

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EL TEMPORAL DEL 8 DE AGOSTO DE 2015 EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO

PATRICIO WINCKLER GREZ ¹
MANUEL CONTRERAS LÓPEZ ²
JOSÉ BEYÁ MARSHALL ³
MAURICIO MOLINA PEREIRA ⁴

RESUMEN

El temporal del 8 de agosto de 2015 se caracterizó por el alineamiento de varios factores que se sumaron para generar una condición extrema. La combinación de cuatro variables meteoceanográficas -viento, oleaje, presión atmosférica y marea astronómica- además de la exposición de la bahía de Valparaíso al oleaje proveniente del cuarto cuadrante, redundó en la destrucción de instalaciones portuarias, obras de protección costera y edificaciones. En este documento se reportan ejemplos de daños observados en la infraestructura costera en la bahía de Valparaíso y se realiza un análisis preliminar de las variables físicas que permite explicar el nivel de daño observado.

¹ Profesor Adjunto, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso - patricio.winckler@uv.cl

² Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha - manuel.contreras@upla.cl

³ Profesor Auxiliar, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso - jose.beya@uv.cl

⁴ Profesor Auxiliar, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso - mauricio.molina@uv.cl

1. INTRODUCCIÓN

El temporal del pasado 8 de agosto de 2015 se caracterizó por la ocurrencia conjunta de varios efectos meteoceanográficos que causaron la destrucción de infraestructura costera y edificaciones en varias localidades del litoral central de Chile. El oleaje, cuya altura significativa registrada por una boya del SHOA costa afuera de la Bahía de Valparaíso fue de 7,2 [m], se sumó a rachas de vientos de hasta 110 [km/h] provenientes del noroeste y una baja presión atmosférica asociada al sistema frontal. La marea de origen astronómico, aun cuando no extrema, hizo su contribución para peraltar el nivel del mar sobre el cual cabalgaron las olas. La combinación de estas variables, sumada a la exposición de la bahía de Valparaíso al cuarto cuadrante, causó daños en caletas y en el borde costero cuya reparación tendrá un costo superior a los \$ 5.000 millones, según una estimación preliminar de la Dirección de Obras Portuarias (El Mercurio de Valparaíso, 12/08/2015). Esta cifra no incluye los daños a infraestructura privada ni aquellos ocurridos en el recinto portuario. En este documento se describen los daños observados en los lugares más afectados de la bahía de Valparaíso y se realiza un análisis de las variables físicas (presión atmosférica, viento, oleaje y marea) que permite explicar el nivel de daño.

2. DESCRIPCIÓN DE DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA COSTERA

A continuación se presenta una descripción de los daños en la infraestructura costera, construida a partir de inspecciones y mediciones in situ de las instalaciones efectuadas por estos autores (ver también Molina et al., 2015), y complementada por archivos de prensa.

Sector Paseo Wheelwright, Valparaíso.

La Figura 1 ilustra los efectos del temporal en el tramo de costa que abarca desde el Muelle Barón hasta la Caleta Portales, en una longitud de 1.700 [m] aproximadamente. El paseo Wheelwright, construido entre los años 2005-2008 con una inversión de más \$2.000 millones, perdió prácticamente todo el *deck* de madera (Figura 1b) y sufrió daños en sombreaderos, escaños, luminarias. Las pérdidas ascienden a \$420 millones, según la evaluación de la DOP. La playa ubicada al pie del paseo, en el tramo Yolanda, experimentó un descenso de 2,8 a 4,5 [m], un retroceso de 18 a 22 [m] y la remoción del orden de 35.000 [m³] de la zona expuesta de la playa, según se depende de mediciones in situ (Molina et al., 2015) y de la comparación de la playa antes y después del temporal (Figura 1c y Figura 1d).

Sector Caleta Portales, Valparaíso.

En Caleta Portales hubo daños en el muelle nuevo, inaugurado en 2005, y en la edificación principal que acoge boxes, puestos de venta al público y locales de gastronomía. El daño en el muelle se debe a las cargas de impacto verticales y horizontales debidas al oleaje actuando sobre la losa (Figura 2b). Como consecuencia, cinco losas fueron removidas y dos completamente dañadas en la unión perimetral con las vigas (Figura 2c y Figura 2d). Se observaron arriostramientos y vigas transversales deflectadas. La reparación de la losa y de la grúa hidráulica ascendería a \$1.000 millones (Mercurio de Valparaíso, 22/08/2015).

Sector entre Caleta Portales y Curva de los Mayos, Viña del Mar.

Debido a la nula protección al oleaje proveniente del cuarto cuadrante (ver Figura 8), las obras de defensa costera y las edificaciones ubicadas en el sector de la Curva de los Mayos fueron las más afectadas por el temporal. El sobrepaso generó el arrastre de más de 2.000 [m³] de escombros en la vía férrea del Merval (Mercurio de Valparaíso, 14/08/2015), alcanzando incluso la Avenida España, donde la barrera central fue desplazada del eje central de la calzada (Figura 3b). El oleaje causó la falla de la defensa costera que da soporte al Paseo Juan de Saavedra, constituida por una coraza de tetrápodos, un filtro de roca y material de relleno. Luego del temporal se observa la socavación generalizada de la defensa (Figura 3c), causada por el desplazamiento de los tetrápodos y la pérdida del material de relleno.

Las instalaciones del Centro de ex-Cadetes y Oficiales de la Armada, “El Caleuche”, fueron completamente destruidas (Figura 3d), con pérdidas estimadas del orden de \$ 600 millones, de acuerdo al Brigadier Mayor Hugo Winckler (comunicación personal, 09/08/2015). El daño se debió a dos causas: i) la socavación de la subestructura sobre la cual se ubican los edificios y ii) el sobrepaso de agua por sobre el roquerio donde se encuentra el Faro. La casa de yates de la Escuela Naval, colindante al Caleuche experimentó daños menores debido a la mayor distancia a la zona de impacto.

Las sedes de la Hermandad de la Costa y del Círculo de Submarinistas, emplazadas sobre terrenos ganados al mar, resultaron completamente destruidas. La recuperación de la primera edificación alcanzaría \$100 millones según Héctor Andrade, Capitán de la *Nao* (Mercurio de Valparaíso, 22/08/2015), valor que no considera una posible restitución de la defensa costera que albergaba ambas instalaciones. La defensa, de 260 [m] de longitud, estaba constituida por un muro gravitacional de sección trapezoidal y una protección de tetrápodos al pie (Figura 4b y Figura 4c), que ya presentaba efectos de socavación en ciertos tramos antes de este temporal. Aparentemente, el muro, los tetrápodos y otros elementos voluminosos hallados en el terreno no se concibieron como una sola obra, sino que devienen de una serie de actuaciones progresivas en el tiempo, que no garantizaba un adecuado desempeño.

En el Club de Yates de Recreo, una embarcación se hundió, la piscina fue completamente destruida y el *club house* experimentó daño parcial, alcanzando pérdidas del orden de US\$ 3 millones según el comodoro Doménico Schiappacasse (comunicación personal, 16/08/2015). El material de relleno de las explanadas y algunos elementos de protección de hasta 10 [ton] que sustentaban a la Hermandad de la Costa y del Círculo de Submarinistas fueron desplazados del orden de 300 [m] hacia el Este, alcanzando incluso el rompeolas del club. El material más fino arrastrado por las corrientes litorales ingresó a la dársena, reduciendo sustancialmente su calado. El núcleo del rompeolas resultó colmatado, disminuyendo así su porosidad y por ende su eficiencia a disipar la energía. En el talud expuesto al oleaje se formó una playa (Figura 4d), en tanto que bloques del orden de 40 [ton] ubicados en el cabezo fueron expulsados a la entrada de la dársena (Figura 4e).

Figura 1. Sector Paseo Wheelwright, Valparaíso.

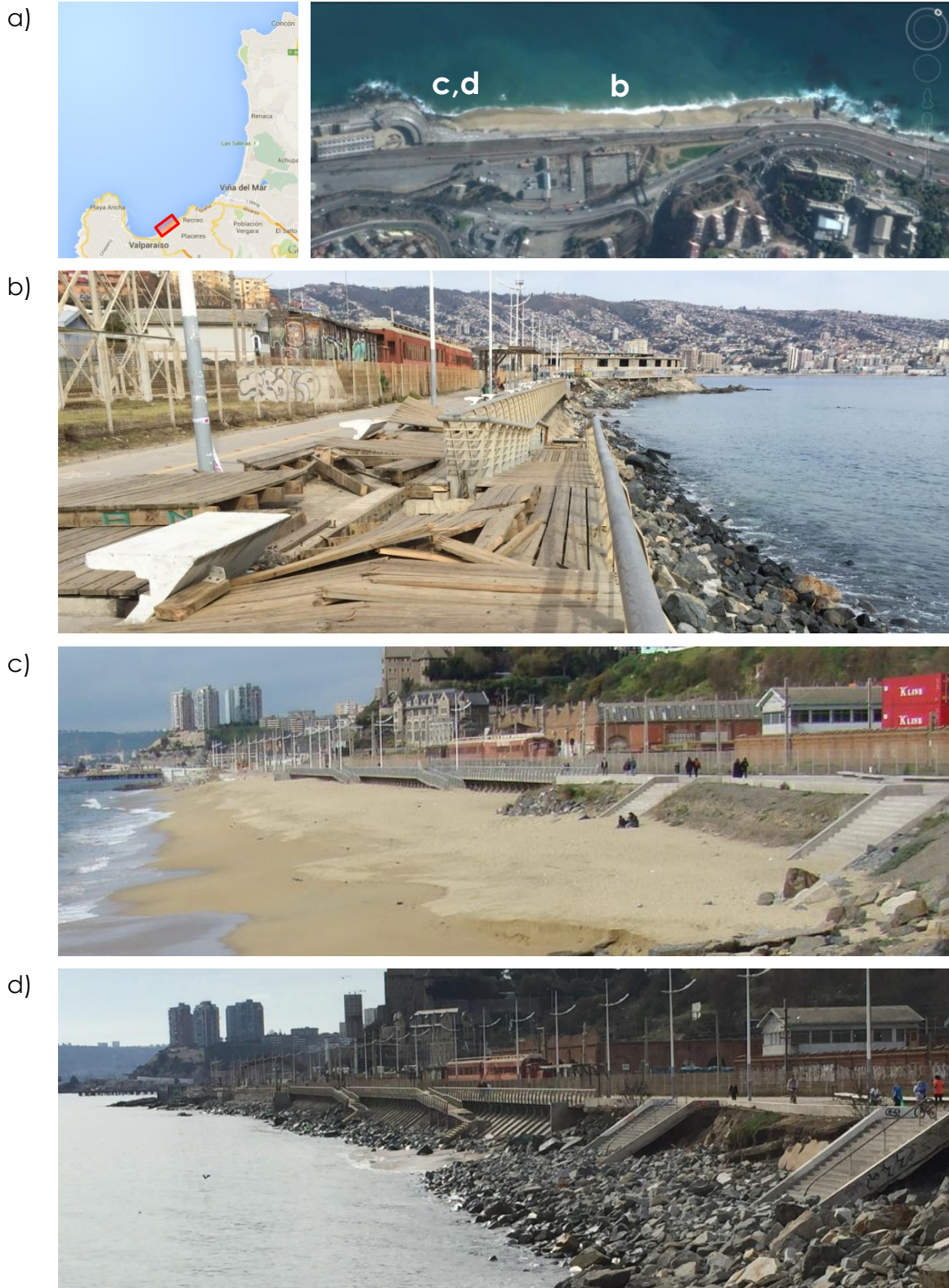


Figura 2. Sector Caleta Portales, Valparaíso.

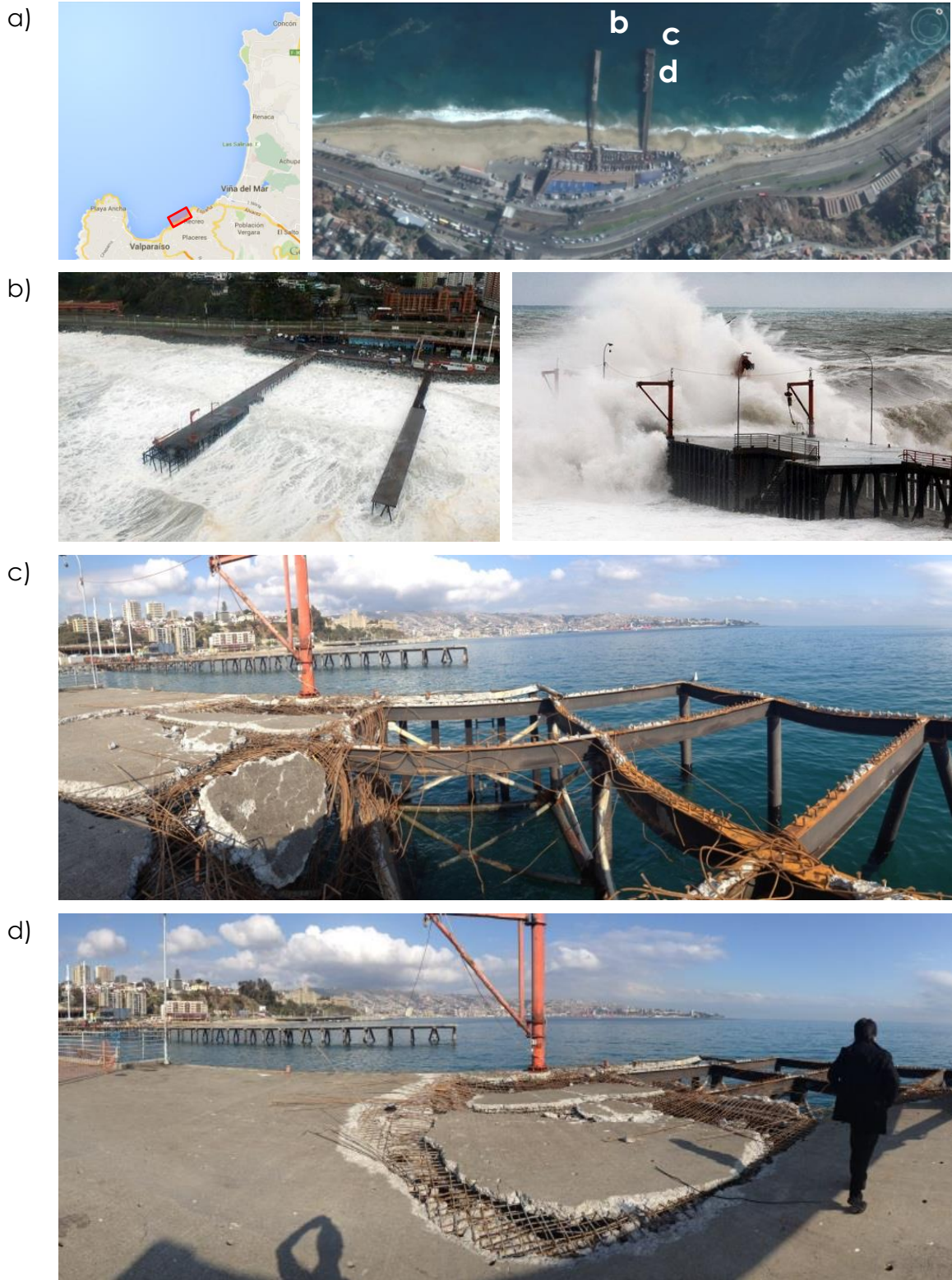


Figura 3. Sector entre Caleta Portales y Curva de los Mayos, Viña del Mar.

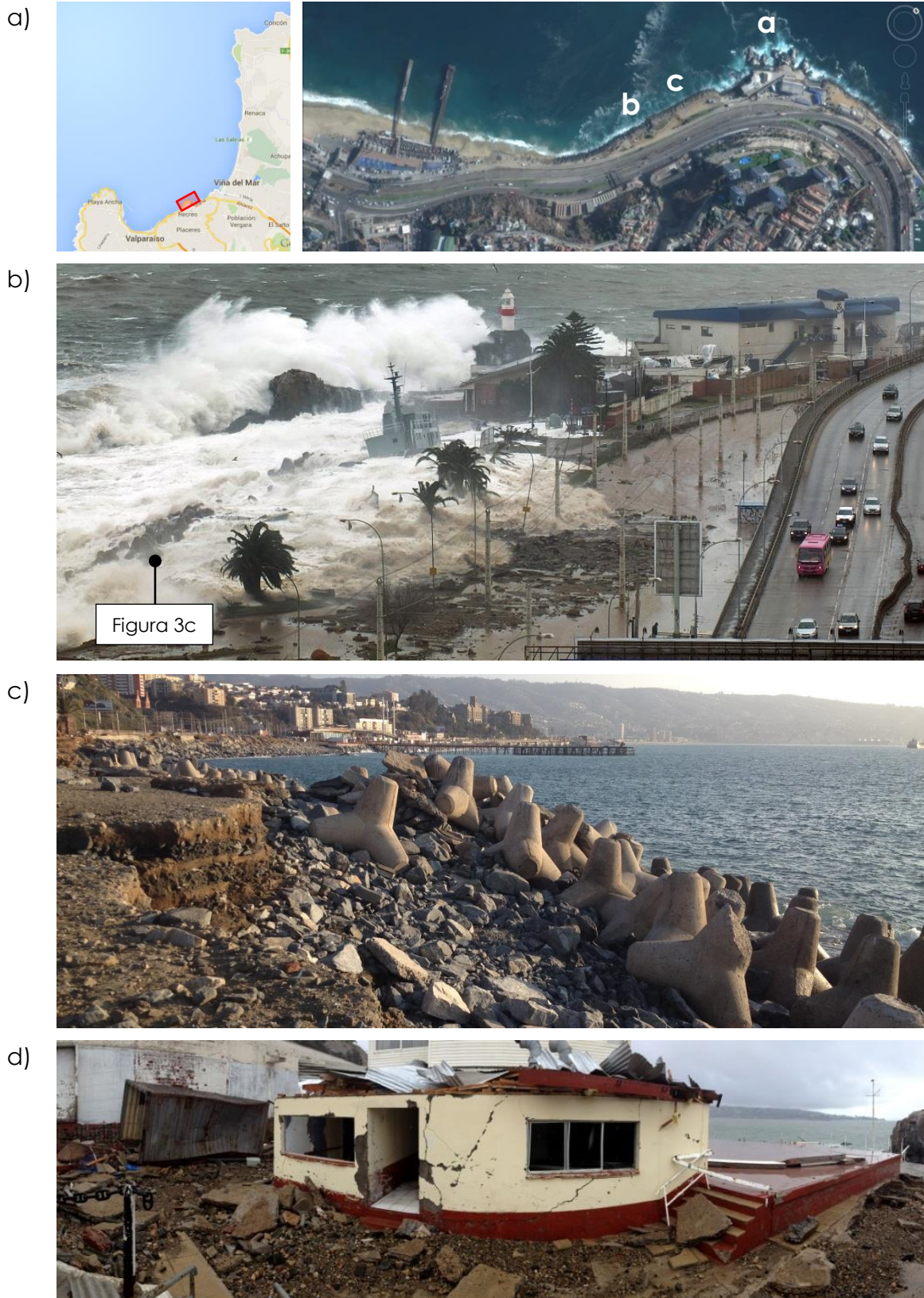


Figura 4. Sector de la Curva de los Mayos, Viña del Mar.



3. ANÁLISIS DE VARIABLES METEOCEANOGRÁFICAS

La Figura 5 presenta una descripción de las variables a considerar en un proyecto de obras marítimas. Las variables se pueden analizar en forma determinística, probabilística o como combinación de ambas, dependiendo del tipo de estadística disponible. A objeto de establecer los efectos que el temporal del 08/08/2015 tuvo sobre las obras costeras, se analiza solamente el oleaje y las diferentes variables que contribuyen al nivel del mar.

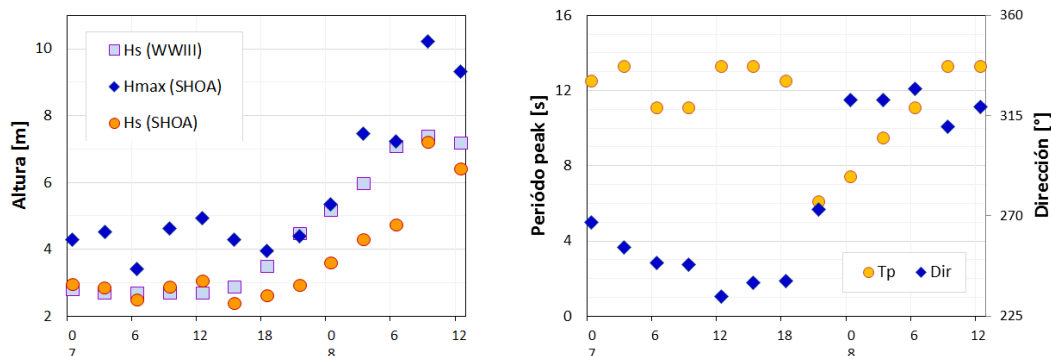
Figura 5. Condicionantes en un proyecto de obras marítimas.



Oleaje durante el temporal del 08/08/2015

La Figura 6 muestra la serie horaria obtenida por la boya Watchkeeper ubicada a la cuadra de Valparaíso. Se observa que el estado de mar crítico registrado a las 09:25 hora local se caracteriza por una altura de $H_s = 7,23$ [m], un período de $T_p = 13,3$ [s] y una dirección 310° . La altura máxima registrada alcanzó $H_{max} = 10,23$ [m]. En la Figura 7 se observa que la altura de este estado de mar es bastante mayor que otros eventos del cuarto cuadrante, estimados mediante diferentes bases de datos. Entre estas se cuentan las bases de datos de libre disposición que provienen de los modelos numéricos ERA Interim (Dee et al. 2011), NOAA WWIII (Tolman, 2014), NOAA CFSR (Saha et al. 2010), IFREMER (Ardhuin, 2013) y Explorador de Energías Marinas (U. Chile, 2013). Además se utilizó información de oleaje de proyectos de obras marítimas realizados por la DOP y la base de datos Fugro-Oceanor obtenida del proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”. Cabe destacar que las bases de datos de la DOP y Fugro-Oceanor son utilizadas ampliamente en diseño de obras marítimas en Chile.

Figura 6. Altura Hs, período Tp y dirección del oleaje en aguas profundas frente a Valparaíso, obtenidos de la boya Watchkeeper del SHOA a la cuadra de Valparaíso. Se incluye también el hindcasting de Wavewatch III, obtenido de windguru.com.



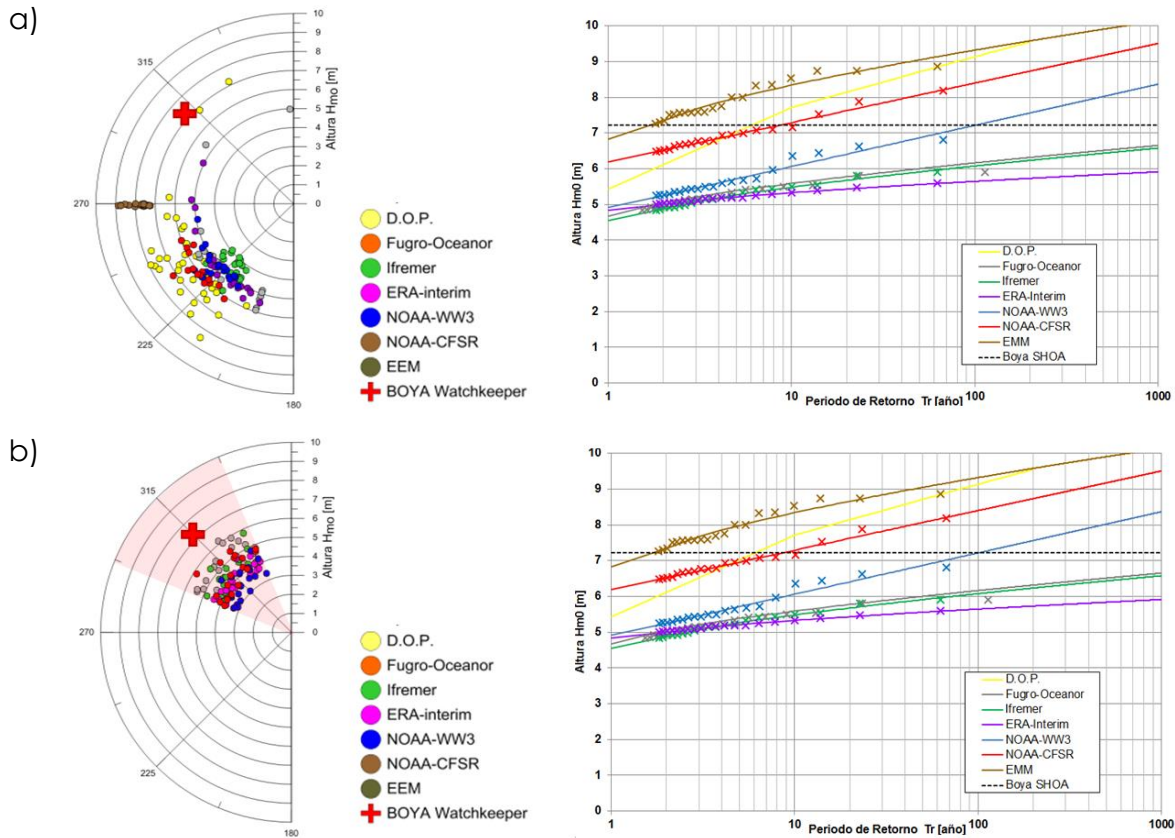
Se efectuó un análisis de valores extremos mediante el método de máximos sobre el umbral (Goda, 1988), cuyo umbral se definió para seleccionar un máximo de 20 eventos por sitio, con una independencia de por lo menos 4 días de diferencia entre ellos. Luego, se probaron distribuciones de probabilidad para valores extremos (Weibull, Gumbel, Frechet y Log-Normal) y se escogió la de mejor ajuste. La Tabla 1 muestra información de los ajustes, además del análisis de la DOP que se basa en el método de los máximos anuales.

Tabla 1. Información sobre bases de datos y método de análisis de valores extremos.

Base de datos	Inicio	Término	Distribución	Coefficiente	R ²	Umbral
FUGRO	1989-09-09	1991-05-31'	Weibull	k = 1.0	0,99	5,75 [m]
ERA-I	1979-01-01'	2014-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,99	4,99 [m]
IFREMER	1990-01-01'	2014-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,98	4,81 [m]
NOAA CFSR	1979-01-01'	2010-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,94	5,48 [m]
NOAA WWIII	1997-01-01'	2010-12-31'	Weibull	k = 1.0	0,93	4,83 [m]
EEM	1979-01-01'	2010-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,94	7,24 [m]
DOP	1980	2013	-	-	-	Máx. anual

La Figura 7 muestra las curvas de período de retorno v/s altura significativa para un análisis adireccional (esto es, sin discriminar por dirección) y para marejadas provenientes de direcciones del NO (297,5°-337,5°). Se observa una gran diferencia entre las distintas bases de datos tanto para el análisis adireccional como para el que incluye tormentas del NO. Por ejemplo, el análisis adireccional de la base de datos DOP indica que la marejada tiene una recurrencia promedio cercana a los 6 años, lo que difiere de otras bases de datos que indican períodos de retorno superiores a los 100 años. Para las tormentas del NO, la marejada tiene una recurrencia aún mayor, alcanzando cifras sobre los 1000 años para la mayoría de las bases de datos. La diferencia en los valores extremos se explica en el origen de los campos de vientos y en los parámetros de ajuste de cada modelo.

Figura 7. Curvas de altura significativa de aguas profundas y período de retorno a la cuadra de Valparaíso a) para el análisis adireccional y b) para eventos entre las direcciones 297,5° y 337,5°. Se incluye el estado de mar de $H_s = 7,23$ [m], $T_p = 13,3$ [s] y dirección 310°.

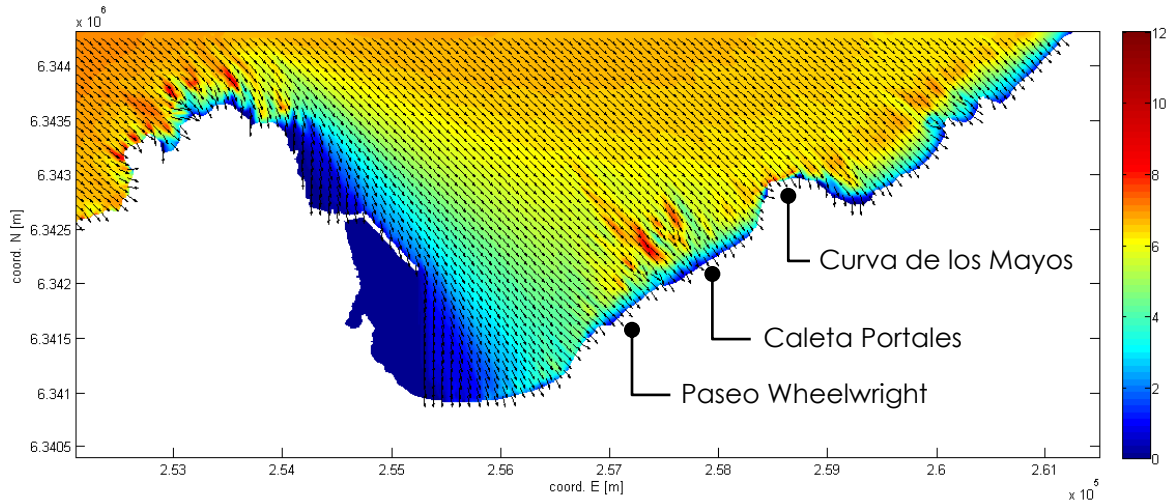


Una fuente de incertidumbre importante en estos resultados se asocia a la falta de mediciones de oleaje de largo plazo, que imposibilita validar los modelos numéricos durante eventos extremos (que son justamente los importantes en el diseño). La precisión de los modelos para eventos extremos es aparentemente menor que la asociada a eventos de clima medio, debido a que la validación se realiza con altimetría satelital cuya disponibilidad -tanto espacial como temporal- no necesariamente coincide con la ocurrencia de las tormentas. Por otra parte, las bases de datos no abarcan eventos ocurridos antes de 1979 (como el evento extremo del 10 de agosto de 1965) lo que, dada la baja recurrencia de estos eventos, limita la estimación del período de retorno. En resumen, la comparación de los parámetros del oleaje en aguas profundas ilustra i) la gran magnitud del evento registrado, ii) la gran incertidumbre al evaluar el período de retorno y iii) la debilidad del análisis de valores extremos, empleado para el cálculo del clima de oleaje extremo.

Para establecer las características de oleaje en la costa, se efectuó una propagación del estado de mar extremo mediante el modelo SWAN (Booij, et al, 1999; Ris et al., 1999). En la Figura 8 se observa un incremento de la altura significativa a $H_s \approx 9$ [m] en la zona más afectada debido a la refracción generada por los fondos bajos. La batimetría baja se explica por los aportes sedimentarios de la quebrada Cabritería, en el sector de Yolanda, y la quebrada que desemboca en Portales, obstruida por asentamientos urbanos en la actualidad.

Cabe mencionar que frente al Paseo Wheelwright y Caleta Portales, el oleaje rompe a considerable distancia de la costa (Figura 2b), promoviendo el peralte del nivel medio del mar, o *wave setup*. En la curva de los Mayos, por el contrario, el oleaje rompe muy cerca de la línea de costa, por lo que los efectos de reflexión y sobrepaso dominan (Figura 3b).

Figura 8. Altura de ola significativa, en [m], en el sector sur de la Bahía de Valparaíso para estado de mar de $H_s = 7,23$ [m], $T_p = 13,3$ [s] y dirección 310° .



Nivel del mar durante el temporal del 08/08/2015

Dada la amplia variedad y complejidad de los fenómenos hidro-meteorológicos que inciden en el nivel de mar, es necesario realizar un diagnóstico que integre todos los agentes involucrados. Una primera aproximación a la definición del nivel del mar puede lograrse mediante la siguiente expresión (Beyá y Winckler, 2013):

$$C = NRS + Z_A + Z_P + Z_V + W_S + O_{IG} + \dots$$

donde C es el nivel del mar correspondiente al instante en que se registraron las olas extremas, NRS es el Nivel de Reducción de Sondas que corresponde al plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en perigeo (SHOA, 1999), Z_A es la marea astronómica, Z_P es al aporte de la variación de presión atmosférica a la marea meteorológica por, Z_V la contribución del viento a la marea meteorológica, W_S es el set-up de oleaje y O_{IG} la contribución de las ondas infragravitatorias. La suma de Z_P y Z_V se denomina la marea meteorológica, o residuo meteorológico. Entre los otros efectos deben incluirse causas de tipo excepcional como solevantamientos y subsidencia costera, efectos de efluentes, resonancia en dársenas, variaciones en el largo plazo y efectos de reflexión en el borde costero. Dado que Z_A tiene naturaleza determinística y las variables restantes son aleatorias, la determinación de C es un problema en que no existe un límite determinista al que llega el nivel del mar durante el peor temporal, sino que cada nivel tendrá una probabilidad de ser sobrepasado en un temporal determinado (GIOG, 2001). Para el temporal del 08/08/2015, no obstante, existen estadísticas que permiten estimar los valores de cada una de estas variables.

La Figura 9a muestra el registro horario del mareógrafo del puerto de Valparaíso, que considera la contribución astronómica, el residuo meteorológico y otras anomalías (errores de medición, que se asumen menores en este caso). Mediante un análisis armónico, se extrajo la componente astronómica, obteniendo un residuo meteorológico significativo entre la tarde del viernes 7 y gran parte del sábado 8 de agosto, con un máximo del orden de $Z_p + Z_v \approx 30$ [cm]. Se debe tener en cuenta que el mareógrafo del puerto de Valparaíso registró cada 1 minuto, exhibiendo anomalías del orden de los 80 [cm] sobre la marea astronómica (no incluidas en la figura) que fueron filtradas para efectos de este análisis. El estudio de pulsaciones de alta frecuencia, del orden de minutos, es materia de análisis futuros.

La Figura 9b muestra el registro horario de presión atmosférica en 3 estaciones costeras ubicadas en El Yali, Santo Domingo y Ventanas, junto al residuo meteorológico. El efecto del barómetro invertido¹, asociado al descenso de cerca de 30 [ha], permite explicar el aumento de casi 30 [cm] en el nivel del mar, pero no las pulsaciones del orden de minutos encontradas en el registro original. La Figura 9c reproduce los registros de la rapidez del viento a 10 [m] sobre el nivel del mar, registrados en Concón (ENAP) y Quintero (CODELCO-Ventanas). Pese a encontrarse a distancias superiores a 20 [km], ambos registros son coherentes, encontrando ráfagas máximas que superan los 40 [m/s] y un registro horario medio que supera los 14 [m/s]. Se muestra asimismo el oleaje pronosticado mediante el modelo NOAA Wavewatch III² a la cuadra de Valparaíso, que registró un máximo en la madrugada del 08/08/2015, inmediatamente después de la intensificación del viento. Ello evidencia que el oleaje fue de generación local, o *wind sea*.

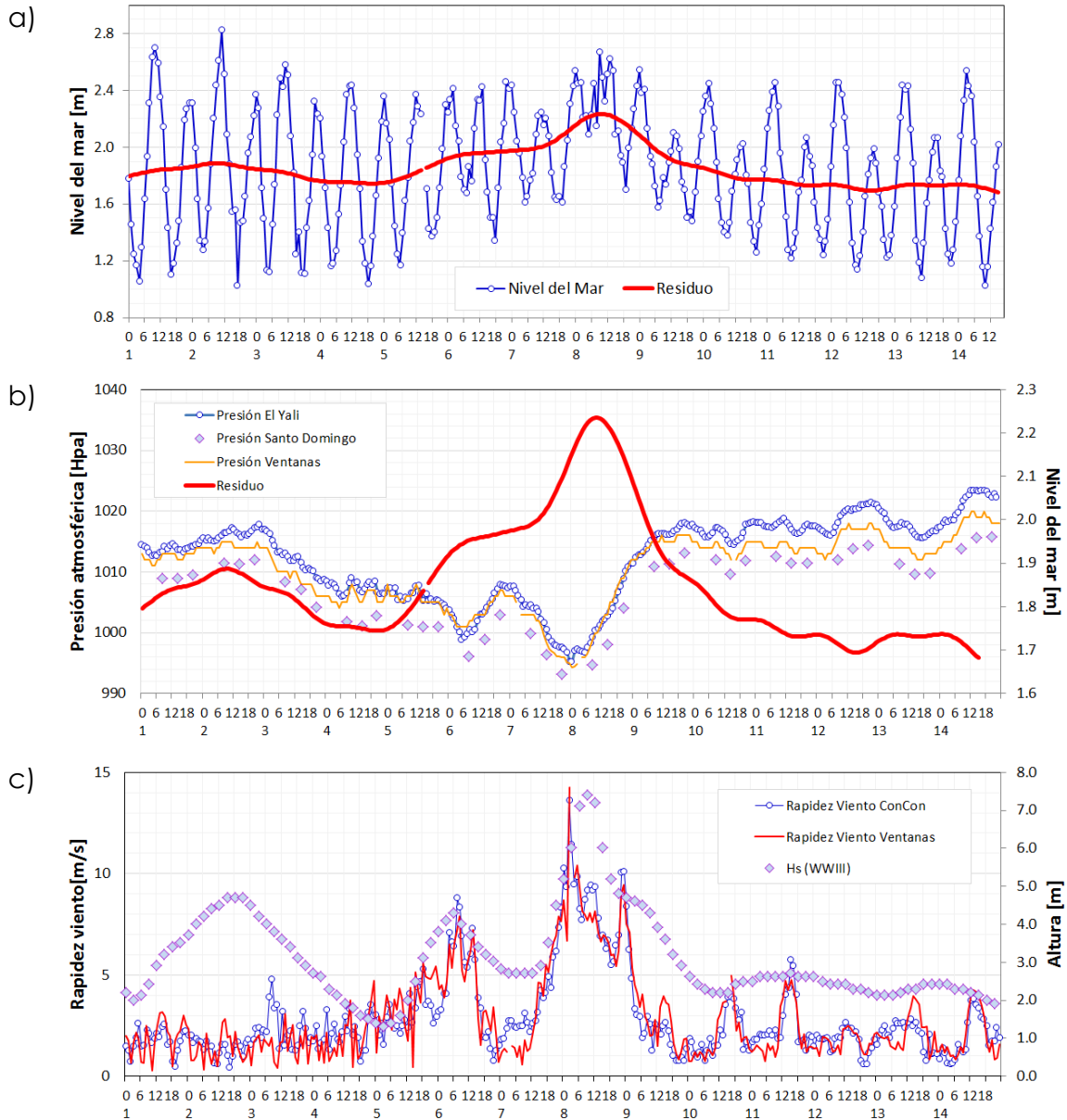
Siguiendo la metodología del USACE (2003), para un estado de mar de altura $H_s = 7,23$ [m], período $T_p = 13,3$ [s] y una pendiente de fondo típica de 1/100, se alcanza un *wave setup* del orden de $W_s \approx 2,0$ [m] en la línea de costa correspondiente al nivel estático³. Las ondas gravitatorias, por su parte, presentan amplitudes de un orden de magnitud inferior a las del oleaje de período corto, por lo que valores del orden de $W_s \approx 0,5$ [m] son esperables para el evento. Con estos cálculos, el aumento del nivel del mar por sobre la marea astronómica habría sido del orden de $Z_p + Z_v + W_s + O_{IG} = 2,5 - 3,0$ [m], sin considerar el efecto de reflexión en las obras y roqueríos costeros. A partir del análisis se concluye que las condiciones extrema ocurridas durante el 08/08/2015 corresponden a una combinación de bajas presiones atmosféricas y fuertes vientos locales provenientes de cuarto cuadrante que incidieron en i) un peralte significativo del nivel medio del mar y ii) un oleaje local de gran altura y largo periodo. Los efectos locales generados por la refracción, además del *wave setup* en playas expuestas como Portales y de reflexión en sectores con bordes accidentados como la curva de los Mayos explican, en parte el nivel de daño observado.

¹ El efecto del barómetro invertido corresponde a una aproximación estática del balance de momentum, que dice que cuando la presión aumenta en 1 [hPa], el nivel del mar disminuye en 1 [cm] y viceversa.

² Obtenido de windguru.com. Para detalles ver www.windguru.cz/es/help_index.php?sec=intro.

³ Este cálculo es preliminar pues no considera los efectos de deformación del oleaje (refracción, reflexión y difracción) presentes en la zona más afectada por el temporal. No se calcula el *wave setup* máximo pues las playas tienen obras costeras que imposibilitan que se desarrolle el máximo runup.

Figura 9. Variables meteoceanográficas para el temporal del 08/08/2015. a) Registro del nivel del mar y residuo meteorológico en Valparaíso (la fecha se lee en el panel c). b) Presión atmosférica en El Yali, Santo Domingo y Ventanas, y residuo meteorológico en Valparaíso. c) Rapidez del viento en Concón y Ventanas y altura significativa en aguas profundas frente a Valparaíso.



4. COMENTARIOS FINALES

Eventos recientes como el tsunami del 27/02/2010 y el reciente temporal del 08/08/2015 han dejado en evidencia la vulnerabilidad de los emplazamientos costeros, que crece a medida que se construye en terrenos bajos sin atender a la naturaleza de uno de los entornos más dinámicos de la tierra. Para garantizar un uso sustentable del territorio costero, tanto la definición de las zonas potenciales de inundación como el diseño de las obras costeras

deben considerar cómo han sido y cómo serán estas variables oceanográficas en el futuro, e incorporarlas de manera íntegra en la definición de soluciones. Este requerimiento sólo será posible en la medida que i) haya mejoras en el acceso a información de calidad y con cobertura espacial y temporal adecuada para caracterizar las variables oceanográficas, ii) se validen los escasos modelos de predicción de oleaje disponibles para lugares puntuales en nuestras costas, iii) se desarrollen modelos de predicción de marea meteorológica y iv) se conforme una masa crítica de profesionales, aun inexistente en Chile, con una formación especializada en el ámbito de la ingeniería marítima.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al programa Fondef-IDeA de CONICYT por el financiamiento entregado mediante el proyecto IT13I20006 "Un Atlas de Oleaje para Chile" y al equipo del proyecto conformado por Ariel Gallardo, Héctor Hidalgo, Javier Valdivia y Marco Álvarez por la recopilación y proceso de datos de oleaje. Al SHOA por proveer el registro de la boya Watchkeeper y a la DOP por proveer de información de análisis extremo. Al Proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 por la adquisición de la base de datos Fugro-Oceanor. La Figura 2b fue obtenida de theclinic.cl y la figura 3b de publimetro.cl y aqua.cl.

REFERENCIAS

- Ardhuin, F., J. Hanafin, Y. Quilfen, B. Chapron, P. Queffelec, M. Obrebski, y otros. (2011). Calibration of the "IOWAGA" global Wave Hindcast (1991-2011) Using ECMWF and CFSR Winds.
- Beyá, J. y Winckler, P. (2013). Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis. Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. Volumen 125, Número 2, pp. 63-81. (Incluido en Revista Chilena de Ingeniería N°469).
- Booij, N.; Ris, R. and Holthuijsen, L. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C4, 7649–7666.
- Dee D., S. Uppala, A. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, y otros. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.
- G.I.O.C. (2001) Documento temático. Atlas de inundación en el litoral peninsular español. Universidad de Cantabria. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Goda, Y. (1988). On the Methodology of Selecting Design Wave Heights. Chapter 67 (p. 899 - 913)
- Molina, M.; Campos, R.; Manosalva, D.; Becerra, D.; Gálvez, B.; Frías, G. y Winckler, P. (2015). Efectos de la marejada del 8 de agosto de 2015 en las playas de la bahía de Valparaíso. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, 21 - 22 - 23 de Octubre de 2015.
- Ris, R.; Holthuijsen, L. and Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Verification. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C4, 7667–7681.
- S.H.O.A. (1992). Glosario de marea y corrientes. Segunda Edición. Pub. 3013.
- S.H.O.A. (2005). Instrucciones oceanográficas N°1, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Tercera Edición.
- Tolman, H. L. (2014). User Manual and System Documentation of WaveWatch III, version 4.18. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch.
- Universidad de Chile (2013). Base de datos Explorador de Energías Marinas <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/>.
- U.S.A.C.E. (2003). Coastal Engineering Manual. Part II, Chapter 4: Surf Zone Hydrodynamics. Department of the Army (EM 1110-2-1110). Estados Unidos.