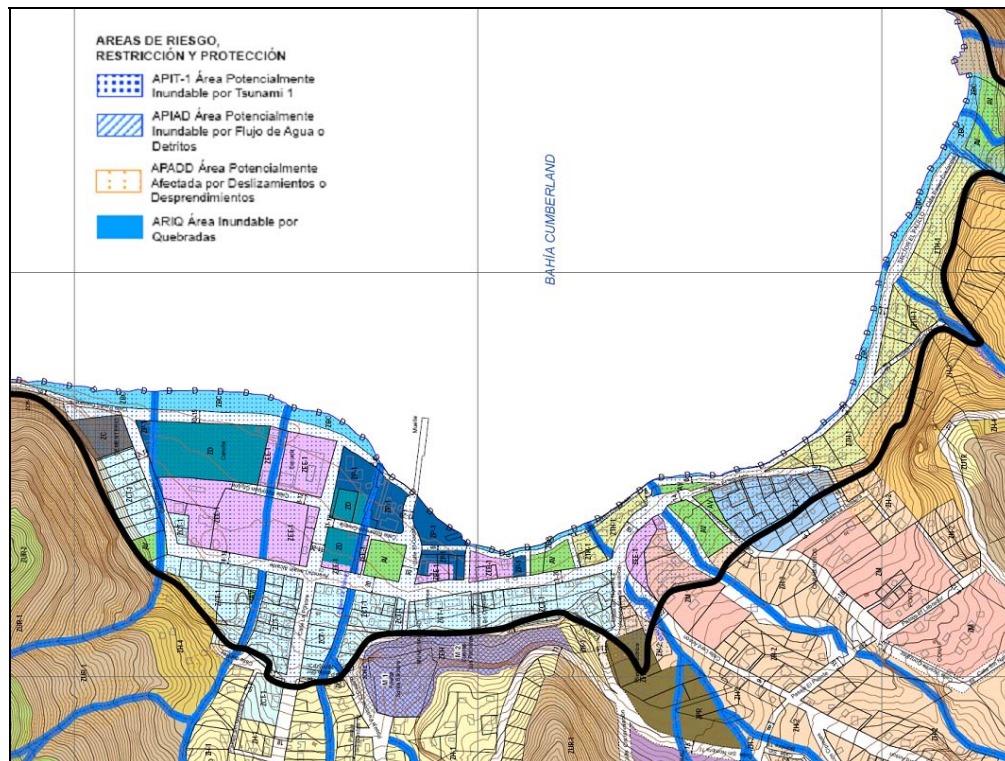
En cuanto a la eventualidad de derrames, se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- Efectuar una inspección de los estanques de almacenamiento, equipos de conducción y sistemas de bombeo de materiales peligrosos en las zonas de riesgo, en donde se examine su integridad estructural. En aquellos casos en que la estructura sea esencial para el funcionamiento del pueblo, es recomendable realizar un estudio específico a objeto de verificar su diseño estructural, considerando las cargas de tsunami.
- Actualizar en forma sistemática los sistemas de seguridad industrial y de prevención de riesgos, incorporando las medidas de protección ante un tsunami.

5.3 INCORPORAR EL RIESGO DE TSUNAMIS EN LA PLANIFICACIÓN URBANA

Se debiera revisar la definición de zonas de el riesgo de tsunamis y otros fenómenos naturales⁶ propuesta en el Plan Regulador de Juan Fernández, Sector San Juan Bautista (Figura 5-9), actualmente en elaboración, de forma de evitar desarrollos urbanos en sectores de alto riesgo y racionalizar el uso del suelo. Esta medida a medio plazo es de las más eficientes al momento de definir las consecuencias asociadas al impacto de fenómenos de esta naturaleza. De momento, la zona de riesgo de tsunami se ubica entre los 15 y 20 [m] sobre el nivel del mar, lo que debe ser refrendado con un estudio de riesgo de inundación por tsunamis de campo lejano o generados por remociones en masa en las cercanías de Bahía Cumberland (sección 5.1).

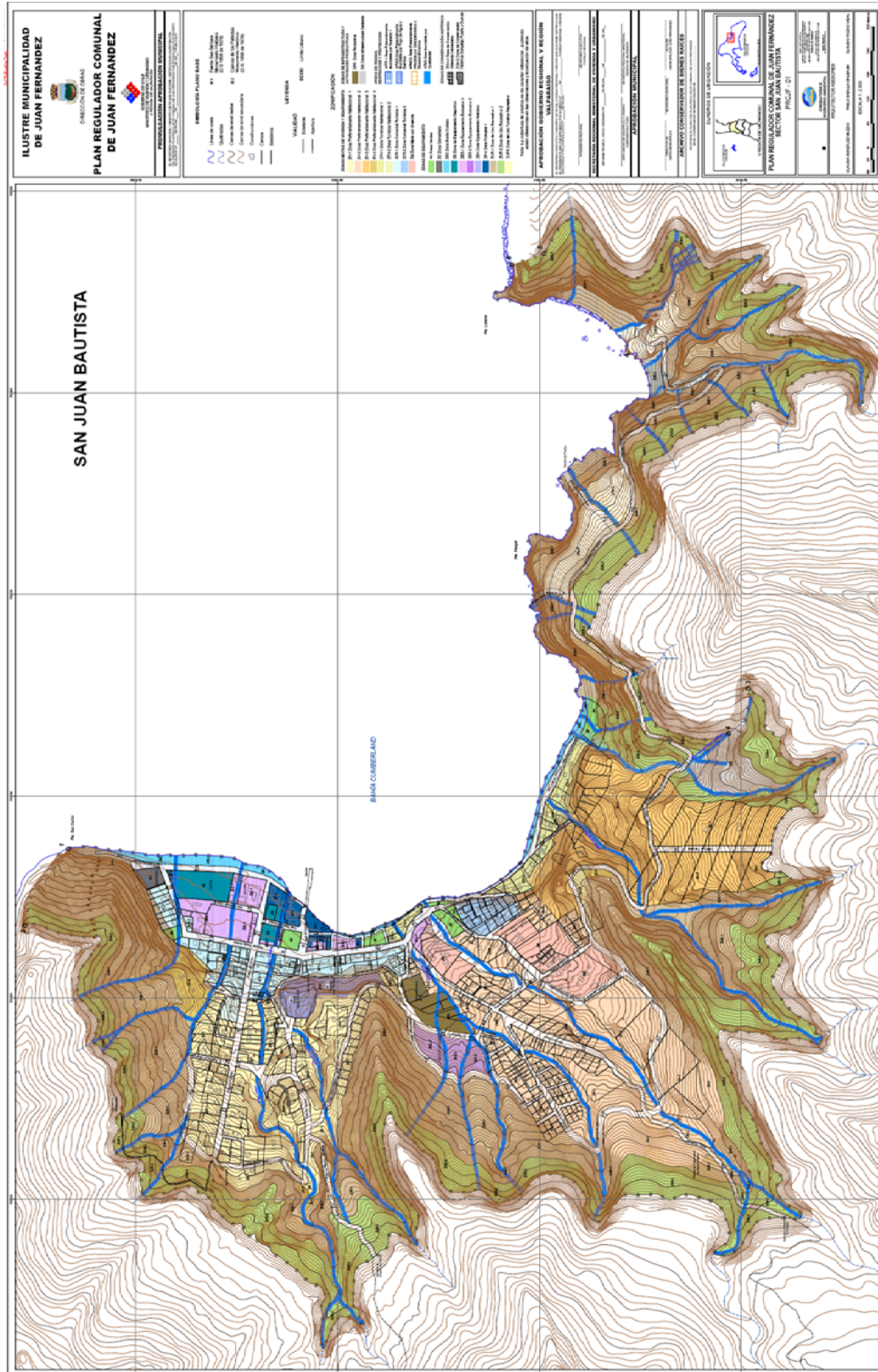
Figura 5-8: Zona de inundación propuesta para el poblado de San Juan Bautista.



Fuente: Adaptado del propuesta del Plan Regulador de Juan Fernández, Sector San Juan Bautista.

⁶ Se debieran incorporar todos los riesgos naturales esperables en cada localidad. Entre estos destacan los sismos, remociones en masa, subsidencia, inundación, variación del nivel del mar.

Figura 5-9: Propuesta del Plan Regulador de Juan Fernández, Sector San Juan Bautista.



Fuente: Gentileza de Sr. Antonio Salas Ponce, Director de Obras Municipales.

5.4 IMPLEMENTAR UN PLAN DE EVACUACIÓN

Con el objetivo de evitar la pérdida de vidas humanas durante la ocurrencia de un tsunami, se recomienda instruir a la comunidad local sobre cómo actuar ante la eventualidad. Se debe tomar en cuenta que el ciudadano común tiene poco conocimiento del fenómeno y de las acciones a adoptar. La instrucción debe llevarse a cabo de manera periódica mediante personal capacitado, con un manejo cauteloso de la información para evitar un temor excesivo del riesgo de tsunami. Las autoridades deben tener presentes las siguientes recomendaciones con el fin de adoptar medidas tendientes a evitar o minimizar la pérdida de vidas y daños materiales:

- Dado que los tsunamis tienen su origen en sismos o remociones en masa, la zona de mayor peligro es precisamente el área costera donde éste se ha sentido. La ocurrencia de un sismo de gran intensidad y de duración superior a 30 [s] debe considerarse como alarma natural, ya que cualquier sistema de alerta tarda a lo menos 40 minutos dar la alarma a la población.
- Dada la distancia del Archipiélago Juan Fernández a la zona de subducción donde se generan los tsunamis de origen tectónico, se disponen aproximadamente de 40 minutos para que las ondas lleguen a la costa. Por esta razón, es recomendable disponer de sistemas de telecomunicaciones robustos y complementarios en directa comunicación con la oficina del Sistema Nacional de Alerta de Maremotos, que a contar del tsunami del 27-02-2010 está bajo el mando de la DIRECTEMAR.
- Se debe considerar que durante la ocurrencia de un sismo y tsunami de campo cercano, las comunicaciones se cortan o tienden a saturarse, lo que imposibilita transmitir de manera eficiente la información. En consecuencia, la red de comunicaciones debe ser inalámbrica, vía radio o satelital, y autónoma en su fuente de energía.
- Las zonas seguras para la evacuación de la población debieran estar ubicadas en alturas superiores a 20 [m] sobre el nivel del mar. Aquellos sectores en que no hay cotas suficientes o que se encuentran muy distantes de las zonas seguras, los operarios debieran buscar protección en el bosque colindante, sobre árboles a unos 8 [m] del suelo, o los pisos altos de estructuras de hormigón armado que no hayan experimentado daño significativo durante el terremoto. Esta definición de acciones debiera ser revisada en terreno por especialistas.
- Si se observa un recogimiento del mar por debajo del nivel de la marea, dejando en seco grandes extensiones del fondo marino, debe considerarse la posibilidad de un retorno violento de las aguas. Ante esta situación debiera buscarse protección en zonas seguras.
- Se debe tener presente que un maremoto tiene varias olas destructivas que pueden llegar a la zona costera dentro de un lapso bastante prolongado⁷. Por lo tanto se recomienda prohibir el regreso de la población a sus casas hasta que el tsunami se haya extinguido.
- Se deben mantener operativos los planes de evacuación. Las autoridades deberán garantizar la presencia de vehículos de emergencia y personal capacitado ante la eventualidad.
- Las embarcaciones deberán zarpar, en la medida de lo posible, ya que el tsunami es destructor sólo en la costa. Puede considerarse a la nave fuera de peligro cuando se encuentre en profundidades mayores de 150 [m]. De no ser posible el zarpe dentro de los primeros 10 minutos de ocurrido el sismo, deberá alistarse a la nave o embarcación en forma análoga a la preparación para soportar un temporal de grandes proporciones. El personal a bordo deberá ser premunido de chalecos salvavidas y ropas de abrigo.

⁷ En el caso del terremoto del 27-02-2010, se registraron anomalías del nivel del mar hasta 10 horas después de transcurrido el sismo en la costa continental, no siendo así en el Archipiélago Juan Fernández

5.5 IMPLEMENTAR UN PLAN DE EDUCACIÓN

En el mediano plazo se debieran incorporar en los planes de estudio de la Escuela asignaturas relacionadas con riesgos naturales de ocurrencia común en la isla, como son los sismos, tsunamis, derrumbes e incendios. Estos cursos debieran impartirse en diferentes niveles por medio de especialistas en la materia, que podrían viajar a la Isla en forma periódica al menos dos veces por año y por los profesores de enseñanza prebásica y básica. En principio, se pueden obtener textos educativos del SHOA (www.shoa.cl/servicios/descargas/descargas.php), que han sido incluidos en el capítulo de 0, de referencias bibliográficas bajo el título “Bibliografía orientada a la educación de la población”.

Asimismo, se debieran implementar en forma sistemática cursos de capacitación a organismos públicos que tengan relación con la planificación urbana, prevención de riesgos, conservación, salud pública y la orden y defensa civil.

5.6 RECUPERACIÓN DE LA MEMORIA HISTÓRICA

Para concluir, se hace hincapié en los esfuerzos que deben hacerse para recuperar la memoria histórica y cultural perdida por la desaparición de los archivos municipales, arrasados por el tsunami. Cabe notar que existe abundante información disponible en los archivos personales de isleños, que facilitarían la restitución parcial.

6 REFERENCIAS

Existe escasa bibliografía específica sobre recomendaciones de diseño de obras marítimas y terrestres que contemplen los efectos de tsunamis. En general, la literatura es reciente y requiere de un análisis y contextualización al caso chileno. Como primera aproximación, se recomienda la revisión crítica de los siguientes textos, organizados en orden de aparición:

Informes elaborados como consecuencia del tsunami

- Ref.1 DOP (05 Marzo 2010). Informe que detalla el estado de la estructura portuaria en la Isla Robinson Crusoe posterior al maremoto ocurrido en este lugar. Elaborado por el Ing. Guillermo Jaramillo Castro.
- Ref.2 Campos G., María Paz y Leguía C., Marcelo (Marzo 2010). Reubicación de la población afectada por el tsunami en el poblado San Juan Bautista, Isla Robinson Crusoe. Análisis de una posible modificación en los límites del poblado con el Parque Nacional Archipiélago Juan Fernández. Geógrafos con mención en Ordenamiento Territorial, Universidad de Playa Ancha. Responsables de la actualización del Plan de Manejo del Parque Nacional Archipiélago Juan Fernández 2009. Documento en formato papel.
- Ref.3 Hills Díaz, Maritza. y Dalmazzo Gerraud, Edda (S.D.). Catastro Juan Fernández personas y viviendas Elaborado a petición de ONEMI. Documento en formato digital denominado "*Catastro Juan Fernández Personas y Viviendas.doc*".

Bibliografía relacionada con el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos

- Ref.4 SHOA (2005). Pub. N° 3203. Instrucciones Oceanográficas N° 3. "*Instrucciones Generales sobre Sistema Nacional de Alarma de Maremotos*", 5ª edición.

Bibliografía orientada a la educación de la población

- Ref.5 SHOA (2001). "*Tsunami, las grandes olas*".
- Ref.6 SHOA (2003). "*Terremotos y Tsunamis o Maremotos*". Texto para Educación Prebásica.
- Ref.7 SHOA (2003). "*Terremotos y Tsunamis o Maremotos*". Texto Guía para el Profesor Educación Prebásica.
- Ref.8 SHOA (2003). "*Te invito a conocer la Tierra I*". Texto para la Educación Básica de 2º a 4º año.
- Ref.9 SHOA (2003). "*Te invito a conocer la Tierra I*". Texto Guía para el Profesor Educación Básica de 2º a 4º año.
- Ref.10 SHOA (2003). "*Te invito a conocer la Tierra II*". Texto para la Enseñanza Básica de 5º a 8º año.
- Ref.11 SHOA (2003). "*Te invito a conocer la Tierra II*". Texto para la Enseñanza Básica de 5º a 8º año.
- Ref.12 SHOA (2003). "*Terremotos y Tsunamis o Maremotos*". Texto de Enseñanza Media.

- Ref.13 SHOA (2003). *"Terremotos y Tsunamis o Maremotos"*. Texto Guía para el Profesor Educación de Enseñanza Media.
- Ref.14 SHOA (2000). *"Como Sobrevivir a un Maremoto"*. 1ª edición.
- Ref.15 SHOA (2000). *"El maremoto del 22 de mayo de 1960 en las costas de Chile"*. 2ª edición.

Bibliografía relacionada con diseño de obras terrestres

- Ref.16 Priyadarshi, Tenzin (2005). *"Tsunami-safe(r) house: A design for the prajnopaya foundation"*. MIT / Prajnopaya Foundation.
- Ref.17 National Institute of Disaster Management. Ministry of Home Affairs. Government of India (2005). *"Design Criteria for reconstruction of Houses in Tsunami affected areas in India"*.
- Ref.18 NTHMP (2001). *"Designing for Tsunamis. Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards"*.

Bibliografía relacionada con diseño de obras marítimas

- Ref.19 PIANC (2009). *"Mitigation of tsunami disasters in ports"*. PIANC working group 53. Draft version III august 30, 2009.
- Ref.20 PIANC (2009). *"Restoration of Port Operations following earthquakes"*. PIANC working group. Post an Earthquake Action. Draft.
- Ref.21 Allsop et al. (2004). *"Wave-in-deck loads on exposed jetties and related structures. Development of new prediction methods"*. HR Wallingford, England.
- Ref.22 OCDI (2002). *"Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan"*.
- Ref.23 Preuss, J. (1988). *"Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunami Hazard Area. Urban Regional Research"*.
- Ref.24 UNESCO (1998). *"Guía de campo para levantamientos posteriores a un tsunami"*. Primera Edición). Comisión Oceanográfica Intergubernamental.

Bibliografía relacionada con el fenómeno tsunami

- Ref.25 Murty, T. (2007). *"The Indian Ocean Tsunami"*. Department of Civil Engineering, University of Ottawa. Ottawa, Canada. ISBN-13 978-0-415-40380-1.
- Ref.26 Satake, K (2005). *"Tsunamis: Case Studies and Recent Developments"*. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan. Advances in Natural and Technological Hazards Research Volume 23.
- Ref.27 Levin, B y Nosov, M. (2009). *"Physics of Tsunamis"*. ISBN 978-1-4020-8855-1.

ANEXO 1: CONTACTOS EFECTUADOS DURANTE LA VISITA A TERRENO

Srta. Keila Alanis

Enlace I. Municipalidad Juan Fernández
77780219, keila.alanis@gmail.com

Sr. Antonio Salas Ponce

Director de Obras Municipales
I. Municipalidad Juan Fernández
97299964, dom@comunajuanfernandez.cl, osalasponce@gmail.com

Sr. Víctor Beeche

Asesor Dirección de Obras
I. Municipalidad Juan Fernández

Sr. Rudy Aravena Ortiz

Presidente Cámara de Comercio y Turismo Isla Robinson Crusoe
89556863, rudyenzoaravenaortiz@gmail.com

Sr. Guillermo Araya

Guardaparque Lobo 4.
Parque Nacional Archipiélago Juan Fernández, Reserva de la Biósfera

Sra. Rachel Solís

Habitante de San Juan Bautista, Robinson Crusoe

Sra. Isaira Condell

Habitante de San Juan Bautista, Robinson Crusoe

Sra. Ana Mana

Habitante de San Juan Bautista, Robinson Crusoe

Sr. Dietrich Lorentz

Vice Gran Canciller
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Sr. Arturo Chicano

Decano Facultad de Arquitectura
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Sr. Jorge Ferrada Herrera

Director del Centro de Patrimonio PUCV
jferrada@arquitecturaucv.cl, 09-85090333

Sra. Francisca Court

Asistente Social
I. Municipalidad Lo Barnechea
9-3337893, mariafrancisca.court@gmail.com

Sr. Florian Schneider

Biólogo Marino
Laboratorio de Ecología y Oceanografía Costera
Pontificia Universidad Católica de Chile
85152143, florianschneiderhiener@hotmail.com

Srta. Valentina Ruiz

Dirección de Territorio Marítimo y Marina Mercante
vruiznayem@gmail.com

Sr. Ronald Patrick

Documentalista visual
info@ronaldpatrick.com, www.ronaldpatrick.com

Sr. Juan Pablo Navarrete
Ingeniero de Gerdau Aza
jpnavarrete@aza.cl

T2 LT Gerardo Velásquez Cerda
Gobernación Marítima de Valparaíso
gvelasquezc@directemar.cl

Rodolfo Parra Concha
DIELEC LTDA Ingeniería eléctrica
rodolfoparra@dielec.cl

Javier Gana Gómez de la Torre
Rtoke.cl
javiergana@gmail.com