



Análisis de Riesgos Infraestructurales En el Puerto de Iquique ante Eventos de Terremoto y Tsunami

Defensa del proyecto para optar al título de
Ingeniero Civil Oceánico
Marco Saravia Contreras



Análisis de Riesgos Infraestructurales En el Puerto de Iquique ante Eventos de Terremoto y Tsunami

Defensa del proyecto para optar al título de
Ingeniero Civil Oceánico
Marco Saravia Contreras

Contenido

- Introducción.
- Objetivos
- Alcances y Limitaciones.
- Marco Teórico.
- Terremoto del 27 de febrero del 2010 , resumen de daños.
- Terremoto del 1°de abril del 2014 y resumen de daños.
- Matriz de evaluación de daños.
- Matriz de infraestructura versus daño.
- Conclusiones.



FUENTE: PUERTO DE IQUIQUE.

Resumen

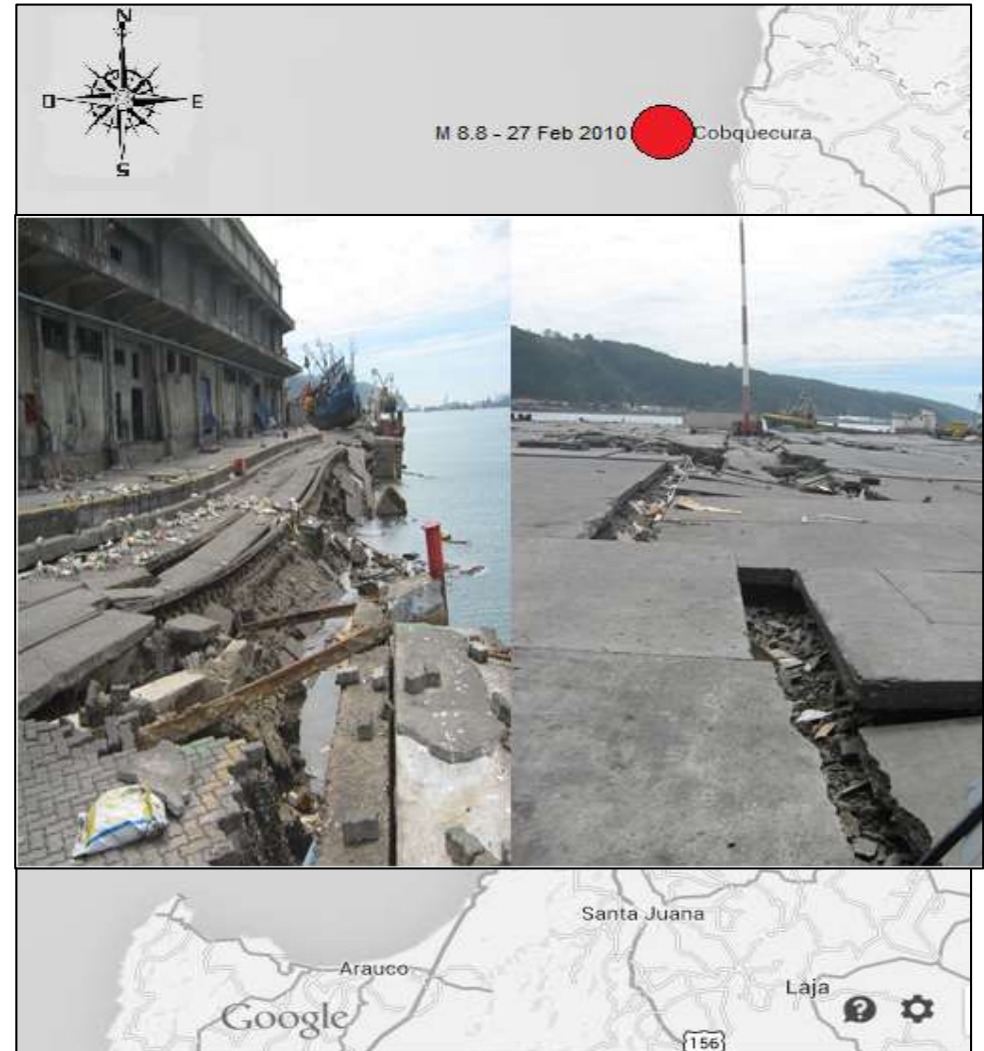
- En este trabajo se desarrolla una propuesta de **análisis de riesgos** para la infraestructura del **Puerto de Iquique** en marco del proyecto JICA-Satreps "Research Project on Enhancement of Technology to Develop Tsunami-Resilient Community".
- Se han analizado los puertos estatales y privados de la Región del Biobío posterior al **evento sismo tsunamigénico del 27 de febrero del 2010** con lo que desarrolla una matriz de evaluación de daños.
- Se analizan los daños producidos en el **Puerto de Iquique** producto del **evento del 1° de abril de 2014** y se proponen dos escenarios de peligro basados en el **evento del 27F** a los que finalmente se les aplica la matriz de evaluación de daños.



FUENTE: WWW.EPI.CL

Introducción

- El sector portuario es fundamental para el crecimiento de la economía, siendo un elemento clave para el comercio y desarrollo de ciudades, países y regiones continentales.
- Actualmente, cerca del 94% del comercio en Chile se realiza por transporte marítimo, y el 98% de las exportaciones (sin considerar cobre) sale de los puertos de la V a la VIII región (Valparaíso, San Antonio, Talcahuano, San Vicente, Coronel).
- Cuando se produce un sismo de gran intensidad, suelen verse afectadas las vías terrestres de comunicación, pasando los puertos a ser fundamentales para el suministro de insumos a la población.
- Los servicios y la logística portuaria en general funcionan como una cadena, y cuando falla un eslabón se afecta la cadena completa.



Objetivos

Objetivo General

- Elaborar un informe único consolidado que registre los daños más comunes en puertos para la posterior aplicación del Plan de Continuidad de Negocios en el Puerto de Iquique. Generando una base empírica para estimación de daños en la infraestructura portuaria de Chile ante eventos de terremotos y/o tsunamis de campo cercano.

Objetivos

Objetivos Específicos

- Elaborar una caracterización infraestructural de los puertos de la región del Biobío aplicable al Puerto de Iquique.
- Elaborar resúmenes esquemáticos mediante la recopilación y análisis de los daños registrados oficialmente en puertos de la octava región y la recuperación del sistema portuario, posterior al terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010.
- Elaborar matrices de los daños registrados según la tipología infraestructural de los puertos analizados de la octava región y del Puerto de Iquique.
- Proponer las bases metodológicas para la estimación de daños en el marco de estudios de Planes de Continuidad de Negocios.

Alcances y Limitaciones

Alcances

- Este proyecto de título, propone establecer las bases metodológicas para la aplicación de curvas de fragilidad y el desarrollo de un Plan de Continuidad de Negocios para el Puerto de Iquique.
- Para los escenarios de peligro adoptados, se identificaron coincidencias de diseño e infraestructura entre los puertos.

Limitaciones

- Se ha contemplado sólo el estudio de los daños producidos en los puertos de la octava región producto del evento del 27F y en el Puerto de Iquique producto del evento del 1° de abril de 2014.
- No se contemplaron los diferentes tipos de falla tectónica.
- Para el desarrollo de curvas de fragilidad es necesario contar con acelerógrafos in situ en las zonas de estudio.

➔ Marco Teórico

Gestión
de de

Plan
continu
neg

Riesgos
a tsu
terre

Rie
infraest

La infraestructura
portuaria en Chile

- Fases de gestión de desastres.
- El concepto del riesgo.
- Metodología para el análisis de riesgos.
- Metodología de evaluación de daños.
- Terremotos.
- Tsunamis.

Gestión del Riesgo de Desastres.

Fases del Ciclo de Desastres.

Tabla 3.2: Organización secuencial del ciclo de desastres.

Fases y actividad fundamental	Antes del evento Planificación	Durante el evento Respuesta	Después del evento Recuperación
Etapas	<ul style="list-style-type: none"> • Prevención • Mitigación • Preparación • Alerta 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto • Emergencia <ul style="list-style-type: none"> - Aislamiento - Medidas externas de rescate y socorrismo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rehabilitación • Reconstrucción
Objetivos principales	<ul style="list-style-type: none"> • Impedir que sucesos naturales o tecnológicos determinen un desastre. • Reducir el impacto. • Reducir la vulnerabilidad. • Organizar y estructurar los diferentes componentes de respuesta. • Establecimiento de precauciones específicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo y asistencia a los afectados. • Medidas de evaluación y atenuación de las consecuencias. • Prevenir la prolongación de los daños y su amplitud. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación de servicios básicos. • Vigilancia y educación sanitarias. • Reparación con alcance de desarrollo igual o superior al existente previo al desastre.

FUENTE: MODIFICADO DE (MEDICINA DE DESASTRES, 2004)

“Lograr una mejor gestión de riesgos de desastres se ha convertido en una necesidad crítica para la comunidad internacional y también, de forma cada vez más notoria, para Chile.” (UNISDR, 2012).

“La gestión de riesgo de desastres corresponde a un proceso y no a un fin último, y tiene como objetivo disminuir los riesgos existentes y prevenir la generación de nuevos riesgos.” (UNISDR, 2012).

Gestión del Riesgo de Desastres.

El Concepto del Riesgo.

PNUD (2012) define el riesgo, como el grado de daños, destrucciones o pérdidas, según la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, que además tiene una estrecha relación con el proceso de desarrollo humano.

En general se acepta que el daño no es sólo producto de la magnitud del fenómeno natural, sino también de la fragilidad o vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Tabla 3.3: Esquematización del concepto de gestión riesgo.



FUENTE: MODIFICADO DE (PLIEFKE, SPERBECK, URBAN, PEIL, & BUDELMANN, 2007).

➔ Gestión del Riesgo de Desastres.

Metodología para el Análisis de Riesgos.

Actualmente, no existe ninguna fórmula clara que se utilice para definir el riesgo. Además, algunos autores lo definen como un producto de múltiples variables (Thywissen, 2006) y otros evitan cualquier formulación matemática para su cuantificación, argumentando que el riesgo es producto de varios términos. Sin embargo, Pliefke y otros (2007) proponen cinco clasificaciones generales mediante ecuaciones.

Riesgo = Peligro x Vulnerabilidad x Exposición

Riesgo = Peligro x Vulnerabilidad

Riesgo = Probabilidad x Consecuencias

Riesgo = Probabilidad x Pérdidas

Riesgo = Probabilidad x Daños

Para identificar y cuantificar el riesgo durante este proceso, se estudiaron los siguientes principios, como parte del análisis:

- 1) Identificación y evaluación de los peligros o amenazas.
- 2) Estimación de la vulnerabilidad (inspección visual o métodos como curvas de fragilidad).
- 3) Evaluación del riesgo.

Metodología para la Evaluación de Daños.

- Para poder relacionar la magnitud de un evento sísmico con el nivel de daño en las edificaciones, suelen utilizarse matrices de daño o curvas de fragilidad, que pueden ser relacionadas con la pérdida o la vulnerabilidad estructural, lo que permite la simulación de probables escenarios de daños.
- El enfoque de este estudio, se basa en que el riesgo es una variable objetiva y por lo tanto se puede cuantificar probabilísticamente (Cardona , 2001).

Tabla 3.4: Estado de daño según ATC-13.

Caracterización de daño	Rango de daño %	Índice de daño	Descripción
NINGUNO	0	0	Sin daño.
LEVE	0-1	0.5	Daño mínimo que no requiere reparación.
LIGERO	1 - 10	5	Daño menor localizado en algunos elementos que no siempre requiere reparación.
MODERADO	10 - 30	20	Daño menor localizado en muchos elementos que debe ser reparado.
FUERTE	30 - 60	45	Daño extensivo que requiere reparaciones mayores.
SEVERO	60 - 100	80	Daño grave generalizado que puede significar demolición de la estructura.
DESTRUCCIÓN	100	100	Destrucción total o colapso.

FUENTE: MODIFICADO DE (Applied Technology Council. Earthquake Damage Evaluation Data for California, 1985).

Plan de Continuidad de Negocios



El Instituto de Recuperación de Desastres, DRI (Disaster Recovery Institute International Business, 1988), propone las fases que conforman un Plan de Continuidad de Negocios, que son:

1. Inicio y gestión del proyecto.
2. Análisis y evaluación de riesgos.
3. Análisis del impacto sobre el negocio (BIA).
4. Estrategias de continuidad del negocio.
5. Preparación y respuesta ante emergencia.
6. Desarrollo e implementación del BCP.
7. Programas de concientización y capacitación.
8. Aplicación, auditoría y mantenimiento del BCP.
9. Comunicación de crisis.
10. Coordinación con agencias externas y autoridades.

Figura 3.3: Gestión de continuidad del negocio.
FUENTE: (Benton International Latin America, 2012)

Riesgos Asociados a Tsunamis y Terremotos.

Terremotos.

Astroza & Schmidt (2004), definen que los factores asociados a condiciones naturales que controlan el movimiento del suelo son:

- La fuente sismogénica.
- La magnitud del evento (energía liberada).
- La distancia del lugar a la fuente sismogénica (epicentro, propagación de falla).
- El tipo de depósito geológico donde se ubica la construcción.
- La topografía del lugar.
- Las propiedades del suelo sobre el cual se apoya la fundación de la estructura.
- La profundidad del nivel freático.

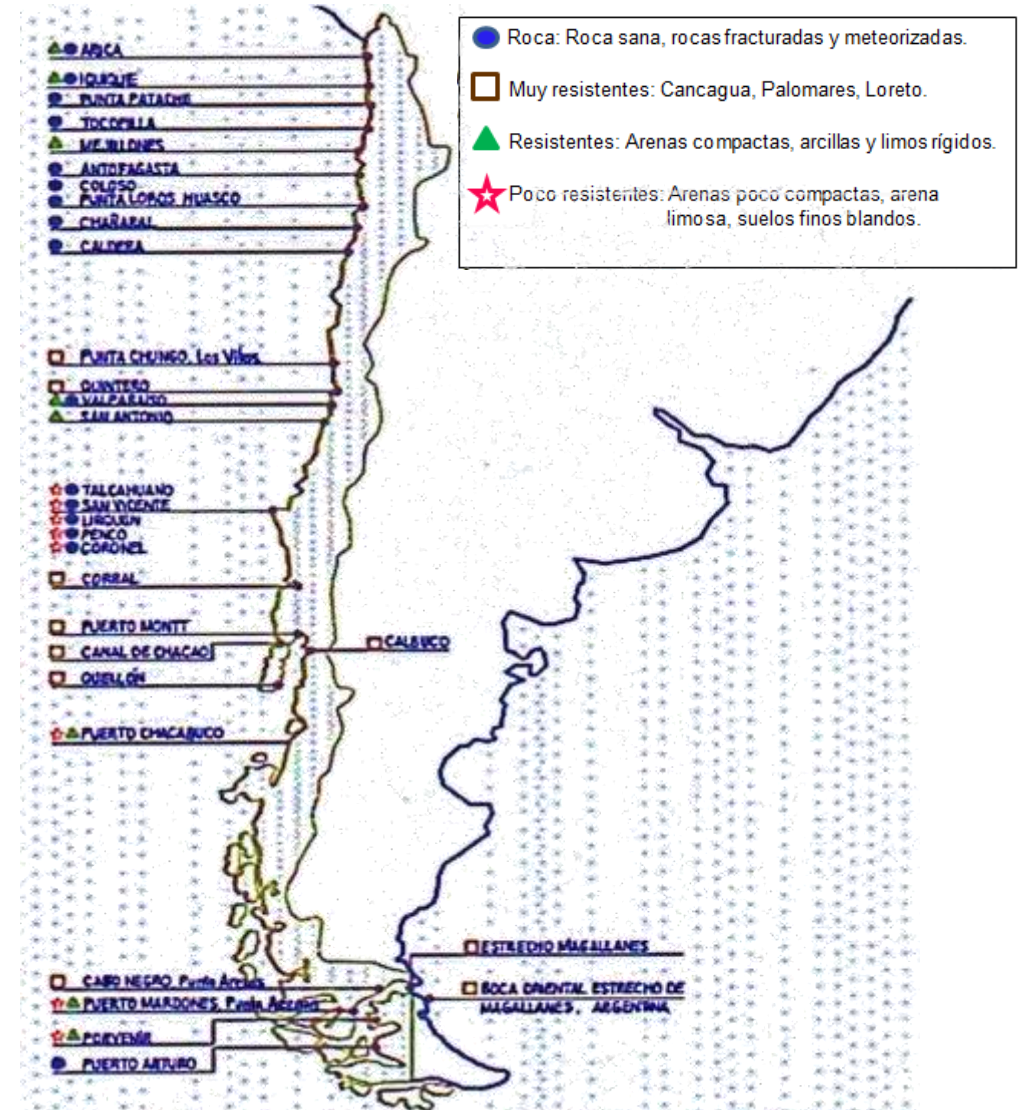


Figura 3.7: Zonificación de Chile por tipo de suelo.

Tsunamis.

- El tectonismo es el causante de cerca del 96% de tsunamis registrados, las erupciones submarinas cerca del 3%, y el 1% restante corresponde a deslizamientos del talud continental.
- La generación de tsunamis dependerá de:
 - La magnitud del terremoto.
 - La distribución, orientación y dimensiones de la zona de ruptura.
 - La ubicación del epicentro.
 - El desplazamiento vertical.
- En las bahías suele darse el fenómeno de reflexión. Condición que causa una amplificación de las alturas del tsunami (CGM, 2015).

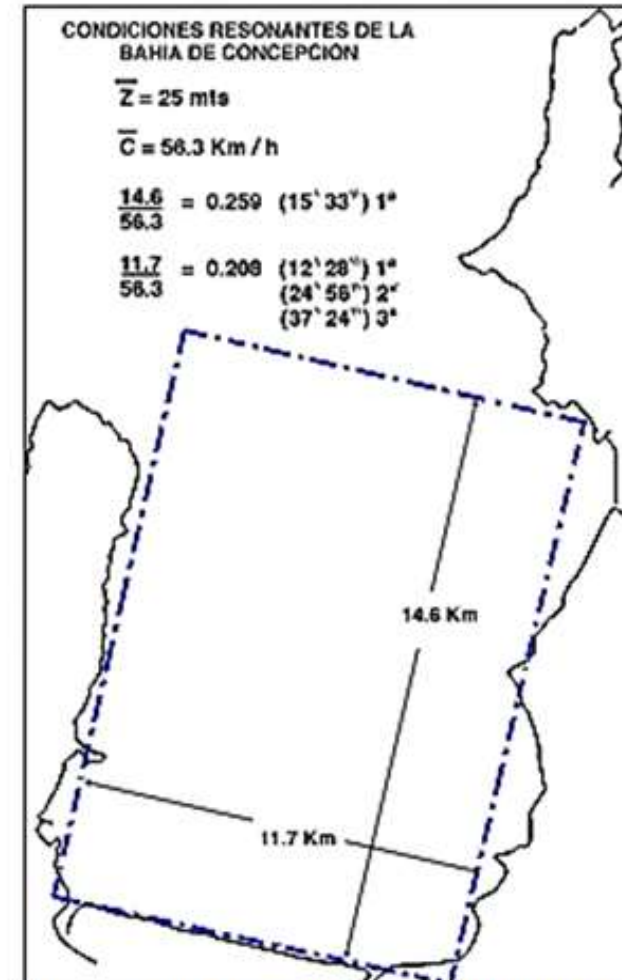


Figura 3.11: Condiciones resonantes de la Bahía de Concepción.
FUENTE: SHOA, 1995

➔ Riesgos Infraestructurales.

- La información infraestructural es la base para poder cuantificar el impacto potencial que pueda tener un evento natural sobre las actividades de desarrollo, por ejemplo, **los antecedentes recopilados sobre infraestructura portuaria son elementos críticos**, que permiten evaluar las vulnerabilidades e iniciar labores de preparación y de respuesta ante un desastre (Cardona & Barbat, 2000).
- La capacidad de respuesta que tengan las estructuras al movimiento del suelo, dependerá de factores que se definen en la etapa conceptual del proyecto, relacionados con las características propias de la estructura (Astroza & Schmidt, 2004), como lo son:
 - El tipo de construcción (Material y refuerzos).
 - La integridad global y local de la estructura (unión entre elementos de refuerzos).
 - La configuración arquitectónica y estructural de la construcción.
 - Propiedades dinámicas de la estructura (masa, rigidez, amortiguamiento).
 - Ubicación de los contenidos y elementos arquitectónicos a lo alto de una estructura.
 - Mantenimiento o conservación.

La Infraestructura Portuaria en Chile.

- Las estructuras portuarias en Chile se pueden clasificar en dos tipos; de tipo abierta (en base a pilotes) y de tipo cerrada (estructura maciza adyacente a línea de costa).
- Las estructuras de tipo cerrada cuentan con un mayor volumen de suelos de relleno, volviéndose más vulnerables a eventos sismo tsunamigénicos, registrando mayores daños por fenómenos de licuación y desplazamiento lateral (Brunet, 2012).

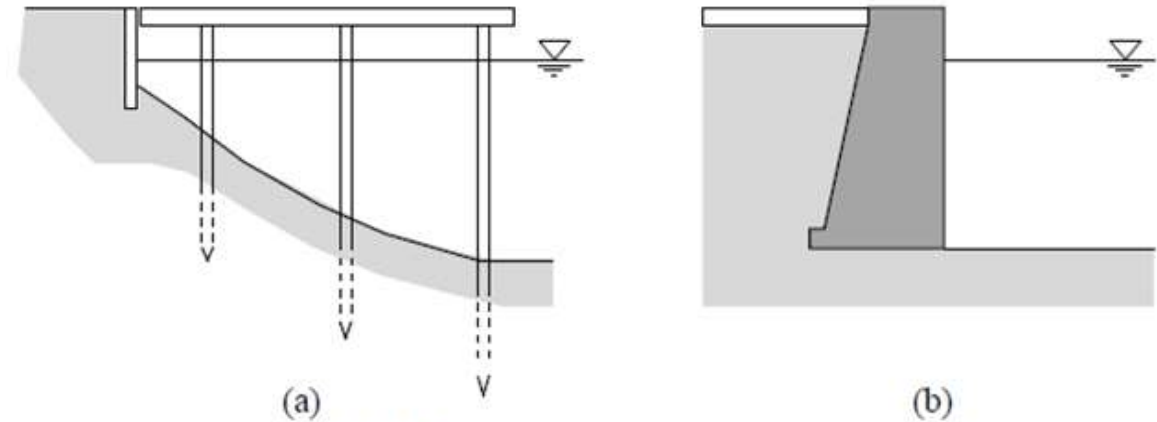


Figura 3.15: a) Estructura tipo abierta; b) Estructura tipo cerrada.

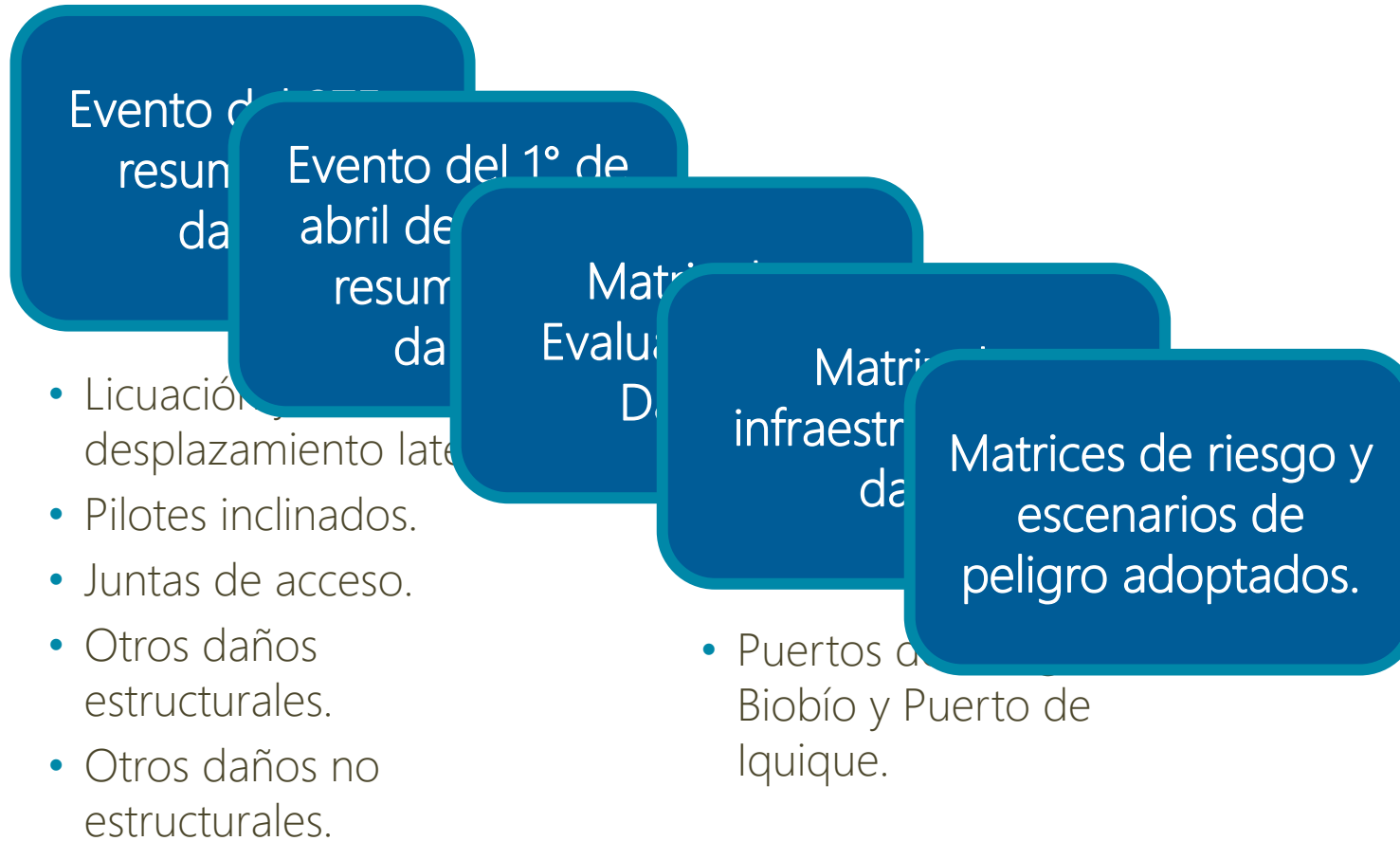
FUENTE: (Brunet, 2012).



Figura 3.16: Tipos de muelle: a) Muelle marginal; b) Muelle perpendicular.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Resultados.



Terremoto de Cauquenes.



- Tuvo un área comprendida entre el sur de la Península de Arauco hasta el norte de Pichilemu.
- El área de falla de 450km por 150km tuvo un desplazamiento mayor a 10m.
- El tiempo estimado que tardó la ruptura en propagarse a lo largo de toda la falla activada fue de 110s.
- Fue el sexto evento sísmico más grande registrado instrumentalmente y completó la laguna sísmica de mayor longitud en Chile.
- El tsunami alcanzó su máximo nivel de runup, 29m aproximadamente, en un acantilado en la costa de Constitución.

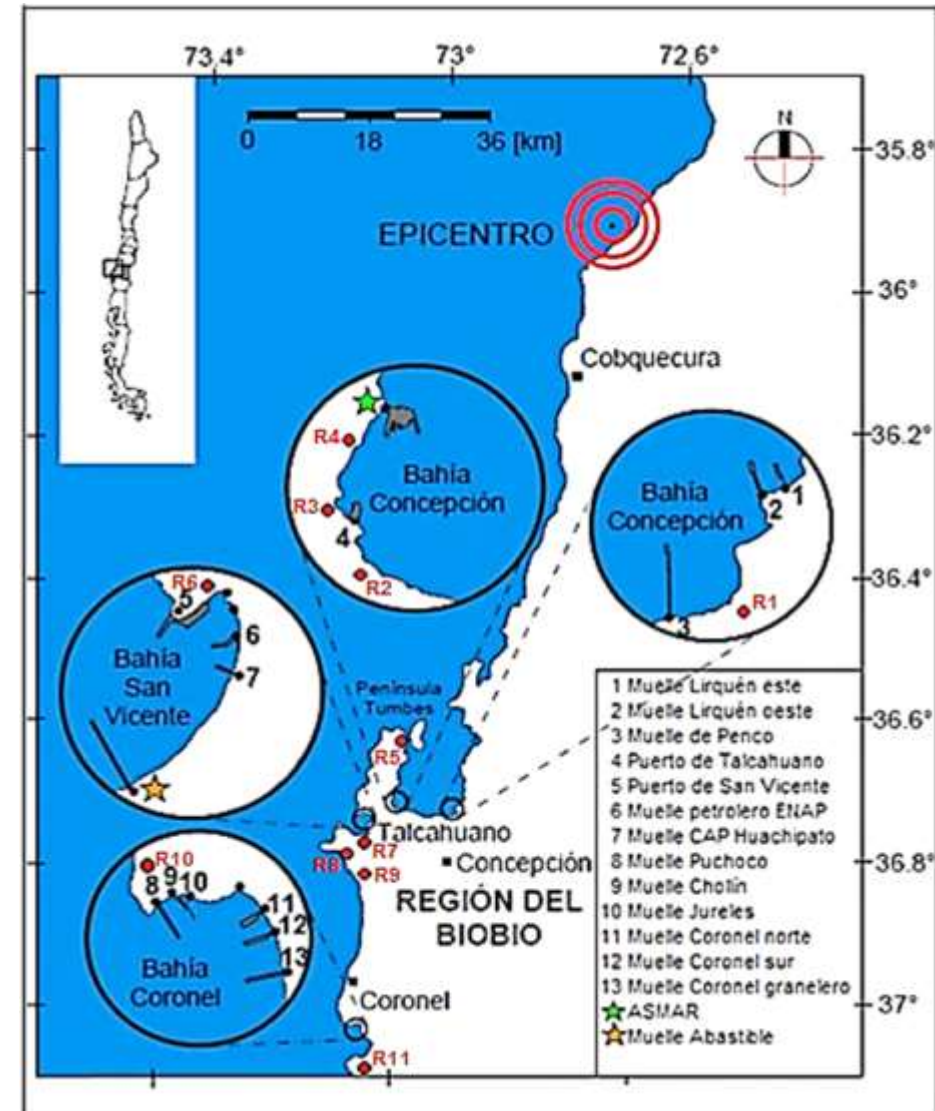


Figura 5.2: Puertos analizados de la octava región.

FUENTE: MODIFICADO DE BRUNET (2012).

Resumen de Daños.

Tabla 5.3: Resumen de daños más comunes registrados.

Puerto/ Muelle	Tipo de muelle	Estructura	Licueción	Desplazamiento lateral	Daños en pilotes	Juntas de acceso	Otros daños estructurales	Daños no estructurales
Lirquén Este	Perpendicular Abierto	Hormigón armado	X	X	X	-	X	X
Lirquén Oeste	Perpendicular Abierto	Hormigón armado	X	-	-	-	X	-
Penco	Perpendicular Abierto	Acero	X	X	X	-	X	X
Talcahuano	Marginal Cerrado	Hormigón armado	X	-	-	-	X	X
SVTI	Marginal Cerrado	Hormigón armado	X	X	-	X	X	-
ENAP	Perpendicular Abierto	Acero	X	X	X	X	X	-
CAP Huachipato	Perpendicular Abierto	Hormigón armado	X	X	X	X	X	X
Puchoco	Perpendicular Abierto	Acero	X	X	-	-	X	X
Chollín	Perpendicular Abierto	Acero	X	X	-	-	-	-
Jureles	Perpendicular Abierto	Acero	X	X	-	X	X	X
Coronel Norte	Perpendicular Abierto	Hormigón armado	X	X	X	X	-	-
Coronel Sur	Perpendicular Abierto	Hormigón armado	X	X	-	X	-	-
Coronel Granelero	Perpendicular Abierto	Hormigón armado	-	-	X	-	X	X

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Resumen de Daños.

Licuación y desplazamiento lateral.



Figura 5.4: Compresión de zona del muelle asociada al fenómeno de desplazamiento lateral.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



Figura D.25: Daños en Puerto de Talcahuano post 27F.
FUENTE: BIBLIOTECA DIRECCIÓN NACIONAL DE OBRAS PORTUARIAS.

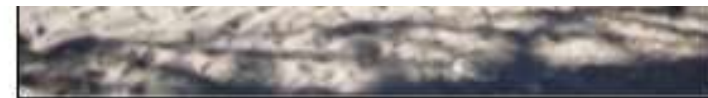


Figura D.38: Inclinación en sistema de fundación del Muelle Jureles por desplazamiento lateral del suelo.
FUENTE: MODIFICADO DE (Brunet, 2012).

Resumen de Daños.

Pilotes inclinados.

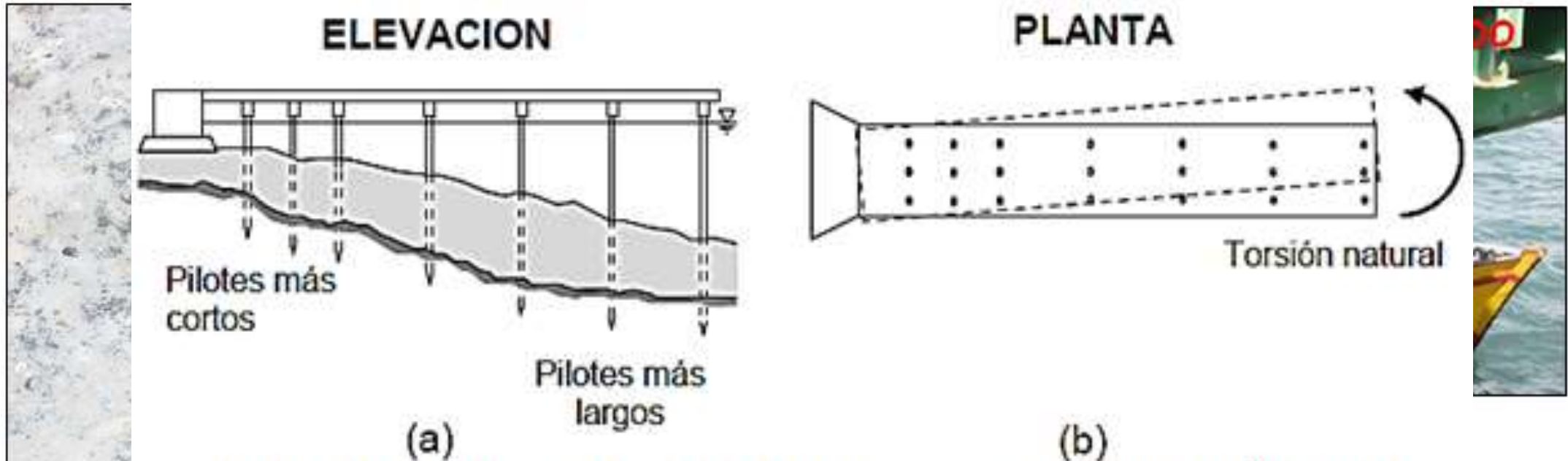


Figura 5.5: (a) Perfil de pilotes sector Puente de Acceso y Cabezo. (b) Torsión natural.

FUENTE: (Brunet, 2012).

Figura D.31: Falla por corte en unión viga-pilote.

FUENTE: MUELLE CAPHUACHIRATO.



Figura D.10: Daño en la conexión viga-pilote del Muelle 1.

FUENTE: PUERTO LIRQUÉN.

Resumen de Daños.

Juntas de acceso.



Figura D.32: Grieta en la loza del muelle (sector del puente de acceso).
FUENTE: MUELLE CAPHUACHIPATO.

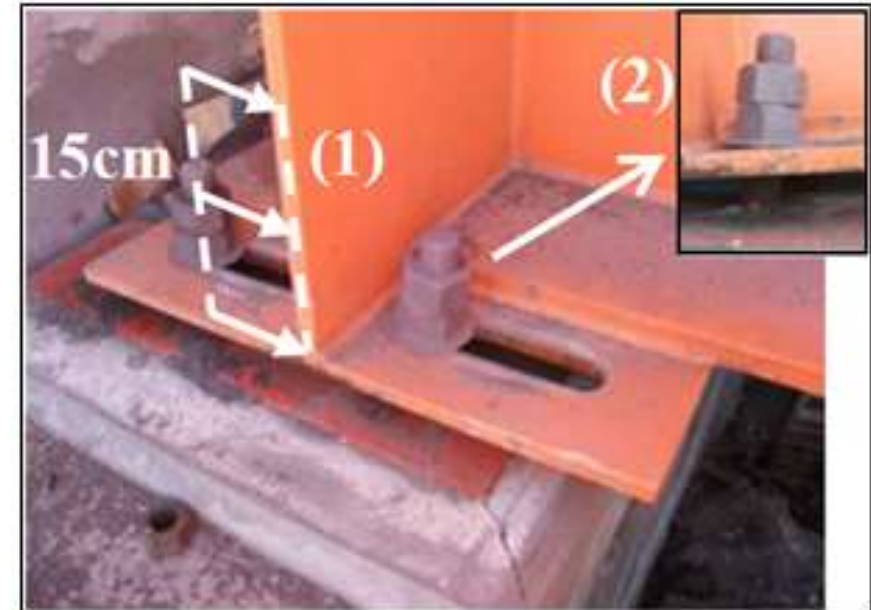


Figura D.29: Muelle ENAP:
(1) Desplazamiento lateral hacia el mar de vigas longitudinales y
(2) fluencia perno.
FUENTE: (Brunet, 2012).

Resumen de Daños.

Otros daños estructurales.



Figura D.4: Falla en el sistema de
FUENTE: PUERTO LIRI

Figura D.41: Grietas en el pavimento de zona de acopio.

FUENTE: PUERTO DE CORONEL

Figura D.21: Camisa de pilotes agrietadas y desprendidas en el cabezo.

FUENTE: MUELLE DE PENCO.

Resumen de Daños.

Otros daños no estructurales.



Figura D.44: Desplome de pilas de containers en sector de acopio, Puerto Coronel.

FUENTE: PUERTO DE CORONEL.



Figura D.26: Vista aérea de daños en Puerto de Talcahuano.

FUENTE: BIBLIOTECA DIRECCIÓN NACIONAL DE OBRAS PORTUARIAS.



Figura D.35: a) Pluma de carga principal; b) Grúa inclinada y estabilizada con barras de acero.

FUENTE: COMPAÑIA SIDERÚRGICA HUACHIPATO.

Recuperación portuaria.

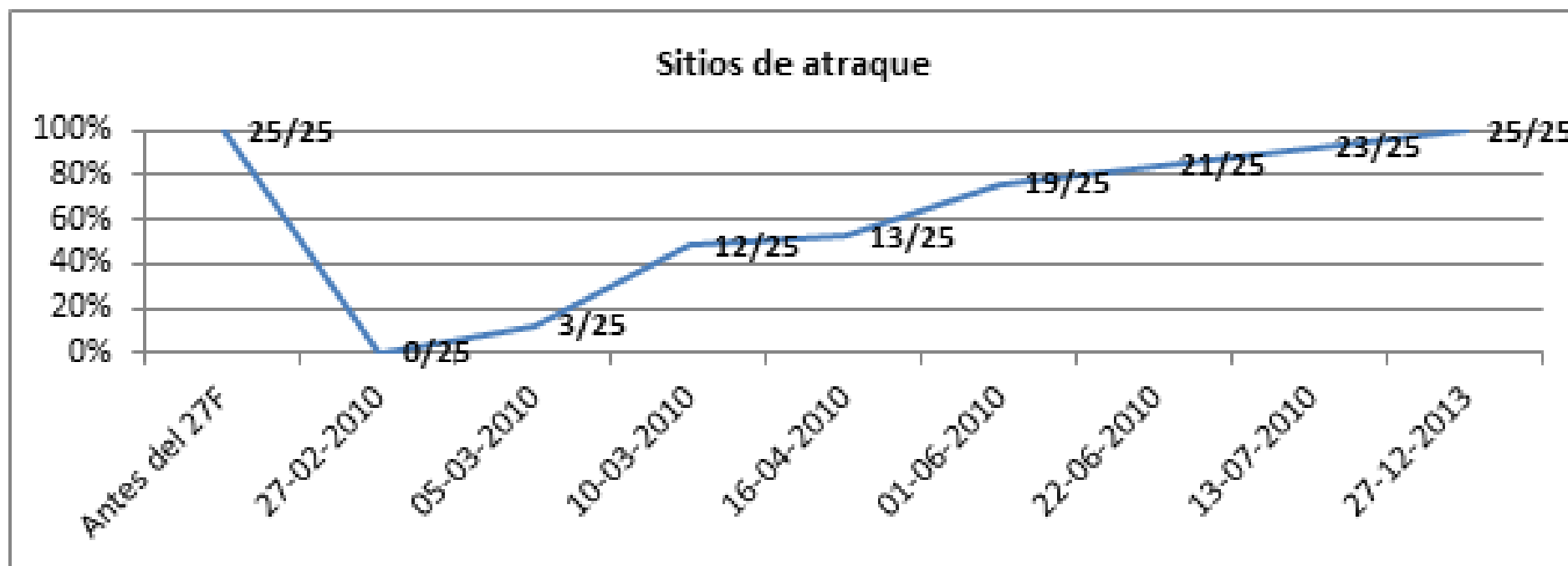


Figura 5.7: Gráfico de recuperación portuaria octava región.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

► Puerto de Iquique.



Figura 6.8: Infraestructura Puerto de Iquique.
FUENTE: MODIFICADA DE GOOGLE EARTH.

Resumen de daños en el Puerto de Iquique.

Tabla 6.1: Clasificación de daños en molo de abrigo (EPI) del Puerto de Iquique.

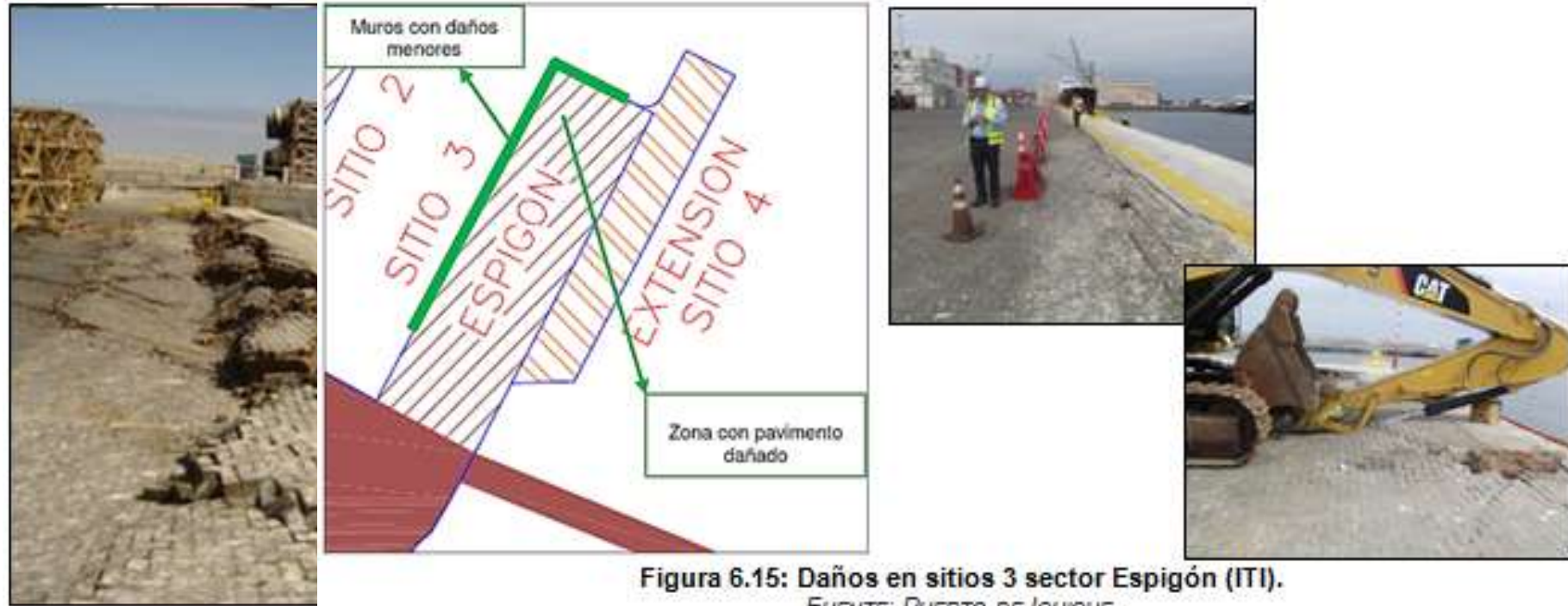


Figura 6.15: Daños en sitios 3 sector Espigón (ITI).

FUENTE: PUERTO DE IQUIQUE.

Figura 6.12: Grietas en las explanadas del Molo de Abrigo (EPI).

FUENTE: PUERTO DE IQUIQUE.



EXPLANADAS	B	1	DN+G	Mediano	Situación variable según tramo, con sectores colapsados.
		2	DN+G	Grave	
		3	DN+G	Muy grave	
	C	1	DN+G	Mediano	Situación variable según tramo, con sectores colapsados.
		2	DN+G	Grave	
		3	DN+G	Muy grave	
DA= Desalineamiento		DN= Desniveles	I= Inclinación	F= Fisuras	G= Grietas

FUENTE: PUERTO DE IQUIQUE.



Matriz de Evaluación de Daños.

Tabla 7.1: Matriz de riesgo en infraestructura portuaria.

NIVEL DE IMPACTO	TIPOS DE IMPACTO		
	INFRAESTRUCTURAL	OPERACIONAL	ACTIVOS
DESPRECIABLE	Los daños estructurales y/o no estructurales son despreciables. Su reparación es inmediata y los gastos asociados no son significativos.	No hay pérdida de continuidad del servicio.	Los daños sobre activos son despreciables y/o su costo asociado es muy bajo. No conlleva una interrupción operacional.
MENOR	Los daños estructurales y/o no estructurales son menores y localizados. Su reparación requiere una planificación simple y los gastos asociados no son importantes.	Las operaciones normales del puerto pueden continuar previo chequeo de las condiciones infraestructurales. Podría requerirse una parada operacional breve para ejecutar reparaciones.	Daño menor a MUS\$0.5. Con breve interrupción operacional.
MODERADO	Los daños estructurales son menores a moderados y los daños no estructurales son moderados a severos. Su reparación requiere una planificación detallada y los gastos asociados son importantes.	Las operaciones normales del puerto son interrumpidas y podrían continuar parcialmente después de chequear las condiciones infraestructurales. Es imprescindible efectuar paradas operacionales para ejecutar reparaciones.	Daño localizado, entre MUS\$0.5-1.5. Detención de algunos sectores del puerto.
SERIO	Los daños estructurales son moderados a mayores y los daños no estructurales son severos. Su reparación requiere una planificación detallada, con grandes gastos asociados y con efectos secundarios que pueden afectar la normal operación del puerto.	Las operaciones normales del puerto son interrumpidas y sólo pueden continuar parcialmente después de chequear y reparar las condiciones infraestructurales. Es imprescindible efectuar paradas operacionales extensas para ejecutar reparaciones.	Daño mayor, entre MUS\$1.5-5. Pérdidas parciales de operación.
SEVERO	Los daños estructurales son severos, y se compromete la estabilidad de las estructuras. Los elementos no estructurales resultan severamente dañados, afectando su serviciabilidad. Su reparación o reconstrucción requiere una planificación exhaustiva, con grandes gastos asociados y con efectos secundarios que afectan la normal operación del puerto.	Las operaciones normales del puerto son interrumpidas y sólo pueden continuar después de reconstruir la infraestructura dañada o, eventualmente, colapsada. Las paradas operacionales son muy extensas.	Daño extensivo, sobre MUS\$5. Pérdidas sustanciales de operación.

Matriz de Infraestructura vs. Daños

CÓDIGO	NOMBRE	AÑO	ZONA DE ACOPIO									Ponderación daño en ZA	Nivel de daño cualitativo	COMENTARIO
			ESTRUCTURA	DAÑO 1	DAÑO 2	DAÑO 3	DAÑO 4	DAÑO 5	DAÑO 6	DAÑO 7	DAÑO 8			
Lir1-70	LIRQUEN ESTE	1970	ZA1				2	2	2	2	1	1.8	Menor	
Lir2-95	LIRQUEN OESTE	1995	ZA1				2	2	2	2	1	1.8	Menor	
Pen70	PENCO	1970	ZA2				1	1	2	1	1	1.2	Menor	
Tal35	TALCAHUANO*	1935	ZA1				5	5	5	5	4	4.8	Severo	
Svt174	SVTI	1974	ZA1				2	2	1	2	1	1.6	Menor	
Enap09	ENAP	2009	ZA2				1	1	2	1	1	1.2	Menor	Al tratarse de un puerto petrolero, no cuenta con zonas de explanada aledañas a la costa. El petróleo es trasladado tierra adentro mediante tuberías.
Hua50	HUACHIPATO	1950	ZA2				2	2	3	1	1	1.8	Menor	
Puch91	PUCHOCO	1991	ZA2				1	1	1	2	1	1.2	Menor	
Chol11	CHOLLÍN	2011	ZA2				1	1	1	1	1	1	Despreciable	
Jur42	JURELES	1942	ZA2				1	1	1	2	1	1.2	Menor	
CorN96	CORONEL NORTE	1996	ZA1				3	2	3	3	3	2.8	Moderado	
CorS07	CORONEL SUR	2007	ZA1				3	2	3	3	3	2.8	Moderado	
CorG10	CORONEL GRANELERO	2010												Al momento del evento del 27F, se encontraba en etapa de construcción. Además, su zona de explanada es compartida con los muelles norte y sur de la misma empresa portuaria.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Matriz de Evaluación de Daños.

Tabla 7.2: Matriz de impacto aplicada a los puertos de la octava región.

PUERTO	TIPOS DE IMPACTO		
	Infraestructural	Operacional	Activos

Tabla 7.3: Matriz de impacto aplicada al Puerto de Iquique.

PUERTO DE IQUIQUE	TIPOS DE IMPACTO		
	Infraestructural	Operacional	Activos
Molo de Unión	Menor	Despreciable	Despreciable
Zona de Acopio	Despreciable	Despreciable	Despreciable
Espigón	Menor	Menor	Despreciable
Molo de Abrigo	Serio	Severo	Serio

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Muelle Jureles	Menor	Moderado	Serio
Muelle Chollín	Menor	Moderado	Moderado
Coronel Norte	Moderado	Moderado	Moderado
Coronel Sur	Menor	Menor	Menor

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Escenarios de Peligro Adoptados.

- Los eventos sismo tsunamigénicos históricos en Arica e Iquique de 1604, 1868 y 1877 tuvieron una magnitud cercana a $8.8M_w$. Estimada a partir de registros históricos de los tsunamis generados por estos eventos con una altura aproximada de 20m.
- Barrientos (2014), indica que al estimar la longitud de ruptura de estos significativos sismos del último siglo en el norte de Chile aún existen dos sectores en los cuales no se han producido sismos de mayor intensidad, precisamente al norte y sur de la zona de ruptura del evento sísmico del 2014.

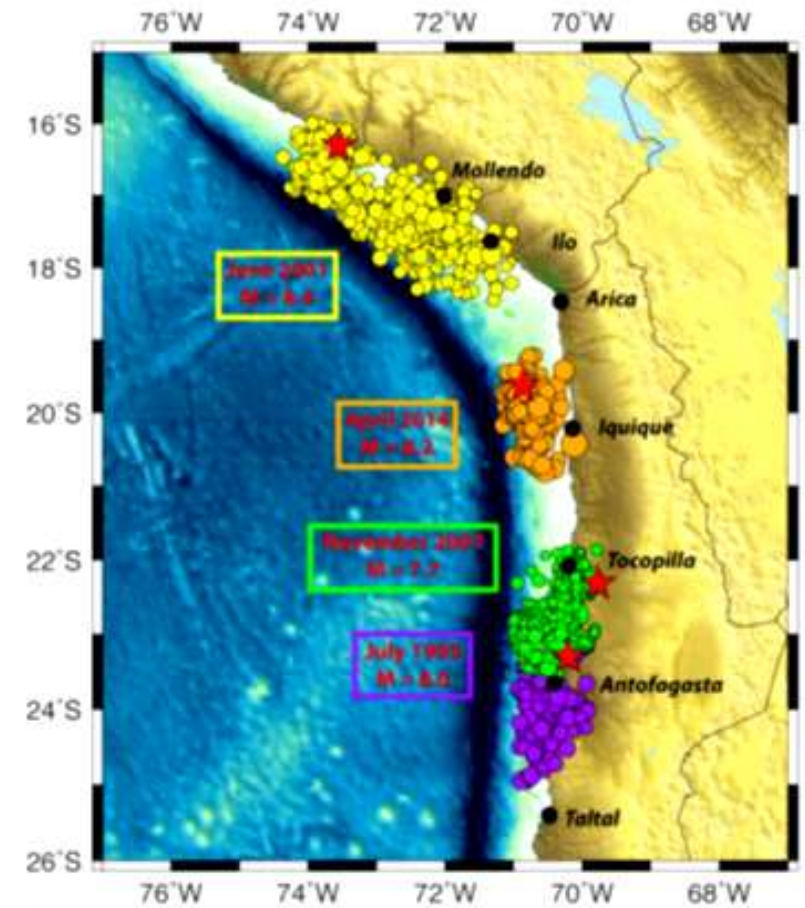


Figura C.7: Sismicidad durante un mes de duración, asociada a los terremotos del sur de Perú (2001), Iquique (2014), Tocopilla (2007) y Antofagasta (1995).
FUENTE: (Barrientos, 2014).

Escenarios de Peligro Adoptados.

Escenario 1

Tabla 7.4: Matriz de impacto ante Escenario 1 aplicada al Puerto de Iquique.

PUERTO DE IQUIQUE	TIPOS DE IMPACTO		
	Infraestructural	Operacional	Activos
Molo de Unión	Moderado	Moderado	Menor
Zona de Acopio	Menor	Menor	Menor
Espigón	Serio	Severo	Serio
Molo de Abrigo	Severo	Severo	Severo

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Escenarios de Peligro Adoptados.

Escenario 2

Tabla 7.5: Matriz de impacto ante Escenario 2 aplicada al Puerto de Iquique.

PUERTO DE IQUIQUE	TIPOS DE IMPACTO		
	Infraestructural	Operacional	Activos
Molo de Unión	Menor	Menor	Despreciables
Zona de Acopio	Moderado	Moderado	Menor
Espigón	Menor	Moderado	Menor
Molo de Abrigo	Moderado	Serio	Moderado

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Conclusiones

- Los efectos por terremoto y tsunami se hacen difíciles de cuantificar debido a que producen efectos negativos acumulativos a largo plazo.
- La capacidad de respuesta que tuvo cada puerto analizado fue variada y dependió principalmente de las características propias de cada uno de ellos.
- Los puertos con infraestructura del tipo cerrada, registraron un mayor nivel de daños, llegando incluso a colapsar. Mientras que, las estructuras portuarias del tipo abierta, presentaron daños menores y más localizados.
- Un aspecto crítico en los muelles analizados, fue la rigidez lateral de los pilotes verticales, los que registraron una mayor cantidad de daños por licuación y desplazamiento lateral.
- Los puertos con estructura de acero (tanto losa como pilotes), prácticamente no registraron daños, salvo por algunos daños menores en elementos de la superestructura o en el encamisado de sus pilotes (de tenerlos).
- Por otra parte, las estructuras portuarias que contaban con sistemas antisísmicos en los sectores de atraque, registraron un notable comportamiento por sobre todas las demás estructuras.

Conclusiones

- El análisis llevado a cabo en este proyecto de título no responde a un fin último, sino que sienta las bases para investigaciones futuras, como lo son las curvas de fragilidad, ya sea en aspectos complementarios y/o paralelos a lo desarrollado, siendo necesario ahondar en los efectos y características propias de la infraestructura portuaria mayor, involucrando y detectando múltiples variables más allá de las descritas en este proyecto.
- Parte de los aspectos que quedan por desarrollar aún más, es el análisis sobre las características físicas propias de la zona de emplazamiento del puerto, como también realizar una descripción exhaustiva de las singularidades de cada puerto.
- Es necesario contemplar medidas para reducir la vulnerabilidad en el diseño del proyecto y no después, lo que aumenta significativamente su costo.
- Es fundamental que se fomente y desarrolle una mayor investigación e innovación tecnológica a fin de optimizar los diseños, la mitigación de daños y el resguardo de las líneas vitales ante eventos sismo tsunamigénicos. No olvidando que el después del desastre, es el antes del próximo evento y que por lo tanto todo lo que se haga o se deje de hacer, influirá en las repercusiones que alcance un próximo evento.

ANEXO C.

Tres de los más grandes terremotos conocidos en Chile se produjeron en 1604, 1868 y 1877 al sur de Perú y norte de Chile, en los cuales su magnitud fue estimada en base a registros de relatos históricos de la época (Comte & Pardo, 1991), siendo de gran importancia la información sobre los tsunamis producidos.

Es probable que estas dos zonas se activen en el futuro, y que de hacerlas por separado tendrían magnitudes similares a la del evento del 2014 (cercas a 8.2Mw), debido a que tienen una longitud similar a la abarcada por el terremoto de 2014. Sin embargo, no se puede descartar que ambas zonas se activen simultáneamente, pudiendo alcanzar una magnitud mucho mayor (Barrientos, 2014).

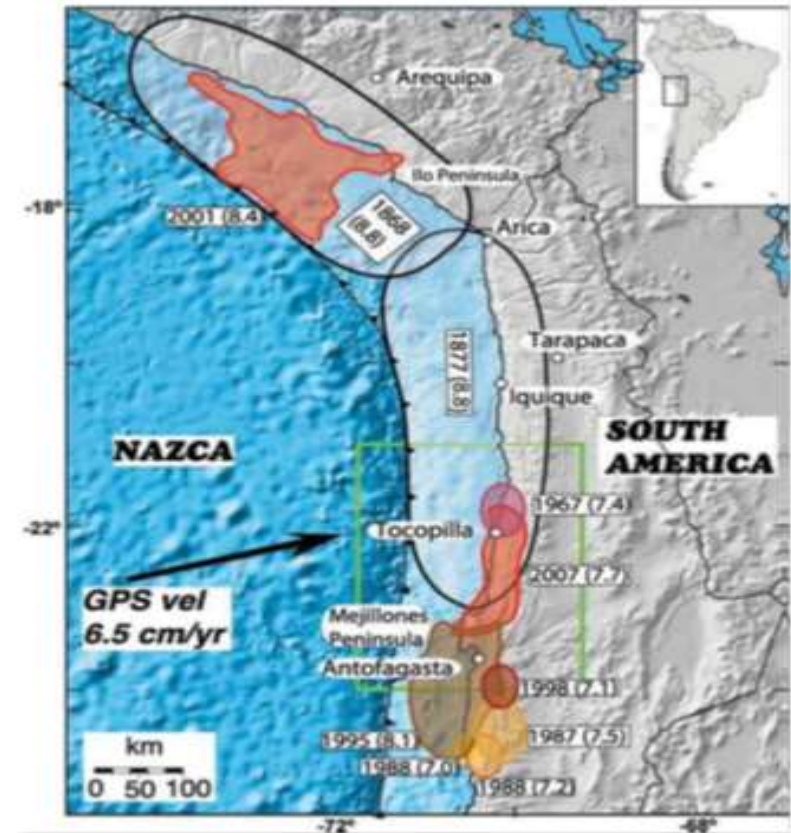


Figura C.6: Sismos significativos y zonas de ruptura al norte de Chile y sur de Perú (previos al 2014).

FUENTE: (Béjar-Pizarro, y otros, 2010).

ANEXO C.

La Figura C.7 muestra la sismicidad durante un mes de duración asociada a los principales terremotos más recientes ocurridos en el norte de Chile y sur de Perú. Barrientos (2014), menciona que, al considerar la distribución de estas réplicas, es posible estimar la longitud de ruptura de cada uno de estos eventos.

Por el momento, no existe un consenso sobre la tasa de recurrencia de grandes terremotos y si las tensiones acumuladas serán liberadas en una serie de terremotos de magnitud cercana a los $8.0M_w$ o en un tipo de megaterremoto de magnitud mayor a $9.0M_w$.

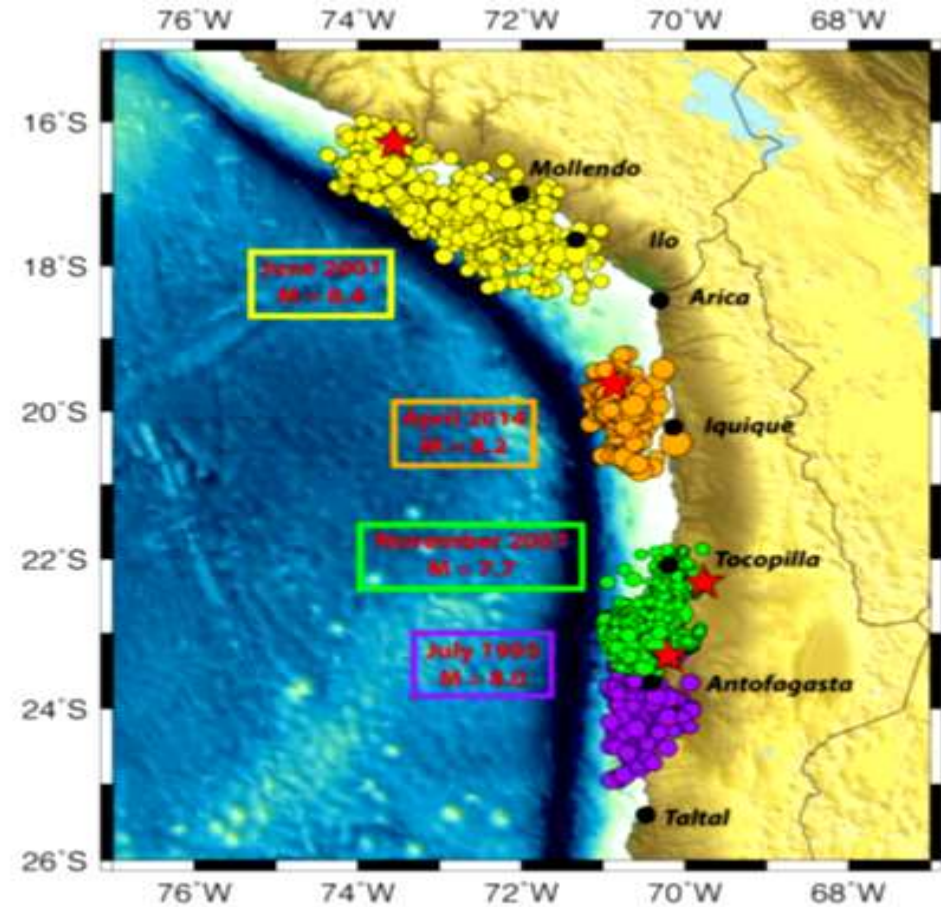


Figura C.7: Sismicidad durante un mes de duración, asociada a los terremotos del sur de Perú (2001) Iquique (2014), Tocopilla (2007) y Antofagasta (1995).
FUENTE: (Barrientos, 2014).

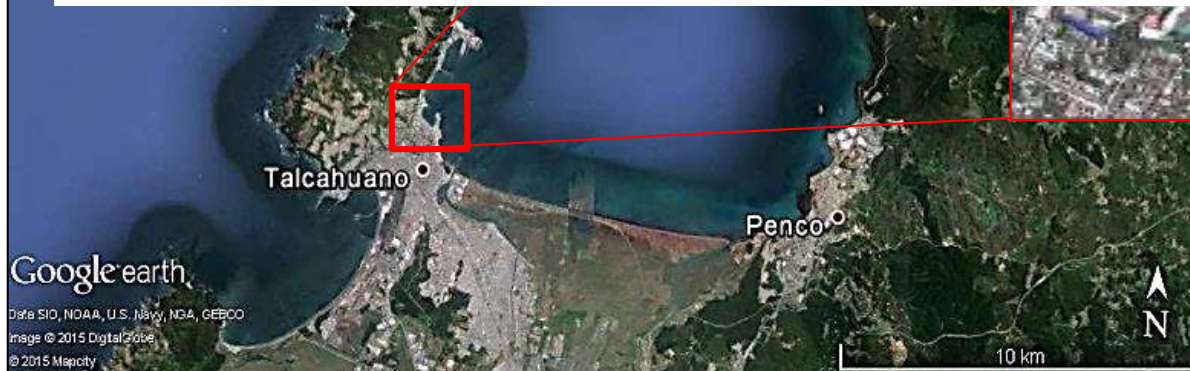
7.3. Escenarios de Peligro Adoptados.

7.3.1. Escenario 1

Tabla 7.4: Matriz de impacto ante Escenario 1 aplicada al Puerto de Iquique.

PUERTO DE IQUIQUE	TIPOS DE IMPACTO		
	Infraestructural	Operacional	Activos
Molo de Unión	Moderado	Moderado	Menor
Zona de Acopio	Menor	Menor	Menor
Espigón	Serio	Severo	Serio
Molo de Abrigo	Severo	Severo	Severo

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.



7.3. Escenarios de Peligro Adoptados.

7.3.2. Escenario 2

Tabla 7.5: Matriz de impacto ante Escenario 2 aplicada al Puerto de Iquique.

PUERTO DE IQUIQUE	TIPOS DE IMPACTO		
	Infraestructural	Operacional	Activos
Molo de Unión	Menor	Menor	Despreciables
Zona de Acopio	Moderado	Moderado	Menor
Espigón	Menor	Moderado	Menor
Molo de Abrigo	Moderado	Serio	Moderado

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Google earth

Image © 2015 DigitalGlobe
© 2015 Mapbox
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Hualpén

7 km

i. Licuación.

El fenómeno de licuación de suelos saturados, corresponde a un aumento de la presión de poros del suelo debido a un sismo (o movimientos cíclicos), de tal magnitud que se anula la presión efectiva, y el suelo pierde completamente la resistencia al corte, comportándose como un líquido. En efecto, la resistencia al corte de un suelo no cohesivo, se puede expresar como:

$$\tau = (\sigma' - \Delta u) \operatorname{tg} \phi$$

donde:

τ	=	resistencia al corte del suelo
σ'	=	presión efectiva inicial
Δu	=	incremento de presión de poros
ϕ	=	ángulo de fricción interna del suelo

De acuerdo con lo anterior, para que un suelo se licúe tienen que cumplirse simultáneamente las siguientes condiciones:

- Suelo saturado.
- Suelo suelto y susceptible de compactarse con solicitaciones cíclicas.
- Solicitación cíclica que compacte el suelo.

ii. Desplazamiento lateral.

Conocido por en inglés, como 'lateral spreading', es el movimiento lateral finito del suelo en pendiente suave o escarpada, causado por la licuefacción de terrenos adyacentes inducida por un sismo de gran magnitud.

Este desplazamiento lateral es común en las costas, donde los suelos sueltos y arenosos saturados se encuentran comúnmente en aguas poco profundas.

Este desplazamiento lateral, se produce por la generación de presión de poros en el suelo, como resultado de la agitación del sismo, reduciendo la rigidez y resistencia del suelo.

Las estructuras soportadas sobre cimientos a poca profundidad son más susceptibles al daño por '*lateral spreading*'.

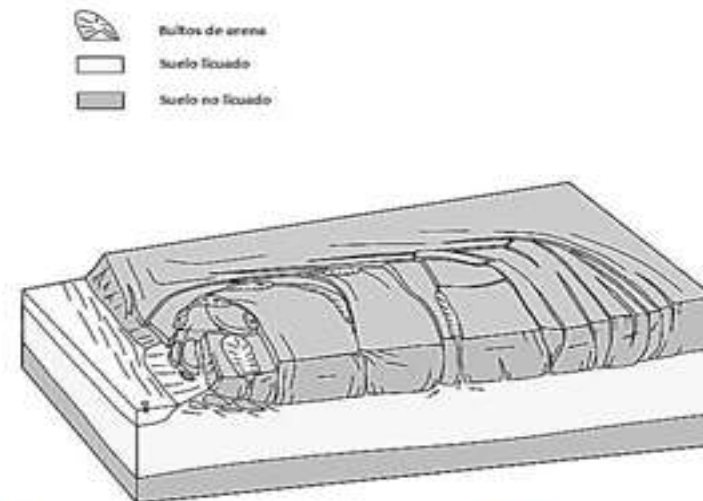


Figura E.1: Representación esquemática del desplazamiento lateral resultante de la licuefacción de suelo en un terremoto (Varnes, 1978).

ANEXO E.

ii. Desplazamiento lateral.

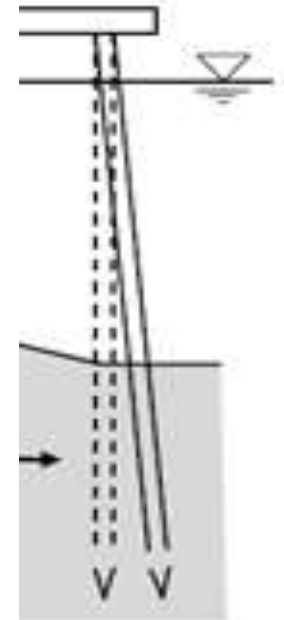
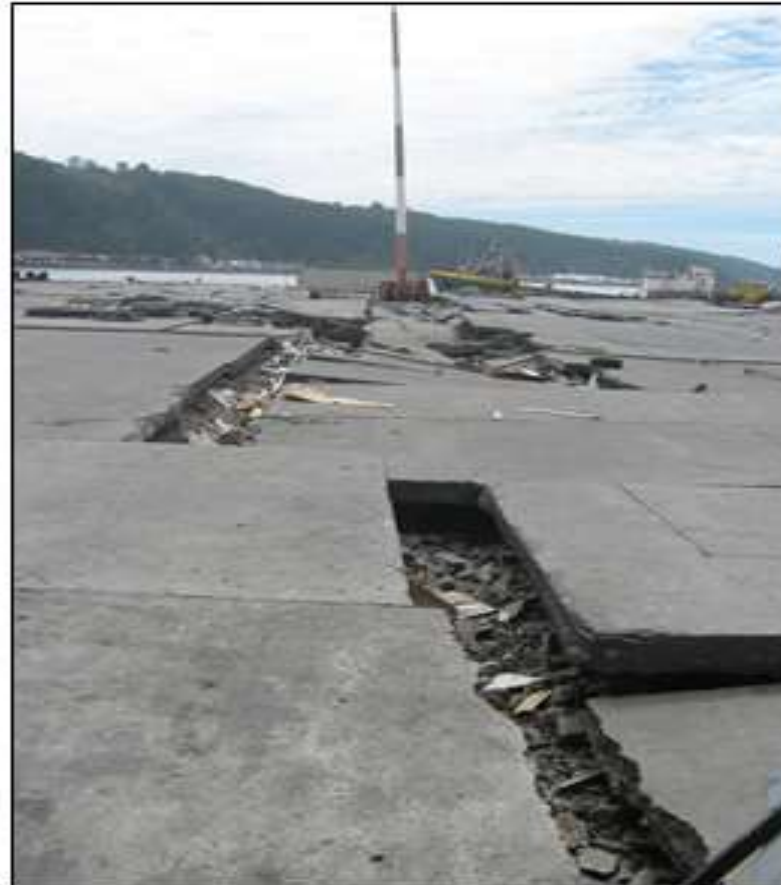
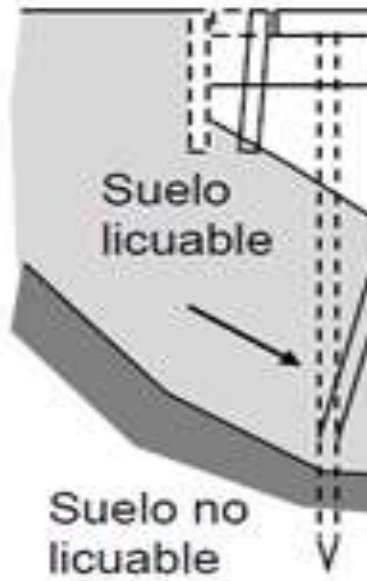


Figura E.3: Licuación y desplazamiento lateral de explanada en Puerto de Talcahuano

ANEXO F.

Los tipos de daños se categorizaron en 8 tipos, que son:

- Daño 1: Pilotes cortados en unión viga-pilote.
- Daño 2: Pilotes desplazados e/o inclinados.
- Daño 3: Daños en vigas (pérdida de recubrimiento y/o desplazadas).
- Daño 4: Grietas y fisuras (en explanadas y/o pilotes).
- Daño 5: Otros daños estructurales (defensas, bitas, daños en líneas vitales, etc.).
- Daño 6: Otros daños no estructurales (maquinaria, equipamiento, boyas, contenedores, etc.).
- Daño 7: Licuación.
- Daño 8: Desplazamiento lateral.

Las tipologías estructurales por cada sector fueron categorizadas de la siguiente manera:

- ZA1: Espacios marítimos. Corresponde a las áreas de relleno de las obras marítimas.
- ZA2: Espacios terrestres. Corresponde a las zonas primarias del puerto comercial en tierra.
- PA1: Supraestructura losa de HA sobre pilotes de acero con encamisado.
- PA2: Supraestructura de acero sobre pilotes de acero con encamisado.
- PA3: Supraestructura losa de HA sobre pilotes de acero sin encamisado
- PA4: Supraestructura de acero sobre pilotes de acero sin encamisado.
- PA5: Supraestructura losa de HA sobre pilotes de hormigón armado.
- PA6: Supraestructura losa de HA con pilotes embebidos de hormigón armado.
- PA7: Supraestructura losa de HA sobre pilotes de acero sin encamisado y con aislamiento sísmico.
- MC1: Muro de contención con tablestacado y con losa de HA.
- MC2: Muro de contención en talud con losa de HA y sitios de atraque piloteados.
- MC3: Muro de contención mediante cajones gravitacionales.

ANEXO F.

CÓDIGO	NOMBRE	AÑO	ZONA DE ACOPIO									Ponderación daño en ZA	Nivel de daño cualitativo	COMENTARIO
			ESTRUCTURA	DAÑO 1	DAÑO 2	DAÑO 3	DAÑO 4	DAÑO 5	DAÑO 6	DAÑO 7	DAÑO 8			
Lir1-70	LIRQUEN ESTE	1970	ZA1				2	2	2	2	1	1.8	Menor	
Lir2-95	LIRQUEN OESTE	1995	ZA1				2	2	2	2	1	1.8	Menor	
Pen70	PENCO	1970	ZA2				1	1	2	1	1	1.2	Menor	
Tal35	TALCAHUANO*	1935	ZA1				5	5	5	5	4	4.8	Severo	
Svti74	SVTI	1974	ZA1				2	2	1	2	1	1.6	Menor	
Enap09	ENAP	2009	ZA2				1	1	2	1	1	1.2	Menor	Al tratarse de un puerto petrolero, no cuenta con zonas de explanada aledañas a la costa. El petróleo es trasladado tierra adentro mediante tuberías.
Hua50	HUACHIPATO	1950	ZA2				2	2	3	1	1	1.8	Menor	
Puch91	PUCHOCO	1991	ZA2				1	1	1	2	1	1.2	Menor	
Chol11	CHOLLÍN	2011	ZA2				1	1	1	1	1	1	Despreciable	
Jur42	JURELES	1942	ZA2				1	1	1	2	1	1.2	Menor	
CorN96	CORONEL NORTE	1996	ZA1				3	2	3	3	3	2.8	Moderado	
CorS07	CORONEL SUR	2007	ZA1				3	2	3	3	3	2.8	Moderado	
CorG10	CORONEL GRANELERO	2010												Al momento del evento del 27F, se encontraba en etapa de construcción. Además, su zona de explanada es compartida con los muelles norte y sur de la misma empresa portuaria.

ANEXO F.

CÓDIGO	NOMBRE	AÑO	ZONA DE ACOPIO									Ponderación daño en ZA	Nivel de daño cualitativo	COMENTARIO
			ESTRUCTURA	DAÑO 1	DAÑO 2	DAÑO 3	DAÑO 4	DAÑO 5	DAÑO 6	DAÑO 7	DAÑO 8			
Lir1-70	LIRQUEN ESTE	1970	ZA1				2	2	2	2	1	1.8	Menor	
Lir2-95	LIRQUEN OESTE	1995	ZA1				2	2	2	2	1	1.8	Menor	
Pen70	PENCO	1970	ZA2				1	1	2	1	1	1.2	Menor	
Tal35	TALCAHUANO*	1935	ZA1				5	5	5	5	4	4.8	Severo	
Svti74	SVTI	1974	ZA1				2	2	1	2	1	1.6	Menor	
Enap09	ENAP	2009	ZA2				1	1	2	1	1	1.2	Menor	Al tratarse de un puerto petrolero, no cuenta con zonas de explanada aledañas a la costa. El petróleo es trasladado tierra adentro mediante tuberías.
Hua50	HUACHIPATO	1950	ZA2				2	2	3	1	1	1.8	Menor	
Puch91	PUCHOCO	1991	ZA2				1	1	1	2	1	1.2	Menor	
Chol11	CHOLLÍN	2011	ZA2				1	1	1	1	1	1	Despreciable	
Jur42	JURELES	1942	ZA2				1	1	1	2	1	1.2	Menor	
CorN96	CORONEL NORTE	1996	ZA1				3	2	3	3	3	2.8	Moderado	
CorS07	CORONEL SUR	2007	ZA1				3	2	3	3	3	2.8	Moderado	
CorG10	CORONEL GRANELERO	2010												Al momento del evento del 27F, se encontraba en etapa de construcción. Además, su zona de explanada es compartida con los muelles norte y sur de la misma empresa portuaria.

ANEXO F.

CÓDIGO	CABEZO									Ponderación de daño en Cabezo	Nivel de daño cualitativo	COMENTARIOS
	ESTRUCTURA	DAÑO 1	DAÑO 2	DAÑO 3	DAÑO 4	DAÑO 5	DAÑO 6	DAÑO 7	DAÑO 8			
Lir1-70	PA5	3	5	5	5	4	3	4	5	4.25	Severo	
Lir2-95	PA5	3	4	4	4	4	3	4	4	3.75	Serio	
Pen70	PA2	3	4	4	3	3	4	4	4	3.63	Serio	
Tal35	-											Por las mismas razones expuestas en puente de acceso, es que no cuentan con Cabezo.
Svti74	-											Por las mismas razones expuestas en puente de acceso, es que no cuentan con Cabezo.
Enap09	PA4	0	1	1	0	1	1	2	2	1.00	Despreciable	
Hua50	PA6	4	4	3	3	3	4	4	4	3.63	Serio	
Puch91	PA3	2	1	1	0	1	2	2	1	1.25	Menor	
Chol11	PA3	0	1	0	0	1	0	1	1	0.50	Despreciable	
Jur42	PA3	2	1	0	0	1	2	2	1	1.13	Menor	
CorN96	PA1	3	3	2	1	1	3	3	3	2.38	Moderado	
CorS07	PA7	2	2	1	1	1	2	3	2	1.75	Menor	

ANEXO F.

CÓDIGO	MUELLE MARGINAL									Ponderación de daño en Muelle Marginal	Nivel de daño cualitativo	COMENTARIOS
	ESTRUCTURA	DAÑO 1	DAÑO 2	DAÑO 3	DAÑO 4	DAÑO 5	DAÑO 6	DAÑO 7	DAÑO 8			
Lir1-70	-											
Lir2-95	-											
Pen70	-											
Tal35	MC1	-	-	-	5	5	5	5	3	4.60	Severo	El muelle marginal, corresponde a la zona interior de la dársena destinada a naves pesqueras menores. Sus muros de contención fueron hechos mediante tablestacado.
Svti74	MC2	-	4	4	3	3	3	5	5	3.86	Serio	Es un malecón de tipo marginal, construido en terrenos ganados al mar, en donde se ubican los sitios de atraque 1, 2 y 3. Algunos sectores de estos se encuentran reforzados mediante pilotes. Actualmente se encuentra en construcción la ampliación, Sitio 4.
Enap09	-											
Hua50	-											
Puch91	-											
Chol11	-											
Jur42	-											
CorN96	-											
CorS07	-											

ANEXO F.

CÓDIGO	ESPIGÓN									Ponderación de daño en espigón	Nivel de daño cualitativo	COMENTARIOS
	ESTRUCTURA	DAÑO 1	DAÑO 2	DAÑO 3	DAÑO 4	DAÑO 5	DAÑO 6	DAÑO 7	DAÑO 8			
Lir1-70	-											
Lir2-95	-											
Pen70	-											
Tal35	MC3	-	-	-	5	5	5	5	3	4.60	Severo	Los muros de contención del sector espigón, fueron hechos mediante cajones gravitacionales. Es el único puerto que cuenta con espigón (salvo ASMAR, que es puerto militar).
Svti74	-											
Enap09	-											
Hua50	-											
Puch91	-											
Chol11	-											
Jur42	-											
CorN96	-											
CorS07	-											