



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Estudio de la influencia del incremento del nivel del mar debido al cambio climático en las obras de abrigo y atraque de los puertos de Los Ángeles y Long Beach, California (EE. UU.)

Presentado por

De los Santos Bera, Geraldo Eduardo

Para la obtención del

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

Curso: 2018/2019

Fecha: Julio 2019

Tutora: M. Esther Gómez Martín





Imagen cortesía del Puerto de Los Ángeles (POLA, 2019)





MEMORIA

Excelsior

AGRADECIMIENTOS

El presente Trabajo de Fin de Máster representa la esperada conclusión de una etapa más de mi vida académica, por lo que, en las siguientes líneas, deseo expresar mi gratitud hacia aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron en la materialización de este.

A Marlene, mi apoyo incondicional, por sus oportunos consejos. Gracias por ser mi luz, mi norte y mi roca.

A mi madre, por siempre brindarme su cariño a pesar de la distancia. Gracias por ser única e inigualable y por la vida que me has dado.

A mi padre, por servir de maestro con su singular forma de enseñar. Gracias por siempre apoyarme y estar presente en cada paso que doy en mi vida.

A mis abuelos, tíos, suegros, hermanos, primos, sobrino y demás familiares, por alentarme y brindar su cariño a lo largo de todo este trayecto.

A quienes tengo el honor de llamar mis amigos, por siempre darme ánimo, ser fuente de alegría y respaldarme en todo momento.

A Hsuan Ming y a Yalina, por su auténtico interés en que este esfuerzo concluya exitosamente.

A Jorge, por siempre tener la puerta de su despacho abierta para responder a cualquiera de mis dudas.

Finalmente, a Esther, mi tutora y guía, por sus consejos, señalamientos y tiempo invertido en sus consultas. Gracias por acompañarme durante el desarrollo de este trabajo y por tu paciencia cuando no tenía idea de por dónde empezar.

RESUMEN

El cambio climático ha pasado de ser una suposición para convertirse en el principal desafío del siglo XXI. Dicho fenómeno traerá consigo importantes interrupciones en los sistemas humanos y naturales, una de estas es el incremento del nivel del mar. La presente investigación pretende estudiar la influencia de esta elevación en las obras de abrigo y atraque de los puertos de Los Ángeles y Long Beach, California (EE. UU.). En esta se elaboraron cuatro escenarios de evaluación y haciendo uso de software SIG se delimitó la superficie en riesgo de inundación permanente y temporal, obteniendo posteriormente la variación en el francobordo de seguridad de las obras de atraque que sirven a las terminales de contenedores de ambos puertos. Por último, se estimaron los rebases en las obras de abrigo del ámbito de estudio mediante fórmulas matemáticas.

Los resultados destacan dos zonas críticas susceptibles de ser inundadas. Además, para el escenario más pesimista, uno de los muelles analizados no cumple con el francobordo mínimo requerido por las normas de diseño locales. Para finalizar, se obtuvieron niveles de rebases en las obras de abrigo asociados a períodos de retorno de 50 años que en la actualidad serían 100 años.

Palabras clave: Cambio climático; Incremento del nivel del mar; Sistemas de Información Geográfica; Muelles; Diques en talud.

RESUM

El canvi climàtic ha passat de ser una suposició per a convertir-se en el principal desafiament del segle XXI. Aquest fenomen portarà amb si importants disrupcions en els sistemes humans i naturals, una d'aquestes és l'increment del nivell del mar. La present investigació pretén estudiar la influència d'aquesta elevació en les obres d'abric i atraque dels ports de Los Angeles i Long Beach, Califòrnia (EE. UU.). En aquesta es van elaborar quatre escenaris d'avaluació i fent ús de programari SIG es va delimitar la superfície en risc d'inundació permanent i temporal, obtenint posteriorment la variació en el francbord de seguretat de les obres d'atraque que serveixen a les terminals de contenidors de tots dos ports. Finalment, es van estimar els depasses en les obres d'abric de l'àmbit d'estudi mitjançant fórmules matemàtiques.

Els resultats destaquen dues zones crítiques susceptibles de ser inundades. A més, per a l'escenari més pessimista, un dels molls analitzats no compleix amb el francbord mínim requerit per les normes de disseny locals. Per a finalitzar, es van obtenir nivells de depasses en les obres d'abric associats a períodes de retorn de 50 anys que en l'actualitat serien 100 anys.

Paraules clau: Canvi climàtic; Increment del nivell del mar; Sistemes d'Informació Geogràfica; Molls; Dics en talús.

ABSTRACT

Climate change has gone from being a supposition to become the main challenge of the 21st century. This phenomenon will bring important disruptions to human and natural systems alike, one of these being sea level rise. This research aims to study the influence of this rise on the breakwaters and quays of the ports of Los Angeles and Long Beach, California (USA). In it, four evaluation scenarios were developed and using GIS software the surface at risk of permanent and temporary flooding was delimited, subsequently obtaining the variation in the safety freeboard of the quays that serve the container terminals of both ports. Finally, overtopping on the breakwaters of the field of study was estimated by mathematical formulas.

The results highlight two critical zones susceptible of being flooded. In addition, for the worst-case scenario, one of the quays analyzed does not meet the minimum freeboard required by local design standards. Finally, overtopping levels obtained on breakwaters were associated to return periods of 50 years that would currently be 100 years.

Keywords: Climate change; Sea level rise; Geographic Information Systems; Quays; Rubble mound breakwaters.

ÍNDICE

Lista de contenidos

Lista de figuras	4
Lista de tablas	14
I. Introducción	17
I.1 Motivación de la investigación	17
I.2 Ámbito del estudio.....	19
I.2.1 Historia del Puerto de Los Ángeles	20
I.2.2 Historia del Puerto de Long Beach.....	21
I.2.3 Aspectos físicos y operativos de los puertos	22
II. Estado del arte	31
II.1 Antecedentes	31
II.2 El oleaje	40
II.2.1 Clasificación de las ondas del mar	41
II.2.2 Remonte.....	44
II.2.3 Rebase.....	44
II.3 Obras marítimas.....	45
II.3.1 Obras exteriores.....	45
II.3.2 Obras costeras	46
II.3.3 Obras interiores	46
II.4 Diques en talud	47
II.5 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	48
II.6 Cambio climático global.....	49
II.6.1 El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)	49
II.7 Cambio climático en Estados Unidos de América (EE. UU.)	57
II.7.1 4.ª Evaluación Nacional del Clima (2017-2018).....	58
II.7.2 Cambio Climático en California (2018)	62

II.8 Cambios en el nivel del mar	66
II.8.1 Incremento del nivel medio global del mar	67
II.8.2 Incremento del nivel relativo del mar	69
II.8.3 Efectos en niveles extremos	72
II.8.4 Efectos en oleajes	75
II.8.5 Efectos en obras costeras	76
III. Materiales y métodos	81
III.1 Datos geoespaciales.....	81
III.1.1 Ortofotos.....	81
III.1.2 Topografía	82
III.1.3 Batimetría	83
III.1.4 Vectores	83
III.2 Incremento del nivel del mar en el ámbito de estudio	83
III.3 Estudio del clima marítimo	88
III.3.1 Régimen extremal.....	93
III.3.2 Niveles de referencia	98
III.4 Modelado mediante SIG	98
III.4.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación	102
III.4.2 Variación del francobordo de seguridad en obras de atraque de terminales de contenedores	102
III.5 Estimación de los rebases en diques	104
IV. Resultados	108
IV.1 Escenario 0 (PMVE SLR = 0 m SS = 0 – 0,73 m).....	108
IV.1.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación.....	108
IV.1.2 Variación del francobordo de seguridad	109
IV.1.3 Estimación de rebases en diques	114
IV.2 Escenario 1 (PMVE SLR = 0,23 m SS = 0 – 0,73 m).....	116
IV.2.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación.....	116
IV.2.2 Variación del francobordo de seguridad	117
IV.2.3 Estimación de rebases en diques	123
IV.3 Escenario 2 (PMVE SLR = 0,49 m SS = 0 – 0,73 m).....	125

IV.3.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación.....	125
IV.3.2 Variación del francobordo de seguridad	126
IV.3.3 Estimación de rebases en diques	132
IV.4 Escenario 3 (PMVE SLR = 0,36 m SS = 0 – 0,73 m).....	134
IV.4.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación.....	134
IV.4.2 Variación del francobordo de seguridad	135
IV.4.3 Estimación de rebases en diques	141
IV.5 Escenario 4 (PMVE SLR = 1,07 m SS = 0 – 0,73 m).....	143
IV.5.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación.....	143
IV.5.2 Variación del francobordo de seguridad	144
IV.5.3 Estimación de rebases en diques	150
IV.6 Análisis de resultados	152
IV.6.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación.....	152
IV.6.2 Variación del francobordo de seguridad	158
IV.6.3 Estimación de rebases en diques	163
V. Conclusiones	169
V.5.1 Futuras líneas de investigación.....	170
VI. Referencias	173

Lista de figuras

Figura 1 - Ubicación del ámbito de estudio (Plano I.1 en la sección de Anejos).....	19
Figura 2 - Localización del ámbito de estudio (Plano I.2 en la sección de Anejos)	19
Figura 3 - Ranking de los 10 puertos de mayor tráfico de contenedores a nivel mundial para el año 2018 (Plano I.3 en la sección de Anejos), elaboración propia con datos de (BPA, 2018; Hong Kong Census and Statistics Department, 2018; POLA, 2018; POLB, 2018; PON, 2018; Singapore PSA, 2018; SIPG, 2018)	23
Figura 4 - Arriba, planta general del ámbito de estudio (Plano I.4 en la sección de Anejos). Abajo, las terminales de contenedores de ambos puertos (Plano I.5 en la sección de Anejos)	25
Figura 5 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos (Plano I.6 en la sección de Anejos)	26
Figura 6 - Dique de Rockland, Maine, EE. UU.	26
Figura 7 - A la izquierda, vista aérea del Dique de San Pedro y a la derecha, vista de su superestructura del lado puerto (POLA, 2019; USC - Digital Library, 1900).....	27
Figura 8 - Sección tipo del Dique de San Pedro (Plano I.7 en la sección de Anejos).....	27
Figura 9 - A la izquierda vista aérea de los diques Intermedio y de Long Beach y a la derecha, operarios colocan una pieza de escollera en el manto principal del Dique Intermedio (USACE - Los Angeles District, 2014).....	28
Figura 10 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach (Plano I.8 en la sección de Anejos)	28
Figura 11 - Clasificación de ondas de superficie en función de su período característico.....	41
Figura 12 - Representación de la marea meteorológica y sus componentes (NOAA - NHC, 2019)	43
Figura 13 - Propagación de un tsunami hacia la costa (Encyclopædia Britannica, 2019)	44
Figura 14 - Esquemmatización del remonte	44
Figura 15 - Esquemmatización del rebase en un dique en talud (Van der Meer et al., 2018) ...	45
Figura 16 - Esquema de sección tipo de un dique en talud (Grau, 2008)	47
Figura 17 - Estructura de visualización de datos en un SIG, estableciendo una jerarquía desde las capas superiores hasta las inferiores (USGS, 2019)	48
Figura 18 - Estructura de un ráster (Esri, 2019).....	49
Figura 19 - Ráster representando elevaciones, sombras y pendientes para una misma zona	49

Figura 20 - Evolución de las concentraciones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos en la atmósfera desde el siglo XVIII (J. T. Houghton et al., 1990).....50

Figura 21 - Aumento predicho del nivel medio global del mar según el Escenario A. Estimación óptima, y margen de variación (J. T. Houghton et al., 1990).....51

Figura 22 - Cambios observados en la temperatura en superficie y precipitación anual sobre tierra entre 1901-2012 y 1951-2010 respectivamente (Pachauri et al., 2014).....52

Figura 23 - Nivel medio global del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1986 y 2005, y con todos los conjuntos de datos alineados para tener el mismo valor en 1993, primer año de datos de altimetría por satélite (Pachauri et al., 2014)53

Figura 24 - Evaluación de la pérdida total de hielo de los glaciares y capas de hielo en términos de masa (Gt) y su equivalente en términos del nivel del mar (mm) (Pachauri et al., 2014)...54

Figura 25 - Cambio en la temperatura media global en superficie de 2006 a 2100 determinados por simulaciones multimodelos en relación con 1986-2005 (Pachauri et al., 2014)55

Figura 26 - Elevación del nivel medio global del mar de 2006 a 2100 determinado por simulaciones multimodelos en relación con 1986-2005. (Pachauri et al., 2014).....56

Figura 27 - Proyecciones medias del cambio en el nivel medio global del mar para los escenarios RCP2,6 a la derecha y RCP8,5 a la izquierda. Los cambios se muestran en relación con el período 1986-2005 (Pachauri et al., 2014)56

Figura 28 - Cambios proyectados en la temperatura promedio anual para mediados y finales del siglo XXI de acuerdo con dos trayectorias futuras. (Reidmiller et al., 2018).....60

Figura 29 - Mapa de las proyecciones del cambio en el nivel del mar relativo en la costa de Estados Unidos para el 2100 en adición a un incremento del nivel medio global del mar de 1 metro (comparado con el año 2000) (Reidmiller et al., 2018)61

Figura 30 - Principales peligros relacionados con el clima y los recursos del transporte afectados (Wuebbles, Fahey, Hibbard, Deangelo, et al., 2017)61

Figura 31 - Áreas de impacto del cambio climático, dirección del cambio según las proyecciones y la confianza en las mismas (Thorne et al., 2018).....63

Figura 32 - Temperatura máxima promedio anual en la región de Los Ángeles en °F, con registros históricos en negro, históricos modelados en gris y proyecciones futuras en azul para el escenario RCP4,5 y en rojo para el escenario RCP8,5 (A. Hall et al., 2018).....65

Figura 33 - Patrones espaciales de las proyecciones de los cambios modelados en la temperatura máxima promedio anual en °F bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 para tres períodos de tiempo: 2006-2039 (inicios del siglo XXI), 2040-2069 (mediados del siglo XXI) y 2070-2100 (finales del siglo XXI) (A. Hall et al., 2018)65

Figura 34 - Esquema de los factores que inciden en los cambios del nivel medio global del mar67

Figura 35 - Comparación de registros de datos altimétricos del incremento del nivel medio global del mar captados mediante satélites a partir de 1993 (ESA - CMEMS, 2018; NOAA - LSA, 2019b)68

Figura 36 - Resumen de las proyecciones del incremento del nivel medio global del mar para 210069

Figura 37 - Esquematación de los factores que inciden en el cambio del nivel relativo del mar70

Figura 38 - Representación de la variación anual de los cambios en el nivel del mar (arriba) y su cambio total desde 1993 (abajo) (NOAA - LSA, 2019a)..... 71

Figura 39 - Incremento del nivel relativo del mar en el ámbito de estudio, elaboración propia con datos de (NOAA, 2019b) 72

Figura 40 - Elevación total de eventos de inundación extrema con un período de retorno de 50 años, tomado de (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013) con datos de (Menéndez & Woodworth, 2010) 73

Figura 41 - Arriba, experimento de Hunter (2012). Abajo, reproducción del experimento por el IPCC (2013) a partir de proyecciones regionales para el escenario RCP4,5 (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013) 74

Figura 42 - Cambios proyectados en la altura de ola significativa para el período 2075-2100 comparado con 1980-2009 según Hemer et al. (2013) (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013)..... 76

Figura 43 - Esquema del aumento del remonte debido al incremento del nivel del mar (Isobe, 2013)77

Figura 44 - Esquema del aumento del rebase debido al incremento del nivel del mar (Isobe, 2013) 77

Figura 45 - Esquema del incremento de la fuerza del oleaje en un dique debido al incremento del nivel del mar (Isobe, 2013) 78

Figura 46 - Cobertura del catálogo de ortofotos utilizado (USGS, 2016)82

Figura 47 - Topografía del ámbito de estudio (Plano III.1 en la sección de Anejos)82

Figura 48 - Batimetría del ámbito de estudio (Plano III.2 en la sección de Anejos).....83

Figura 49 - Evolución de la concentración de CO₂ en la atmósfera, expresada en partes por millón (ppm) para el período 1980-2018, elaboración propia con datos de (Dlugokencky et al., 2019)84

Figura 50 - Variación anual del incremento de la concentración de CO ₂ en la atmósfera, expresada en partes por millón por año (ppm/año) para el período 1980-2018, elaboración propia con datos de	84
Figura 51 - Trayectorias de concentración representativas de CO ₂ en el tiempo hasta el 2100 según la proyección construida a partir de datos observados y datos de escenarios de referencia de (Meinshausen et al., 2011; Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013).....	86
Figura 52 - Proyecciones de la NOAA y USGCRP de la tasa de incremento del nivel medio global del mar en mm/año hasta el 2100 (Sweet, Horton, et al., 2017).....	86
Figura 53 - Proyecciones de la NOAA y USGCRP del incremento del nivel relativo del mar para el ámbito de estudio en metros sobre la PMVE hasta el 2100 (Sweet, Horton, et al., 2017) .	87
Figura 54 - Ubicación de las boyas y mareógrafo en el ámbito de estudio (Plano III.3 en la sección de Anejos)	89
Figura 55 - Modelo del abrigo del ámbito de estudio debido a la presencia de islas en las direcciones noroeste y suroeste (CDIP-SIO, 2019a)	90
Figura 56 - Profundidad de fondeo de las boyas localizadas en el ámbito de estudio (Plano III.4 en la sección de Anejos).....	91
Figura 57 - Exposición y fuentes generadoras de oleajes en el ámbito de estudio (Plano III.5 en la sección de Anejos).....	91
Figura 58 - Histogramas de altura de ola significativa (H_s) y período pico (T_p) para la boya 215, elaboración propia con datos de (CDIP-SIO, 2019b)	92
Figura 59 - Histogramas de altura de ola significativa (H_s) y dirección pico (D°) para la boya 215, elaboración propia con datos de (CDIP-SIO, 2019b)	92
Figura 60 - Rosa de oleaje para la boya 215, elaboración propia con datos de (CDIP-SIO, 2019b)	93
Figura 61 - Pasos ejecutados para llevar a cabo el análisis extremal de la serie de datos de la boya 215 y la relación H_s - T_p	94
Figura 62 - Períodos y niveles de retorno de H_s en metros para la serie de datos analizada en función de las direcciones características del oleaje en régimen extremal y escalar	95
Figura 63 - Períodos y niveles de retorno de niveles superiores a la PMVE en metros para la serie de datos analizada.....	97
Figura 64 - Datums de referencia característicos del ámbito de estudio referidos al NMLM (NOAA, 2019a)	98
Figura 65 - Reglas de los cuatro u ocho lados a la izquierda y derecha respectivamente para la evaluación de un incremento del nivel del mar de 1 metro	99

Figura 66 - Capas de mareas para el ámbito de estudio, arriba PMVE y abajo BMVE referidas al NMLM (Plano III.6 en la sección de Anejos).....101

Figura 67 - Modelos utilizados para llevar a cabo los procesos descritos anteriormente (Planos III.7 y III.8 en la sección de Anejos)103

Figura 68 - Clasificación de los rebases y sus consecuencias para la seguridad tanto del tránsito de peatones y vehículos como de la integridad estructural de edificios y obras de abrigo y protección costera (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).....105

Figura 69 - Puntos característicos para la evaluación de los rebases en las obras de abrigo del ámbito de estudio (Plano III.9 en la sección de Anejos).....106

Figura 70 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 0 (Plano IV.1 en la sección de Anejos)108

Figura 71 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.1 en la sección de Anejos)110

Figura 72 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.1.1 en la sección de Anejos)111

Figura 73 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.2 en la sección de Anejos)111

Figura 74 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.2.1 en la sección de Anejos)112

Figura 75 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.3 en la sección de Anejos)112

Figura 76 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.3.1 en la sección de Anejos)113

Figura 77 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.4 en la sección de Anejos)113

Figura 78 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.4.1 en la sección de Anejos)114

Figura 79 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 1 (Plano IV.2 en la sección de Anejos)116

Figura 80 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.1 en la sección de Anejos)118

Figura 81 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.1.1 en la sección de Anejos)119

Figura 82 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.2 en la sección de Anejos)119

Figura 83 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.2.1 en la sección de Anejos)120

Figura 84 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.3 en la sección de Anejos)120

Figura 85 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.3.1 en la sección de Anejos)121

Figura 86 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.4 en la sección de Anejos)121

Figura 87 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.4.1 en la sección de Anejos)122

Figura 88 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 1 (Plano IV.2.5 en la sección de Anejos).....122

Figura 89 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 1 (Plano IV.2.6 en la sección de Anejos)124

Figura 90 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 1 (Plano IV.2.7 en la sección de Anejos)124

Figura 91 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 2 (Plano IV.3 en la sección de Anejos)125

Figura 92 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.1 en la sección de Anejos)127

Figura 93 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.1.1 en la sección de Anejos)128

Figura 94 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.2 en la sección de Anejos)128

Figura 95 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.2.1 en la sección de Anejos)129

Figura 96 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.3 en la sección de Anejos)129

Figura 97 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.3.1 en la sección de Anejos)130

Figura 98 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.4 en la sección de Anejos)130

Figura 99 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.4.1 en la sección de Anejos)131

Figura 100 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 2 (Plano IV.3.5 en la sección de Anejos).....131

Figura 101 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 2 (Plano IV.3.6 en la sección de Anejos)133

Figura 102 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 2 (Plano IV.3.7 en la sección de Anejos)133

Figura 103 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 3 (Plano IV.4 en la sección de Anejos)134

Figura 104 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.4.1 en la sección de Anejos)136

Figura 105 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.4.1.1 en la sección de Anejos)137

Figura 106 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.4.2 en la sección de Anejos)137

Figura 107 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.4.2.1 en la sección de Anejos)138

Figura 108 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.3 en la sección de Anejos)138

Figura 109 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.3.1 en la sección de Anejos)139

Figura 110 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.4 en la sección de Anejos)139

Figura 111 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.4.1 en la sección de Anejos)140

Figura 112 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 3 (Plano IV.4.5 en la sección de Anejos).....140

Figura 113 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 3 (Plano IV.4.6 en la sección de Anejos)142

Figura 114 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 3 (Plano IV.4.7 en la sección de Anejos)142

Figura 115 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 4 (Plano IV.5 en la sección de Anejos)143

Figura 116 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.1 en la sección de Anejos)145

Figura 117 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.1.1 en la sección de Anejos)146

Figura 118 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.2 en la sección de Anejos)146

Figura 119 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.2.1 en la sección de Anejos)147

Figura 120 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.3 en la sección de Anejos)147

Figura 121 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.3.1 en la sección de Anejos)148

Figura 122 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.4 en la sección de Anejos)148

Figura 123 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.4.1 en la sección de Anejos)149

Figura 124 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 4 (Plano IV.5.5 en la sección de Anejos).....149

Figura 125 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 4 (Plano IV.5.6 en la sección de Anejos)151

Figura 126 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 4 (Plano IV.5.7 en la sección de Anejos)151

Figura 127 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para todos los escenarios analizados152

Figura 128 - Fotografía del Canal Domínguez a su paso próximo al Puerto de Long Beach (Google, 2019).....153

Figura 129 - Superficie total en riesgo de inundación permanente y temporal en el ámbito de estudio para todos los escenarios considerados (Plano IV.6 en la sección de Anejos).....153

Figura 130 - Zonas críticas en riesgo de inundación permanente y temporal en el ámbito de estudio para todos los escenarios considerados (Plano IV.6.1 en la sección de Anejos).....154

Figura 131 - Localización del muro de tablestacas en la segunda zona crítica (Google, 2019)154

Figura 132 - Localización de la planta generadora de electricidad en la segunda zona crítica (Google, 2019).....155

Figura 133 - Topografía de la zona crítica número 2155

Figura 134 - Zonas inundables debido a descargas fluviales asociadas con un período de retorno de 100 años (POLB, 2016).....156

Figura 135 - Manuales de diseño del Puerto de Long Beach (2012; 2014).....158

Figura 136 - Criterios para la determinación de niveles mínimos de coronación de las obras de ataque fijas según la ROM2.0-11 (2012)159

Figura 137 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 0163

Figura 138 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 1 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0.....164

Figura 139 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 2 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0.....165

Figura 140 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 3 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0.....166

Figura 141 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 4 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0.....166

Figura 142 - Comparación de rebases medios por escenario y período de retorno.....167

Lista de tablas

Tabla 1 – Aspectos relevantes de los puertos de Los Ángeles y de Long Beach, elaboración propia con datos de (POLA, 2019; POLB, 2019).....	22
Tabla 2 – Terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles, elaboración propia con datos de (POLA, 2019)	24
Tabla 3 – Terminales de contenedores del Puerto de Long Beach, elaboración propia con datos de (POLB, 2019).....	24
Tabla 4 – Escenarios RCPs, elaboración propia con datos de (Meinshausen et al., 2011; Moss et al., 2010; Pachauri et al., 2014)	55
Tabla 5 - Impactos asociados al incremento relativo del nivel del mar (R.J. Nicholls et al., 2011)	71
Tabla 6 - Proyección de la concentración de CO2 por décadas hasta el 2100, elaboración propia con datos de (Meinshausen et al., 2011; Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013)	85
Tabla 7 - Proyección del incremento del nivel relativo del mar en el ámbito de estudio hasta el 2100, resaltando los valores correspondientes a los escenarios Intermedio-bajo e Intermedio, elaboración propia con datos de (Sweet, Horton, et al., 2017)	87
Tabla 8 - Altura de ola significativa y período pico asociado al régimen extremal en el ámbito de estudio	96
Tabla 9 - Niveles de marea superior a la PMVE y período de retorno asociado al régimen extremal en el ámbito de estudio.....	97
Tabla 10 - Datos de entrada para el modelado del incremento del nivel del mar en el ámbito de estudio, los valores de storm surge (SS (m)), corresponden a los obtenidos a partir de la banda superior de confianza del 95%.....	100
Tabla 11 - Puntos utilizados para la creación de las capas de mareas para el ámbito de estudio con cotas referidas al NMLM. Datos de (Z. Yang, Myers, Dhingra, Wong, & White, 2009) ..	101
Tabla 12 - Comprobación de que el oleaje no está limitado por el fondo en el ámbito de estudio mediante la aplicación del criterio de McCowan	105
Tabla 13 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 0109	
Tabla 14 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 0.....	110
Tabla 15 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 0	115
Tabla 16 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 1116	

Tabla 17 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 1118

Tabla 18 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 1 123

Tabla 19 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 2 125

Tabla 20 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 2127

Tabla 21 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 2 132

Tabla 22 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 3 134

Tabla 23 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 3136

Tabla 24 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 3 141

Tabla 25 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 4 143

Tabla 26 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 4145

Tabla 27 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 4 150

Tabla 28 - Francobordos de seguridad para los muelles de las terminales de contenedores del ámbito de estudio y bajo la influencia de todos los escenarios analizados 162

CAPÍTULO I

I. Introducción

I.1 Motivación de la investigación

El cambio climático es un fenómeno derivado de la intensificación de procesos naturales que sustentan y hacen posible la vida en el planeta que habitamos debido a la influencia inequívoca del ser humano como así lo afirma el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su 5º Informe sobre el Cambio Climático (2013). Esta perturbación, acarrea consigo importantes disrupciones que inciden directa o indirectamente en los sistemas humanos y naturales, convirtiéndolo en el principal desafío del siglo XXI.

Una de las consecuencias que se desprenden del cambio climático es el incremento del nivel del mar. Dicho incremento ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a las posibles modificaciones que podría provocar en los entornos naturales y artificiales localizados en las costas. Según estimaciones de las Naciones Unidas (2017):

- Alrededor de 600 millones de personas habitan en zonas costeras a una altura igual o inferior a 10 metros por encima del nivel del mar.
- La economía de los mares y océanos, incluyendo empleos y servicios ecosistémicos y culturales que estos proveen, representan entre 3 y 6 trillones de dólares al año.
- El 90% del intercambio comercial que se produce en todo el mundo se realiza por vía marítima y representa aproximadamente 3 trillones de dólares al año.
- El coste potencial asociado a daños en los puertos de todo el mundo debido al incremento del nivel del mar podría ser tan alto como 111,60 y 367,20 billones de dólares para los años 2050 y 2100 respectivamente.

En el presente Trabajo de Fin de Máster, en el capítulo I, se realiza la introducción al ámbito de estudio, los puertos de Los Ángeles y Long Beach, en California (EE. UU.), pasando por sus aspectos físicos y operativos más relevantes. Posteriormente en el capítulo II, se recoge una revisión histórica de la literatura científica enfocada en el cambio climático y como este ha pasado de ser una simple suposición para convertirse en el principal desafío del siglo XXI, así como también del incremento del nivel del mar y las principales proyecciones de esta elevación hasta el 2100. Del mismo modo se expondrán los informes de carácter global y de carácter local más relevantes sobre este fenómeno climático y sus impactos asociados. Además, se abordarán los cambios en el nivel del mar, más precisamente su incremento,

global y relativo, su relación con el cambio climático, su evolución en función de este y su influencia en los eventos extremos, oleajes y obras costeras.

En el capítulo III, se aborda la metodología de investigación desarrollada con el objetivo general de estudiar la influencia del incremento del nivel del mar debido al cambio climático en el ámbito de estudio. Para esto se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- Primero, realizar el modelado y análisis mediante técnicas SIG de diversos incrementos del nivel del mar en la zona de estudio. En este proceso se incorporarán las variaciones debidas a las mareas astronómica y meteorológica respectivamente, esta última asociada a un período de retorno dado. Finalizado este proceso, se delimitará la superficie en riesgo de inundación de los puertos, estas son las localizadas por debajo de los niveles del mar y de mareas proyectados.
- Segundo, analizar la variación del francobordo de seguridad de las obras de atraque que sirven a las terminales de contenedores de los puertos, comparando estos valores con los niveles mínimos y deseados de coronación permitidos por las normativas de diseño del Puerto de Long Beach.
- Tercero, en lo que respecta a las obras de abrigo, analizar los efectos que tendrán estos incrementos del nivel del mar en los rebases en los diques que protegen los puertos, tomando en consideración la dirección y altura de ola significativa incidente asociada a un período de retorno dado.

Luego de esto, en el capítulo IV se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios considerados finalizando con las conclusiones derivadas de la investigación y las futuras líneas de investigación sobre las cuales se podría ampliar el conocimiento del tema en el capítulo V.

I.2 Ámbito del estudio

Los puertos de Los Ángeles y Long Beach están ubicados en la costa oeste de los Estados Unidos de América (EE. UU.) aproximadamente 30 kilómetros al sur de la ciudad de Los Ángeles y 2 kilómetros al suroeste de la ciudad de Long Beach, formando parte del condado de Los Ángeles y del estado de California.



Figura 1 - Ubicación del ámbito de estudio (Plano I.1 en la sección de Anejos)



Figura 2 - Localización del ámbito de estudio (Plano I.2 en la sección de Anejos)

Juntos conforman lo que se conoce como el Complejo Portuario de la Bahía de San Pedro, por estar localizados en el emplazamiento del mismo nombre. El Puerto de Los Ángeles fue fundado el 9 de diciembre de 1907 y el Puerto de Long Beach el 24 de junio de 1911. La gestión de estos puertos está a cargo de la Junta de Comisionados Portuarios de las ciudades de Los Ángeles y Long Beach respectivamente bajo el modelo de explotación del tipo landlord (POLA, 2019; POLB, 2019).

I.2.1 Historia del Puerto de Los Ángeles

El navegante y explorador español Juan Rodríguez Cabrillo arribó a la “Bahía de los Humos” en el 1542, la cual posteriormente en 1734 es bautizada como “Bahía de San Pedro” por el almirante Gonzales. En 1781 se funda el pueblo de “Los Ángeles” por monjes de la misión de San Gabriel Arcángel y debido a esto empiezan a llegar embarcaciones a la bahía a cargar y descargar mercancías (McOuat, 1950).

Con la Independencia Mexicana, España pierde los terrenos de California en 1822 y la Bahía de San Pedro se cierra al comercio. Más tarde, en el 1848, con la firma del Tratado de Guadalupe Hidalgo, los Estados Unidos Mexicanos ceden las tierras de California a los Estados Unidos de América (McOuat, 1950).

En 1897 el Congreso de EE. UU. declara la Bahía de San Pedro como el puerto oficial de Los Ángeles y posteriormente el 9 de diciembre de 1907 es fundado oficialmente (McOuat, 1950).

Para 1912, el canal principal del Puerto ya se había dragado a una profundidad de 9 metros y ampliado a una anchura de 243 metros con el objetivo de poder acomodar el flujo de naves de mayores dimensiones una vez abriera el Canal de Panamá en 1914. En 1928 el Puerto llega a manejar 26,5 millones de toneladas de carga, un récord que se mantendría vigente por 40 años. Con la Gran Depresión de 1929 el Puerto no volvería a superar los 20 millones de toneladas de carga hasta 1937 (POLA, 2019).

El crecimiento del Puerto se detuvo durante la Segunda Guerra Mundial y por orden del Estado se dedica tiempo completo a dicha cruzada. En la misma se emplearon más de 90.000 obreros en la construcción de miles de naves. Finalizada la guerra el Puerto pudo enfocarse en su política de expansión y desarrollo (POLA, 2019).

En agosto de 1958 llega la revolución del contenedor al Puerto de Los Ángeles con la descarga de 20 contenedores, alcanzando la cifra de 7.000 TEUs a finales del mismo año (POLA, 2019).

En 1986 se inaugura la Intermodal Container Transfer Facility (ICTF) debido a que resultaba prácticamente imposible para las naves más grandes de la época pasar a través del Canal de Panamá y llegar a los puertos de la costa sur y este de los EE. UU., por lo cual sirvió de empuje para el fomento a la intermodalidad (POLA, 2019) y así posicionar al Puerto como un nodo logístico importante para todo el país.

A finales de 1995 el Puerto había manejado 2,6 millones de contenedores y en 1997 es inaugurada la terminal de contenedores Global Gateway South (GGS) en el Muelle 300 de

aproximadamente 1 millón de metros cuadrados. En 1999, el tráfico de contenedores en el Puerto sobrepasa los 3,5 millones de contenedores (POLA, 2019).

En 2004 se inaugura la terminal de contenedores Muelle 400 de aproximadamente 2 millones de metros cuadrados operada por APM Terminals y California United Terminals Inc. (POLA, 2019).

I.2.2 Historia del Puerto de Long Beach

El desarrollo del Puerto de Long Beach inicia en 1906 sobre una superficie de aproximadamente 3,2 millones de metros cuadrados. En 1908 se inicia el dragado del Canal Cerritos, a través del cual se comunica con el Puerto de Los Ángeles y posteriormente el 24 de junio de 1911 es fundado oficialmente (POLB, 2019).

En 1924 se aprueba la ampliación del muelle interior, compuesto por los Muelles A, B y C y el desarrollo preliminar del muelle exterior. Para 1926 el Puerto alcanza el millón de toneladas manejadas. La reconstrucción del muelle interior y la construcción de nuevos muelles e instalaciones se inicia a partir de 1928 (POLB, 2019).

Se descubre petróleo en las inmediaciones de este puerto en 1936 y su extracción inicia dos años después en 1938, provocando grandes subsidencias en este y en el Puerto de Los Ángeles. En 1940 la Armada de los Estados Unidos de América adquiere aproximadamente 400 mil metros cuadrados en el muelle interior que iban a ser utilizados para una nueva terminal de carga originalmente, instalándose una base naval en su lugar (POLB, 2019).

En 1949 se finaliza una nueva expansión del puerto, completándose la construcción del Muelle E y la expansión del Muelle B, agregando 145 mil metros cuadrados de superficie exterior. Con la operación “Big Squirt”, consistente en un programa de inyección de agua en el subsuelo, se frena la subsidencia del Puerto (POLB, 2019).

En 1962 se inicia la construcción de una expansión de 1,25 millones de metros cuadrados (muelles J y F) y llega por primera vez el contenedor al Puerto de Long Beach. En 1971 finaliza otra expansión de aproximadamente 222 mil metros cuadrados, los cuales serían compartidos por una terminal de contenedores y de automóviles (POLB, 2019).

En 1979 el Puerto adquiere 560 mil metros cuadrados para una nueva terminal de automóviles. En 1988 se inicia una expansión de 600 mil metros cuadrados del Muelle J. En 1994 se completa la compra de aproximadamente 3 millones de metros cuadrados a la Union Pacific Resources Company (POLB, 2019).

En 1998, el Puerto de Long Beach se convierte en el primer puerto norteamericano en manejar más de 4 millones de TEUs. Posteriormente, la Armada decide transferir al Puerto 2 millones de metros cuadrados que estaban fuera de uso desde el final de la Guerra Fría. En el 2002, el Muelle T inicia sus operaciones con la primera “mega terminal” del Puerto (POLB, 2019).

I.2.3 Aspectos físicos y operativos de los puertos

Ambos puertos compiten en lo que a comercio se refiere, pero cooperan regularmente en áreas como el fomento de la seguridad, el desarrollo de sus infraestructuras tanto internas como las circundantes y la protección del medioambiente.

En el año 2018 se manejaron 9,45 y 8,10 millones de TEUs en los puertos de Los Ángeles y de Long Beach respectivamente, situándolos como el primer y segundo puerto de mayor movimiento de carga contenerizada de toda América y del Hemisferio Occidental (POLA, 2019) y el noveno a nivel mundial (17,55 millones de TEUs) de considerarse ambos puertos como un solo complejo (POLB, 2019).

A continuación, se presenta un resumen de las características más relevantes de ambos puertos:

ITEM	PUERTO	
	Los Ángeles (POLA)	Long Beach (POLB)
Superficie total (m²)	30.351.750	32.860.828
Superficie útil (m²)	17.401.670	14.245.088
Aguas interiores (m²)	12.950.080	18.615.740
Terminales de contenedores	7	6
TEUs 2018	9.458.749	8.091.023
Profundidad canal principal BMVE (m)	-16,15	-23,16

Tabla 1 – Aspectos relevantes de los puertos de Los Ángeles y de Long Beach, elaboración propia con datos de (POLA, 2019; POLB, 2019)

En la siguiente página se presenta la posición global que ostentan estos puertos al considerarlos como un solo complejo (el noveno a nivel mundial como se dijo anteriormente), así como también los demás puertos que completan la lista de los 10 puertos de mayor tráfico de contenedores para el año 2018.

Se puede observar en los gráficos el dominio global que ejercen los puertos asiáticos en materia de tráfico de contenedores con China, Singapur, Corea del Norte y Emiratos Árabes Unidos completando la lista junto con Estados Unidos de América.

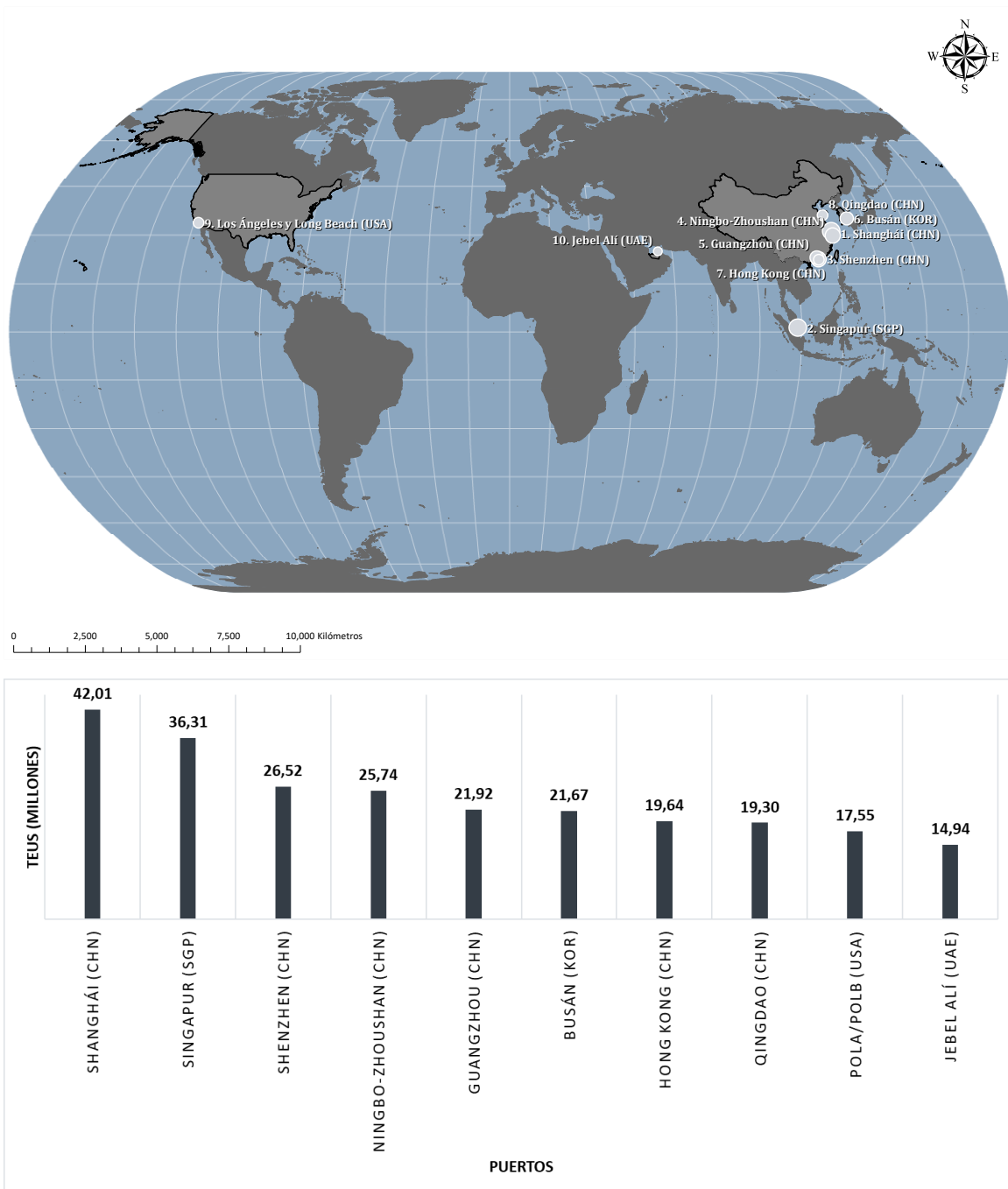


Figura 3 - Ranking de los 10 puertos de mayor tráfico de contenedores a nivel mundial para el año 2018 (Plano I.3 en la sección de Anejos), elaboración propia con datos de (BPA, 2018; Hong Kong Census and Statistics Department, 2018; POLA, 2018; POLB, 2018; PON, 2018; Singapore PSA, 2018; SIPG, 2018)

Finalizada la exposición de las características físicas más relevantes de ambos puertos, continuamos ahora con sus terminales de contenedores:

TERMINALES DE CONTENEDORES - PUERTO DE LOS ÁNGELES						
#	Terminal	Operador	Superficie (m ²)	Línea de atraque (m)	Amarres	Profundidad BMVE (m)
CLA1	WBCT China Shipping	West Basin Container Terminal LLC.	615.389,09	760,39	2	-16,15
CLA2	WBCT Yang Ming		870.035,16	645,40	2	-13,71
CLA3	TraPac	TraPac Inc.	905.244,93	1.419,32	4	-13,71 a -16,15
CLA4	Yusen Terminal	Yusen Terminal Inc.	653.341,01	1.507,43	3	-14,33 a -16,15
CLA5	Everport Terminal Services	Everport Terminal Services	696.563,43	1.512,01	3	-13,71
CLA6	Fenix Marine Services	Fenix Marine Terminal	1.233.357,27	1.223,76	3	-13,71 a -15,24
CLA7	APM Pacific Terminals, Ltd.	APM Terminals	1.981.095,04	2.191,51	6	-16,76

Tabla 2 – Terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles, elaboración propia con datos de (POLA, 2019)

TERMINALES DE CONTENEDORES - PUERTO DE LONG BEACH						
#	Terminal	Operador	Superficie (m ²)	Línea de atraque (m)	Amarres	Profundidad BMVE (m)
CLB1	Muelle A	SSA Terminals	722.255,69	1.085,83	3	-15,20
CLB2	Muelle C		241.261,23	550,20	2	-12,80
CLB3	Muelle E	Long Beach Container Terminal Inc.	844.481,25	865,88	3	-16,80
CLB4	Muelle G	Int. Transp. Service (ITS)	1.071.473,89	1.540,43	4	-11 a -12,80
CLB5	Muelle J	Pacific Container Terminal	1.138.288,63	1.843,58	4	-12,80 a -15,20
CLB6	Muelle T	Total Terminals Int.	1.574.778,67	1.526,82	4	-16,80

Tabla 3 – Terminales de contenedores del Puerto de Long Beach, elaboración propia con datos de (POLB, 2019)



Obras de atraque

- Puerto de Los Ángeles
- Puerto de Long Beach

Terminales de contenedores

- Puerto de Los Ángeles
 - Puerto de Long Beach
- CLA1** - WBCT China Shipping
CLA2 - WBCT Yang Ming
CLA3 - TraPac
CLA4 - Yusen Terminal
CLA5 - Everport Terminal Services
CLA6 - Fenix Marine Services
CLA7 - APM Pacific Terminal
- CLB1** - SSA Terminals
CLB2 - SSA Terminals
CLB3 - Long Beach Container Terminal
CLB4 - International Transportation Service
CLB5 - Pacific Container Terminal
CLB6 - Total Terminals International

Figura 4 - Arriba, planta general del ámbito de estudio (Plano I.4 en la sección de Anejos). Abajo, las terminales de contenedores de ambos puertos (Plano I.5 en la sección de Anejos)

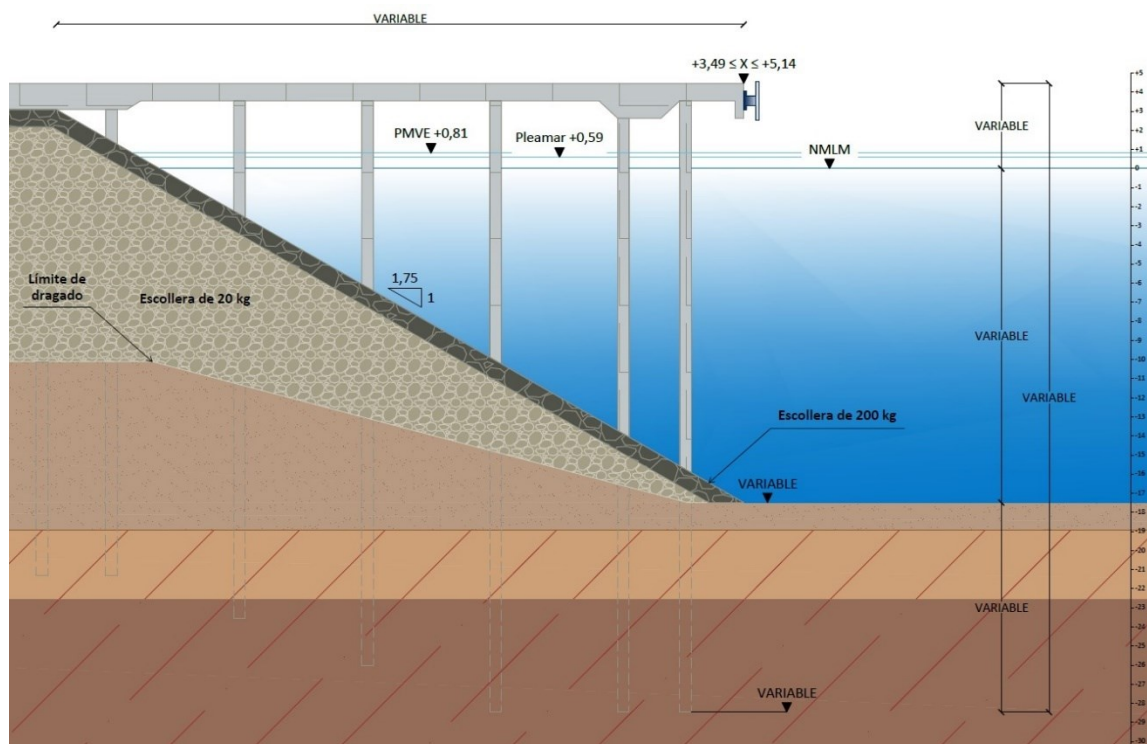


Figura 5 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos (Plano I.6 en la sección de Anejos)

Las embarcaciones realizan su entrada y salida del complejo portuario a través de dos bocanas conocidas como Puerta del Ángel y Puerta de la Reina con 640,08 y 518,16 metros de ancho respectivamente. Estas puertas están localizadas entre un sistema de diques que sirve de abrigo para el complejo (Wiegel, 2009). Estos diques son:

- **Dique de San Pedro:** es un dique en talud coronado por una superestructura de escollera concertada dispuesta en cursos escalonados, construido entre 1899 y 1912 (Wiegel, 2009). Su diseño está inspirado en el dique de Rockland, ubicado en el estado de Maine (Herron, Peel, Lillevang, & Dunham, 1986).



Figura 6 - Dique de Rockland, Maine, EE. UU.

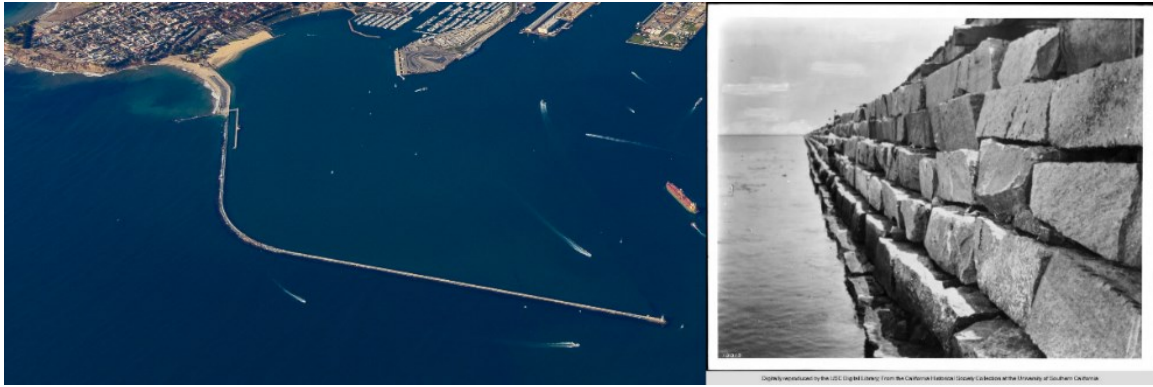


Figura 7 - A la izquierda, vista aérea del Dique de San Pedro y a la derecha, vista de su superestructura del lado puerto (POLA, 2019; USC - Digital Library, 1900)

Tiene una longitud de 3.399,13 metros sobre la cota -15,19 NMLM y un ancho en su base de 55,30 metros. Su estructura en talud tiene un ancho de coronación de 14,33 metros en la cota -0,86 y está compuesta de escollera de 45 kilogramos a 20 toneladas, con dos tercios promediando 1 tonelada y el tercio restante 4 toneladas en promedio (Fries, 1912), con taludes en el lado mar 3H:1V hasta la cota -4,52 y 1,2H:1V hasta el fondo e igual talud del lado puerto. La superestructura arranca en la cota -0,86 y corona en la +3,41 con un ancho de 6,10 metros. En el lado mar están dispuestos a partir de una berma de 1,52 metros de ancho, cuatro bloques de no menos de 8 toneladas de peso y dimensiones 2,02 y 1,07 metros de ancho y alto respectivamente, dejando una huella de 1,01 metros de ancho hasta el siguiente bloque y en el lado puerto a partir de una berma de 1,22 metros de ancho se encuentran siete bloques de no menos de 3 toneladas de dimensiones 1,47 y 0,61 metros de ancho y alto, dejando una huella de 0,41 metros de ancho hasta el siguiente bloque (McQuat, 1950).

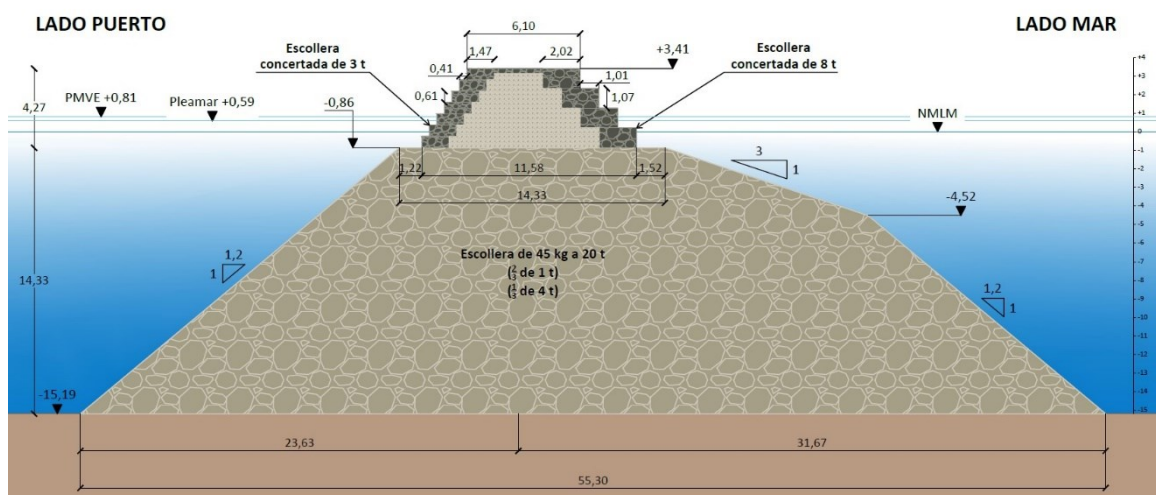


Figura 8 - Sección tipo del Dique de San Pedro (Plano I.7 en la sección de Anejos)

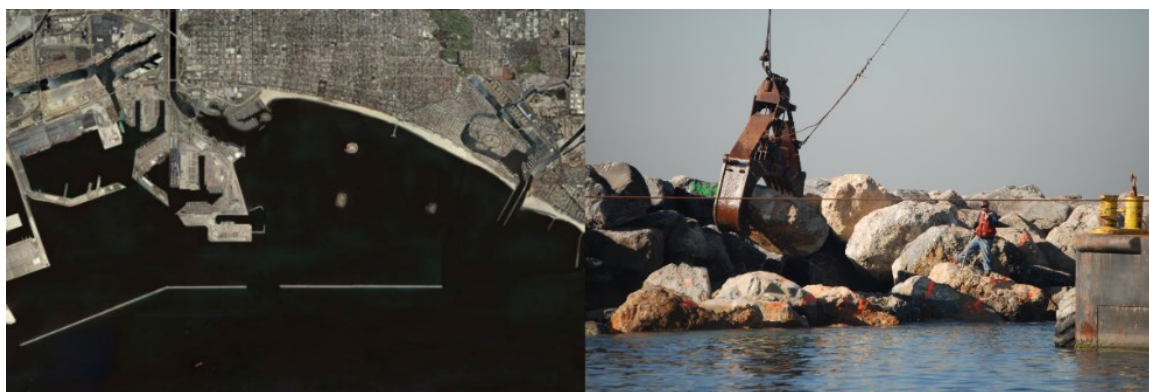


Figura 9 - A la izquierda vista aérea de los diques Intermedio y de Long Beach y a la derecha, operarios colocan una pieza de escollera en el manto principal del Dique Intermedio (USACE - Los Angeles District, 2014)

- Dique Intermedio y Dique de Long Beach:** construidos entre 1932 y 1949 con una tipología de talud sin espaldón (Wiegel, 2009). Se extienden por un total 5.638,80 y 4.069,08 metros respectivamente sobre la cota -16,10 NMLM con un ancho en su base de 70,10 metros. Sus núcleos están compuestos de arena y arcilla hasta la cota -8,17, seguido por una capa filtrante de escollera de 0,65 a 2 toneladas hasta la cota -3,91 con taludes en el lado mar 2H:1V y en el lado puerto 1,25H:1V. En lo adelante hasta su coronación en la cota +3,41 y con un ancho de 4,88 metros están compuestos por un manto principal de escollera de 10 a 13 toneladas con taludes en el lado mar 2H:1V y en el lado puerto 1,5H:1V (Outlaw, Durham, Chatham, & Whalin, 1977).

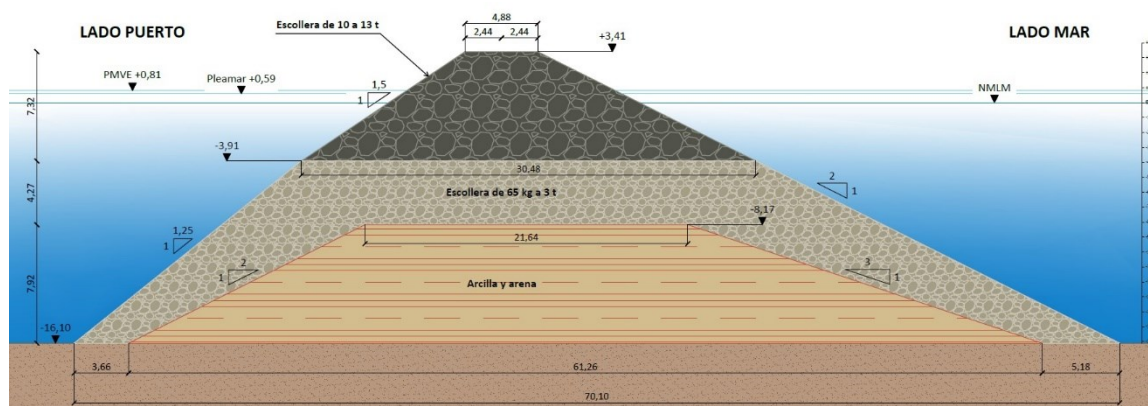


Figura 10 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach (Plano I.8 en la sección de Anejos)

Al momento de su concepción, el diseño de estos diques fue de carácter empírico, basándose mayormente en estructuras similares y una gran cantidad de análisis de estabilidad de taludes desde un punto de vista estático (Herron et al., 1986).

Según Grifman et al. (2013), aunque este sistema de diques provee de superficie abrigada y protección a los puertos de Los Ángeles y Long Beach, es frecuentemente rebasado durante eventos extremos que coinciden con la pleamar.

Siguiendo este mismo planteamiento, Fassardi (2016) realiza una evaluación integral de la condición del dique de San Pedro entre julio de 2009 y agosto de 2012 con el objetivo de

estudiar la funcionalidad y sentar las bases para la planificación de futuras reparaciones, mantenimientos y mejoras. Dicha evaluación indicó que, en su condición actual, este dique provee la funcionalidad requerida en materia de abrigo a los puertos de Los Ángeles y Long Beach. Sin embargo, el reporte señala que existe cierta incertidumbre en torno a la funcionalidad de este al sufrir daños por la combinación de grandes olas y niveles de mareas.

En su reporte, Fassardi señala también que dicho dique presenta un asentamiento de aproximadamente 0,61 metros en promedio en toda su sección, incrementando su vulnerabilidad ante los rebases causados por la combinación de grandes olas y niveles de mareas, particularmente durante los años dominados por el fenómeno de El Niño.

CAPÍTULO II

II. Estado del arte

En el presente acápite se pretende hacer una exposición del conocimiento acumulado en el campo del cambio climático, su incidencia en el incremento del nivel medio global del mar y el efecto de este incremento en las zonas costeras, las obras de abrigo y las infraestructuras portuarias que estas aseguran, estableciendo una base teórica y punto de partida para esta investigación.

Se inicia con una revisión histórica de los estudios realizados sobre los campos mencionados. Posteriormente se realiza una descripción general centrada en los aspectos más relevantes para esta investigación del oleaje, obras marítimas, diques en talud y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Luego pasamos a una exposición de los informes más relevantes en la actualidad sobre el cambio climático y el incremento del nivel medio global del mar en tres escalas espaciales distintas. Primero, a nivel global se expone el 5.º Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), segundo, a nivel regional, la 4.ª Evaluación Nacional del Clima de Estados Unidos de América y tercero, a nivel estatal, la 4.ª Evaluación Nacional del Clima de California.

Finalmente, se realiza una comparación de las proyecciones más relevantes del incremento del nivel medio global del mar expuestas en este acápite, pasando después a un análisis de los cambios en el nivel del mar y su incremento global y relativo finalizando con las consideraciones finales sobre su incidencia en obras de abrigo y las infraestructuras costeras.

II.1 Antecedentes

Mitchell (1953), realiza un análisis de la factibilidad del uso de registros de tendencias de temperaturas como representación del cambio climático en el siglo XX, destacando las fuentes que influyeron en estos registros junto con estimaciones cuantitativas instrumentales, observacionales y locales de factores ambientales, llegando a la conclusión de la influencia crítica de factores no climáticos, tales como el crecimiento urbano, el cual ha inducido en su mayor parte un aparente incremento en las temperaturas del orden de 1°C.

Plass (1956, 1959), establece una teoría que relaciona el cambio climático con las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera, postulando el papel que juega este gas como regulador de la temperatura en la Tierra y argumenta que la tendencia del

calentamiento del planeta continuará por varios siglos debido a la combustión de combustibles fósiles.

Mitchell (1971), estima mediante un modelo generalizado los efectos de los aerosoles en las temperaturas próximas a la superficie de la Tierra, relacionando el aumento o la reducción de este parámetro con la tasa de absorción de radiación solar por parte de los aerosoles de ser esta mayor o menor que una tasa crítica.

Manabe y Wetherald (1975), realizan un experimento en el cual estiman los cambios resultantes en el clima por la duplicación de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, obteniendo como resultado el desplazamiento progresivo de la cubierta de nieve hacia los polos geográficos y un incremento significativo en la intensidad del ciclo hidrológico del modelo debido a mayores tasas de precipitación y evaporación. En ese mismo año **Broecker (1975)**, advierte que la tendencia al calentamiento debido al CO₂ ha sido más que contrarrestada por un enfriamiento natural del planeta y que dicha compensación no podrá continuar por mucho tiempo debido al rápido crecimiento de las emisiones de este gas y la potenciación del efecto invernadero debido a esto, sugiriendo una posible sorpresa climática en los años venideros.

Los estudios de **Mercer (1978)**, **Emery (1980)**, **Hansen et al. (1981)** y **Gornitz et al. (1982)**, sugieren que de continuar en ascenso el consumo de combustibles fósiles, la concentración de CO₂ en la atmósfera se duplicará en 50 años, con un magnificado efecto invernadero en latitudes altas y evidencias indirectas que apuntan al deshielo de las masas de hielo continentales, contribuyendo junto con el aumento de la temperatura de la superficie de los mares, al incremento del nivel medio global de sus aguas en 0,2 a 0,6 metros para el 2050 en adición a los 0,12 metros que se incrementó en el siglo pasado según datos derivados de mareógrafos de todo el mundo. En lo que respecta a tasas de incremento anuales del nivel medio del mar, **(Emery, 1980)** y **(V. Gornitz et al., 1982)** las cifran en 3,0 y 1,2 mm/año respectivamente. Estos últimos estiman que la diferencia con el primero se debe a mareógrafos localizados en regiones caracterizadas por grandes fenómenos de subsidencia del terreno.

Hoffman et al. (1983), cifran las concentraciones de CO₂ en la atmósfera en 340 ppm (partes por millón) y que la influencia de otros gases tales como metano, clorofluorocarbonos y óxido nitroso está en aumento y podrían duplicar el calentamiento producido únicamente por el CO₂. Proyectan además incrementos del nivel medio global del mar desde 0,56 a 3,45 metros. En este estudio introducen una metodología basada en escenarios altos y bajos de incrementos del nivel del mar, basados en aspectos tales como crecimiento demográfico, urbano e industrial y la respuesta del planeta ante uno u otro de estos supuestos, con el objetivo de introducir herramientas y ayudar a los encargados de la toma de decisiones en la evaluación de la vulnerabilidad de las infraestructuras existentes ante este fenómeno.

Emanuel (1987), estima la máxima intensidad de ciclones tropicales debido a incrementos en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Sus resultados obtenidos mediante un modelo

general de circulación sobre los océanos tropicales predicen un incremento del 40-50% en el potencial destructivo de los huracanes con el doble del contenido de CO₂ en la atmósfera.

Peltier y Tushingham (1989), sugieren una tasa de incremento anual del nivel medio global del mar del orden de $2,4 \pm 0,90$ mm/año luego de remover las contribuciones de los ajustes isostáticos glaciales en cada locación registrada.

El **IPCC (1990)**, en su primera evaluación del cambio climático, indica que en el último siglo, la temperatura media global se ha incrementado entre 0,3 y 0,6°C y el nivel del mar del mismo modo se ha elevado entre 0,1 y 0,2 metros, destacando que estos incrementos no han sido uniformes en todo el globo terráqueo. Al igual que **(Hoffman et al., 1983)**, proponen escenarios de evaluación (cuatro casos) pero basados en concentraciones de gases de efecto invernadero hasta el 2100, proyectando en el caso más optimista un incremento de temperatura y del nivel del mar de 1°C y 0,31 metros respectivamente y en el caso más pesimista 3°C y 1,10 metros, a una tasa de 6 centímetros de media (con una incertidumbre entre 3 y 10 cm) por década debido a la expansión térmica de los océanos y el derretimiento del hielo en glaciares, con significativas variaciones regionales.

Gornitz (1991), estima que una elevación en el nivel medio global del mar entre 0,3 y 0,9 metros para finales del siglo XXI pondría en peligro a ciudades, puertos y humedales situados en zonas costeras de baja elevación, desarrollando un índice de vulnerabilidad costera para demarcar segmentos de alto riesgo y haciendo referencia a una tasa de elevación anual de 1 a 2 mm/año en el último siglo. **Douglas (1991)** cifra esta tasa anual de elevación en $1,8 \pm 0,1$ mm/año para el período 1880-1980.

Roemmich (1992), basado en series de tiempo de datos hidrográficos de los pasados 42 años, indica que las temperaturas se han incrementado 0,8°C en los primeros 500 metros de profundidad del Océano Pacífico, expandiendo la columna de agua y elevando los niveles del océano a una tasa de $0,9 \pm 0,2$ mm/año.

Daniels (1992), formula extrapolaciones de escenarios de incremento medio global del nivel del mar que van de 0,25 a 2 m basados en los modelos del **IPCC (1990)**, y argumenta que por consecuencia de este incremento, también aumentará el porcentaje de superficie expuesta a episodios de inundación costera debidos a eventos extremos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Vellinga y Klein (1993), estudian como los incrementos demográficos y la expansión de actividades económicas, la urbanización y el consumo de recursos, incrementan continuamente la vulnerabilidad de las zonas costeras, ahora amenazadas por el cambio climático y la posible aceleración de la tasa de incremento del nivel medio global del mar. Hacen hincapié en la necesidad de adoptar políticas enmarcadas en la Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC) en el corto, mediano y largo plazo con el objetivo de preservar o crear la sostenibilidad de estas zonas.

El **IPCC (1995)**, en su segunda evaluación del cambio climático indica que los incrementos en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEIs) han conducido a un forzamiento

radiativo positivo en el clima, lo cual tiende a calentar la superficie y provocar cambios en el sistema climático. En este reporte mantienen las mismas estimaciones en lo que a incrementos de temperatura se refiere que en su primer reporte (J. T. Houghton et al., 1990), incrementando el rango de incremento del nivel medio global del mar para el último siglo, situándolo ahora en 0,10 a 0,25 metros. En cuanto a las proyecciones de escenarios futuros, en el escenario más optimista proyectan un incremento de temperatura y del nivel medio global del mar de 1°C y 0,13 metros respectivamente y en el escenario más pesimista 3,5°C y 0,95 metros respectivamente para el 2100.

Yang (1997), realiza un análisis mediante técnicas de modelado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) del área susceptible a la inundación costera en el delta del Río Amarillo en China debido a la subsidencia que presenta esta zona en combinación con una tasa de incremento del nivel medio global del mar anual de 1 a 2 mm/año debido al cambio climático.

Klein y Nicholls (1999), comparan dos metodologías distintas en la evaluación de la vulnerabilidad costera frente al cambio climático y el incremento del nivel medio global del mar. Una metodología basada en escenarios prescritos por el IPCC y otra basada en escenarios definidos por los evaluadores son contrastadas, destacando sus carencias y ponderando nuevas formas de analizar los efectos del cambio climático en las costas, pasando de una evaluación de la vulnerabilidad de una sola parte del sistema costero (el entorno natural, por ejemplo) a la Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC).

Graham y Díaz (2001), estudian las evidencias de importantes cambios climatológicos relativos al invierno (diciembre - marzo) en el Océano Pacífico Norte durante los últimos 50 años, verificando la intensificación de eventos extremos e incrementos de la altura de olas asociadas a estos.

El **IPCC (2001b)**, argumenta en su tercera evaluación del cambio climático, que la temperatura promedio global de la superficie se ha incrementado $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ durante el siglo XX, con la mayor parte de este aumento ocurriendo entre los períodos 1910-1945 y 1976-2000. Añaden además una reducción del 10-15% en la cubierta de hielo durante el verano en el hemisferio norte desde 1950 y episodios calientes del fenómeno meteorológico conocido como “El Niño” (afectando las variaciones regionales de precipitación y temperatura en las áreas trópicas, subtropicas y algunas de mediana latitud) han sido más frecuentes, persistentes e intensos desde mediados de los 70s, en comparación con el siglo anterior. En lo que respecta a sus proyecciones futuras, para el 2100 estiman un incremento en la temperatura promedio global de la superficie de 1,4 a 5,8°C y un incremento del nivel medio global del mar de 0,09 a 0,88 metros para el escenario más optimista y pesimista respectivamente, justificando la reducción en las predicciones de esta última consecuencia en el uso de mejores modelos, los cuales dan una menor contribución de los glaciares y las láminas de hielo a este incremento.

Nicholls (2002), explora los impactos del incremento del nivel medio global del mar desde el punto de vista del incremento de inundación costera debido a mareas meteorológicas,

argumentando que varias naciones ignoran esta elevación en la planificación costera a largo plazo a pesar de que los niveles globales están ascendiendo lentamente.

McInnes et al. (2003), implementan una técnica para evaluar el riesgo por mareas meteorológicas bajo presentes y futuras condiciones asociadas al cambio climático en comunidades costeras, combinando modelos estadísticos para simular la ocurrencia de ciclones y la consecuente marea meteorológica provocada por estos. Sus resultados arrojan un incremento del doble del área inundada por una tormenta cuyo período de retorno sea mayor a 100 años en condiciones climáticas futuras que en las presentes.

Wang et al. (2004), estudian por medios de análisis de regresión lineal y análisis de extremos no estacionarios generalizado haciendo uso de un modelo de presiones en el nivel del mar, el incremento de la altura de ola significativa para las estaciones de otoño e invierno durante el siglo XXI para tres escenarios distintos de forzamientos climáticos en el Océano Atlántico Norte.

Hennecke (2004), analiza los cambios inducidos en las franjas costeras por el incremento del nivel medio global del mar, modelando su comportamiento en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Meehl et al. (2005), analizan los incrementos de temperatura de superficie y del nivel medio global del mar que se producirían aunque se hubiesen estabilizado las concentraciones de GEIs en la atmósfera en el año 2000. **Webster et al. (2005)**, luego de una revisión de 30 años de datos de fenómenos climáticos extremos, concluyen en que hay una tendencia creciente en la frecuencia e intensidad de estos, reconociendo que para atribuir esto al cambio climático se requiere un registro más largo y un mayor entendimiento del papel de estos fenómenos en la circulación general de la atmósfera y los océanos. **Alley et al. (2005)**, basados en rápidos cambios marginales en la contribución de las capas de hielo (mayoritariamente la de Groenlandia) al incremento del nivel medio global del mar, concluyen que podrían indicar una mayor sensibilidad de estas capas al calentamiento que la considerada anteriormente.

Church y White (2006), discuten que los registros de siglos anteriores y los modelos climáticos actuales indican una aceleración del incremento del nivel medio global del mar, reconstruyendo registros desde 1870 hasta 2004, en los cuales obtuvieron una elevación de 0,195 metros, una tasa de elevación para el siglo XX de $1,7 \pm 0,3$ mm/año con una aceleración de $0,013 \pm 0,006$ mm/año².

Allan y Komar (2006), estudian la erosión costera a lo largo de la costa oeste de los EE. UU., apuntando a un incremento en las alturas de olas durante los últimos 25 años que podría estar relacionado con el cambio climático y los fenómenos de “El Niño” y “La Niña”.

Rossoff y von Winterfeldt (2007), analizan las consecuencias económicas del cierre de los puertos de Los Ángeles y Long Beach.

El **IPCC (2007)**, en su cuarta evaluación del cambio climático, señala que la concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzó en el 2005 el valor de 379 partes por millón (ppm),

incrementándose en los últimos diez años a una tasa de 1,9 ppm/año. En lo que respecta a incrementos de temperatura de la superficie global, se cifra en $0,74 \pm 0,18^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, la tasa de incremento del nivel medio global del mar la sitúan en $1,8 \pm 0,2$ mm/año para el período 1961-2003 y $3,1 \pm 0,7$ mm/año de 1993 a 2003, con una estimación de la subida total para el siglo XX de $0,17 \pm 0,05$ metros. En sus estimaciones para el 2100, proyectan para su escenario más optimista un incremento de temperatura media global de 1,1 a $2,9^{\circ}\text{C}$ y una subida del nivel medio global del mar de 0,18 a 0,38 metros. Para su escenario más pesimista se proyectan incrementos de $2,4$ a $6,4^{\circ}\text{C}$ y 0,26 a 0,59 metros en temperatura y nivel medio global del mar respectivamente sin contar con las contribuciones de los glaciares y casquetes de hielo.

Rahmstorf (2007), presenta una relación semiempírica que conecta el incremento del nivel medio global del mar con la temperatura media de superficie global, proponiendo que para escalas de tiempo relevantes al calentamiento antropogénico, la tasa del incremento del nivel del mar es proporcional a la magnitud del calentamiento por encima de las temperaturas de los tiempos preindustriales, con una tasa de 3,4 mm/año por cada $^{\circ}\text{C}$ de incremento. Al proyectar esta relación al 2100 obtiene resultados de 0,5 a 1,4 metros por encima del nivel de 1990.

Poulter y Halpin (2008), investigan los efectos de la resolución horizontal, la conectividad y el ritmo con el que avanzan las inundaciones costeras debido al incremento del nivel medio del mar global mediante datos LiDAR en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Pfeffer et al. (2008), ponderan un incremento del nivel medio global del mar para 2100 de 0,8 a 2,0 metros como punto de partida para refinar las predicciones que toman en consideración las dinámicas del flujo de hielo. **Menéndez et al. (2008)**, estudian la variabilidad de la altura de ola significativa asociada a eventos extremos en la costa oeste de los EE. UU. y en el Océano Pacífico Noreste.

Solomon et al. (2009), demuestran la irreversibilidad del cambio climático por 1000 años luego de cesar completamente las emisiones de GEIs, ponderando además la pérdida de calor de los mares, la reducción en las concentraciones de CO_2 y unos umbrales de incremento del nivel medio global del mar (irreversibles también) según los niveles alcanzados en estas concentraciones, los cuales van de 0,4 a 1 metro para una concentración de 600 ppm y de 0,6 a 1,9 metros para una concentración que exceda las 1000 ppm.

Gesch (2009), señala la importancia de los datos espaciales y topográficos de alta resolución derivados de LiDAR para la identificación y delineación de zonas vulnerables al incremento del nivel del mar. En ese mismo año **Jevrejeva et al. (2009)**, estiman que el 25% del incremento del nivel del mar se debe a forzamientos naturales y el restante 75% a forzamientos antropogénicos.

Vermeer y Rahmstorf (2009), probando la relación planteada por **(Rahmstorf, 2007)** con datos sintéticos a partir de modelos climatológicos globales del milenio pasado y el próximo siglo aplicándolos a registros de nivel medio global del mar y temperatura para el período

1880-2000, proyectan un incremento del nivel medio global del mar de 0,75 a 1,90 metros para el período 1990-2100.

Nerem et al. (2010), discuten el progreso logrado en las mediciones con precisión del nivel medio global del mar mediante altimetría satelital iniciadas en 1993. Ensamblando todas las mediciones realizadas hasta el 2009, obtienen una tasa promedio de incremento de $3,4 \pm 0,4$ mm/año. **Nicholls y Cazenave (2010)**, concuerdan en que este incremento se acelerará durante el siglo XXI y que la aplicación y el éxito de la adaptación a este fenómeno representan grandes incertidumbres que requieren de más evaluación y consideración.

Nicholls et al. (2010), estudian el impacto económico de un incremento del nivel medio global del mar desde 0,5 hasta 2 metros a finales del siglo XXI mediante cuatro componentes distintos, estos son el valor del suelo seco perdido, el valor de humedales perdidos, el coste de la protección frente a niveles ascendentes del mar y los costes generados por desplazamientos poblacionales.

Moss et al. (2010), argumentan que las implicaciones que tendrá el cambio climático para el medio ambiente y la sociedad dependerán no solo de la respuesta del planeta a los forzamientos a los que está sometido, sino que también en como la humanidad responderá a través de cambios tecnológicos, económicos, sociales y políticos. En el marco de este análisis describen una serie de nuevos procesos para la creación de escenarios plausibles para investigar algunas de las cuestiones más desafiantes y relevantes del cambio climático, exponiendo los escenarios basados en las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en inglés), infiriendo que proveerán la base para el modelado de la próxima generación de escenarios.

Van Vuuren et al. (2011), describen el proceso de desarrollo y las características principales de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en inglés), cuatro nuevas trayectorias para modelar el clima basadas en distintos niveles de forzamiento radiativo para el clima global hasta el 2100.

Hallegatte et al. (2011), exponen la necesidad de la introducción de medidas de adaptación en la planificación urbana a largo plazo en ciudades portuarias como parte de una estrategia comprensiva en la gestión de las implicaciones del cambio climático.

Church y White (2011), comparan la subida del nivel medio global del mar desde finales del siglo XIX a principios del siglo XXI a través de datos altimétricos y observaciones in situ. **Zhang (2011)**, cuantifica aplicando una metodología basada en polígonos en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el impacto de procesos de inundación debido al incremento del nivel del mar.

Seymour (2011), señala que es probable que el cambio climático contribuya a los incrementos en la intensidad de las olas en el Océano Pacífico Norte.

Parris et al. (2012), proyectan escenarios globales de incrementos del nivel medio global del mar en un rango de 0,2 a 2 metros, reflejando distintos grados de calentamiento de los

océanos y pérdida de las masas de hielo para ser usados en evaluaciones climáticas en los EE. UU. **Esteban et al. (2012)**, estudian la estabilidad de diques en talud frente a mayores oleajes debido al incremento del nivel medio global del mar.

Tebaldi et al. (2012), analizan los efectos del incremento del nivel medio global del mar en niveles esperados de mareas meteorológicas y sus frecuencias en los EE. UU., estimando que niveles de inundación con probabilidades de retorno de siglos en adelante podrían reducirse a décadas, señalando la necesidad de considerar la no estacionariedad de eventos extremos al evaluar los riesgos de impactos climáticos adversos.

Chini y Stansby (2012), evalúan los efectos de la elevación del nivel medio global del mar en el rebase de obras de abrigo bajo diferentes escenarios de cambio climático, atribuyendo una mayor relevancia en este aspecto a la influencia de los cambios en los niveles del agua que los cambios en la altura de ola significativa.

Cooper et al. (2013), estudian los efectos del incremento del nivel del mar en islas y comunidades costeras por sus concentraciones demográficas en zonas de baja elevación. Mediante datos LiDAR cargados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), determinan las pérdidas económicas que se podrían producir de no tomarse estrategias de adaptación debido a la inundación por causas marinas y la provocada por la saturación del nivel freático.

Rohling et al. (2013), discuten la potencial subida del nivel medio global del mar desde una perspectiva geológica, proponiendo límites inferiores y superiores de incrementos de 0,9 a 1,8 metros respectivamente para el 2100.

El **IPCC (2013)**, en su quinta evaluación del cambio climático, confirma que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, con cada una de las últimas tres décadas siendo sucesivamente más caliente que cualquier década precedente desde 1850. Calcula que la temperatura global promedio en superficie se ha incrementado en $0,85 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ para el período 1880-2012. El aumento del nivel medio global del mar para el período 1901-2010 lo cifran en $0,19 \pm 0,2$ metros, con una tasa de incremento anual de $1,7 \pm 0,2$ mm/año entre 1901-2010, $2,0 \pm 0,3$ mm/año entre 1971-2010 y $3,2 \pm 0,4$ mm/año entre 1993-2010. En lo que respecta a las concentraciones de GEIs, dígase dióxido de carbono, metano y óxido nítrico, sitúan su presencia en 391 ppm, 1803 y 324 partes por billón (ppb) respectivamente, excediendo sus niveles preindustriales por 40, 150 y 20% respectivamente. En sus estimaciones para el 2100 (relativas al período 1986-2005), haciendo uso de los escenarios RCPs descritos por **(van Vuuren et al., 2011)**, proyectando para su escenario más optimista un incremento de temperatura media global de $0,3$ a $1,7^{\circ}\text{C}$ y una subida del nivel medio global del mar de $0,26$ a $0,55$ metros. Para su escenario más pesimista proyectan incrementos de $2,6$ a $4,8^{\circ}\text{C}$ y $0,52$ a $0,98$ metros para temperatura y nivel medio global del mar respectivamente.

Lee et al. (2013), estudian la seguridad frente al remonte de las olas y la estabilidad del manto en estructuras costeras inclinadas para varios escenarios de incremento del nivel medio global del mar. **Isobe (2013)**, estudia la estabilidad de diques en talud frente al remonte y

rebase de olas afectadas por el incremento del nivel medio global del mar. **Sekimoto et al. (2013)**, proponen un criterio basado en la máxima altura de ola permisible, para evaluar el desempeño de obras costeras en la implementación de estrategias de adaptación al cambio climático.

Grifman et al. (2013), cifran el valor de los bienes expuestos a la inundación costera producto del incremento del nivel medio global del mar en los puertos de Los Ángeles y Long Beach en \$4.880 millones, con un coste diario para toda la región por el cierre de sus operaciones de \$1.000 millones de dólares.

Burcharth et al. (2014), presentan una primera aproximación a la mejora y recrecimiento de un dique en talud frente a las predicciones sobre el incremento del nivel medio global del mar, señalando la importancia de realizar modelos físicos de estas estructuras debido a la insuficiencia de herramientas para llevar a cabo estas mejoras. **Johnston et al. (2014)**, evalúan la vulnerabilidad de infraestructuras costeras frente al incremento del nivel medio global del mar mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la implementación de un análisis multicriterio.

Kopp et al. (2014), mediante proyecciones probabilísticas señalan incrementos muy probables del nivel medio global del mar hasta el año 2200 de 0,3 hasta 3,7 metros. **Jevrejeva et al. (2014)**, sugieren mediante una función de densidad de probabilidad del nivel medio global del mar en 2100, que existe un 95% de probabilidad de no excedencia de incrementos mayores a los 1,8 metros.

Paolo et al. (2015), presentan mediante datos satelitales que los bancos de hielo en varias regiones bordeando la Antártida están perdiendo masa, pudiendo influir en los flujos de descarga de hielo hacia los océanos, contribuyendo al incremento del nivel medio global del mar según el calentamiento vaya en aumento. **Xiao et al. (2015)**, desarrollan un modelo económico integrado para el análisis de inversiones para la prevención de desastres en un puerto landlord, considerando aspectos tales como la incertidumbre, la acumulación de información y el tiempo apropiado para su ejecución.

Esteban et al. (2015), discuten que una aceleración en la tasa de incremento del nivel medio global del mar requerirá una evaluación más detallada de los riesgos y del mantenimiento de diques en talud que en el presente, evaluando también los costes promedio para secciones típicas de estas obras basándose en distintos escenarios.

Kopp et al. (2016), presentan la primera reconstrucción del nivel medio global del mar basada en la integración estadística de una base de datos global de reconstrucciones de niveles relativos del mar, indicando proyecciones de incrementos del nivel del mar para el 2100 de 0,24 a 1,31 metros.

Hall et al. (2016), realizan una evaluación de vulnerabilidad e impactos en instalaciones costeras del Departamento de Defensa de los EE. UU. basados en incrementos del nivel medio global del mar de 0,2 a 2,0 metros, posteriormente regionalizando estos valores.

Sierra et al. (2016), estudian los incrementos de las descargas de rebase en diques, basadas en tres escenarios de incrementos del nivel medio global del mar y tomando en consideración distintas condiciones extremas.

Sweet et al. (2017), proyectan para los EE.UU. un rango de escenarios de incrementos del nivel medio global del mar que van desde 0,3 hasta 2,5 metros para el 2100 e incluyen además la regionalización de esta elevación para toda la línea costera de la nación. **Sierra et al. (2017)**, modelan el impacto del cambio climático en la operatividad del Puerto de Barcelona, analizando la agitación en sus dársenas y concluyendo que el incremento del nivel medio global del mar y el incremento en profundidad asociado favorecerá la penetración de olas en el puerto, pudiendo conducir a una reducción en su operatividad.

Toimil et al. (2017), en el marco de la Estrategia de Adaptación de la Costa Española al Cambio Climático, proponen una metodología basada en el modelado de inundaciones producto de múltiples forzamientos, aplicándola en la costa de Asturias.

Vousdoukas et al. (2018), presentan proyecciones probabilísticas de niveles extremos del mar para el presente siglo tomando en consideración cambios en el nivel medio global, las mareas, el oleaje y las storm surges para distintos escenarios, señalando niveles de riesgo de inundación sin precedentes para la mayoría de las costas a nivel mundial debido al aumento de la frecuencia de eventos de este tipo con una tasa de retorno de 100 años.

Aerts et al. (2018), analizan los potenciales efectos del incremento del nivel medio global del mar en el condado de Los Ángeles y describen trayectorias de adaptación y estimaciones de costes asociados a estas para incrementos que van desde 0,3 a 2 metros para el año 2100.

Hall et al. (2018) siguiendo la metodología planteada por **(Kopp et al., 2014)**, señalan incrementos del nivel medio global del mar para la región de Los Ángeles en el rango de 0,25 a 2,30 metros para el año 2100.

Camus et al. (2019), proponen una metodología probabilística para evaluar la influencia del cambio climático en la óptima explotación de un puerto durante su vida útil bajo varios escenarios de incremento del nivel medio global del mar.

II.2 El oleaje

El oleaje es el mecanismo natural más importante en la mayoría de los procesos costeros, y verdadero escultor de las formas costeras tanto en planta como en perfil. Generado por el viento su importancia radica en los fenómenos que se producen en el momento de la rotura de este sobre la costa. Dicha rotura produce no solo la suspensión de los materiales más finos, sino que genera una serie de corrientes paralelas y transversales a la costa de gran intensidad que son las causantes de que se realice el transporte sólido de los sedimentos costeros.

En esta generación de corrientes influyen tanto el oleaje como la topografía submarina, siendo importantes los fenómenos locales de refracción y difracción del oleaje, como

modificantes de las características de este. Al incidir el oleaje sobre la costa se producen dos hechos muy importantes:

- La refracción del oleaje, que modifica la orientación de la propagación de este.
- La rotura, que extingue el mismo.

II.2.1 Clasificación de las ondas del mar

En general, una onda se define como una perturbación periódica o cuasiperiódica de una cierta magnitud física que evoluciona en el tiempo y/o el espacio. En el mar se producen dos tipos esenciales de ondas:

- **Internas:** son ondas que se refieren a movimientos de las capas profundas de las masas de agua oceánicas.
- **De superficie:** son ondas que constituyen los movimientos de la superficie del mar. Afectan a las variables esenciales necesarias para el diseño de obras marítimas y a los procesos marítimos y litorales más importantes. Son de enorme interés tanto en ingeniería civil como en el medio ambiente.

Estas ondas de superficie suelen clasificarse genéricamente de acuerdo con sus períodos característicos (T) en:

- onda capilar $T < 0,1$ s.
- onda de ultragravedad $0,1 \text{ s} < T < 1$ s.
- onda de gravedad u oleaje $1 \text{ s} < T < 30$ s.
- onda de infragravedad $30 \text{ s} < T < 300$ s.
- onda de largo periodo $300 \text{ s} < T < 24\text{h}$.
- onda de marea astronómica $T \approx 12\text{h}, 24\text{h}$.
- onda transtidal $T > 24\text{h}$.

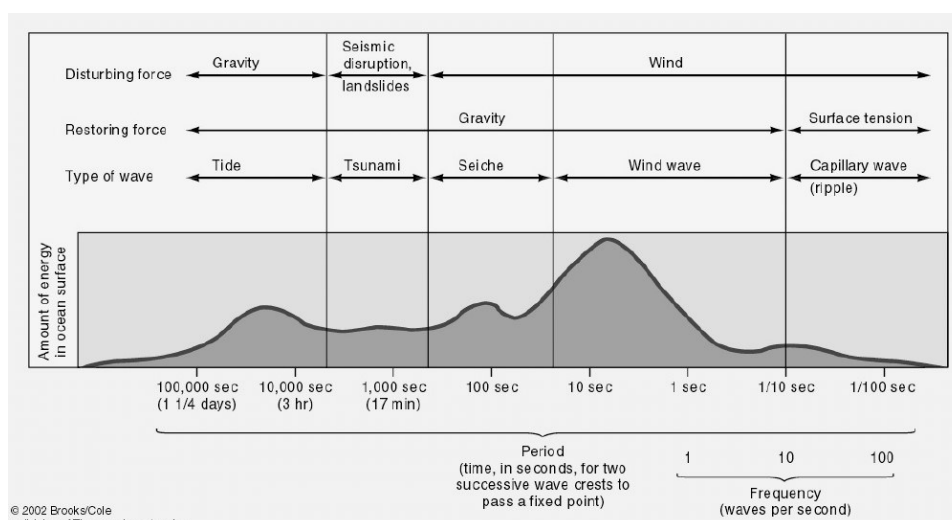


Figura 11 - Clasificación de ondas de superficie en función de su período característico

Del mismo modo, las ondas de superficie se pueden clasificar en función de la fuerza perturbadora que genera la oscilación o de la fuerza restauradora que colabora en el mantenimiento de la oscilación.

Por el origen de la fuerza perturbadora o generadora de la oscilación:

- **Oleaje:** fluctuación del viento.
- **Marea meteorológica:** fricción del viento y presión atmosférica.
- **Maremoto (tsunamis):** terremotos, explosiones submarinas, deslizamientos, entre otros.
- **Marea astronómica:** atracción del Sol y/o la Luna.

Por el origen de la fuerza restauradora o colaboradora en el mantenimiento de la oscilación:

- **Tensión superficial.**
- **Gravedad.**
- **Coriolis.**

II.2.1.1 Oleaje de viento

El oleaje de viento es la oscilación típica que se observa en la costa. Con esta se propaga fundamentalmente la perturbación. Se distinguen dos tipos fundamentales de este oleaje de viento:

- **Oleaje tipo “sea” o mar de viento:** oleaje que se forma y desarrolla en una superficie líquida bajo la acción directa y continua del viento, generándose olas elementales de altura, periodo, fase y dirección de propagación aleatorias e independientes, cuya interferencia da lugar a un aspecto caótico de la superficie líquida. El oleaje tipo sea presenta generalmente ondas muy peraltadas con periodos y longitudes de onda pequeños, aunque en una amplia gama de frecuencias.
- **Oleaje tipo “swell” o mar de fondo:** oleaje que abandona el área de generación y se propaga a través de superficies marítimas sin estar sometido a la acción significativa del viento, y por lo tanto atenuándose progresivamente hasta su completa extinción. El oleaje tipo swell presenta olas menos peraltadas que el oleaje tipo sea, con periodos y longitudes de onda grandes en una gama estrecha de frecuencias. Da lugar, en general, a un aspecto ordenado y regular de la superficie líquida.

II.2.1.2 Marea astronómica

La marea astronómica se define como el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar con periodos próximos a las 12 horas (marea semidiurna) o 24 horas (marea diurna) que se producen por los efectos gravitacionales del sistema tierra-luna-sol. Al máximo nivel de esta oscilación se le conoce como pleamar y al mínimo como bajamar. La diferencia entre el máximo y mínimo se denomina carrera de marea.

Cuando la carrera de marea se encuentra en un máximo se dice que se trata de una marea viva, en el caso de encontrarse en un mínimo se dice que se trata de una marea muerta. Las

mareas vivas ocurren en luna llena y nueva, teniendo lugar realmente cada catorce días, mientras que las muertas, con la misma periodicidad, se producen cuando la luna está en fase de cuarto creciente o menguante. El máximo de las mareas vivas se denomina marea viva equinoccial, teniendo lugar en los equinoccios, en primavera y otoño, dándose la carrera máxima anual.

II.2.1.3 Marea meteorológica

Se le llama marea meteorológica (storm tide, en inglés) a la suma de la marea astronómica predicha más el incremento anormal de los niveles de los mares y océanos generados por fenómenos meteorológicos extremos (storm surge, en inglés) tales como huracanes, tifones y tormentas menos potentes pero persistentes.

Las mareas meteorológicas son particularmente dañinas cuando ocurren en el momento de la pleamar, combinando los efectos de la marejada y la marea. Esto aumenta la dificultad de predecir la magnitud de una marea meteorológica, dado que requiere predicciones meteorológicas muy precisas en pocas horas.

El efecto principal es el viento con dirección constante que produce una corriente horizontal de agua que en la costa hace elevar el nivel medio del mar en el caso de un viento soplando en dirección a la costa; en el caso de un viento soplando hacia el mar abierto desde tierra el efecto será el contrario provocando un descenso del nivel del mar.

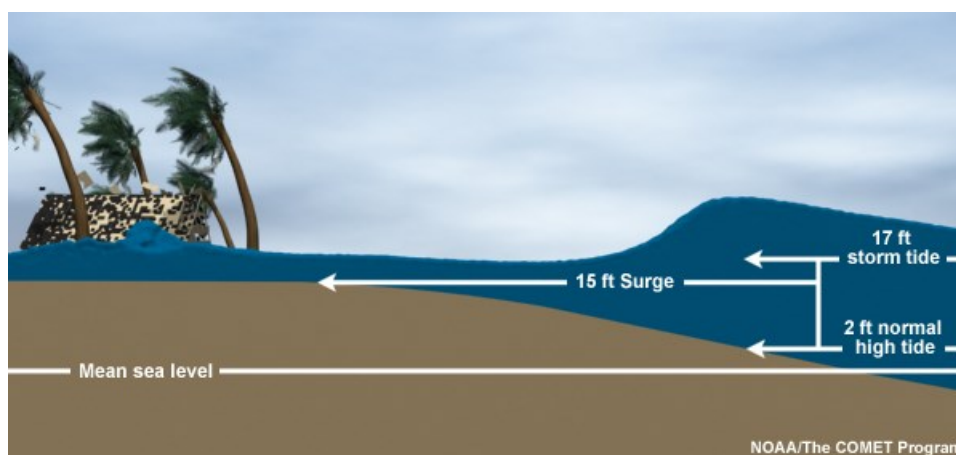


Figura 12 - Representación de la marea meteorológica y sus componentes (NOAA - NHC, 2019)

II.2.1.4 Maremoto

Los maremotos o tsunamis son ondas superficiales asociadas a un desplazamiento repentino de la columna de agua debido a diversos mecanismos catalizadores incluyendo terremotos, erupciones volcánicas, desprendimientos de laderas, impactos cósmicos y perturbaciones atmosféricas (Röbke & Vött, 2017).

Erróneamente llamados “oshio” al principio (marea alta, en japonés), más adelante se introduce el termino tsunami que significa “onda de puerto” debido a que no se perciben en el mar abierto por su gran longitud de onda. Son muy destructivos formando gran parte de

su fuerza mientras se aproximan a la costa debido al asomeramiento que experimentan las olas por los cambios en la profundidad del fondo marino (Röbke & Vött, 2017).

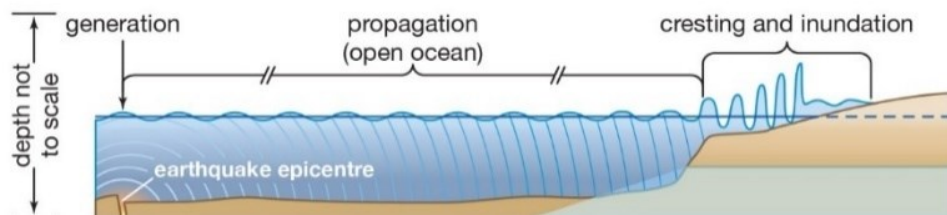


Figura 13 - Propagación de un tsunami hacia la costa (Encyclopædia Britannica, 2019)

II.2.1.5 Seiches

Son ondas estacionarias que se producen comúnmente en masas de agua encerradas tales como puertos, lagos, bahías y aguas costeras al propagarse una perturbación u onda procedente de aguas abiertas, provocando resonancia en la superficie abrigada. Estas ondas pueden ser causadas por la perturbación directa del cuerpo de agua por las mareas y por procesos meteorológicos, sísmicos u otros e indirectamente por procesos que se producen en aguas abiertas y que se propagan a través de la plataforma costera y las bocanas de los puertos (Chapman & Giese, 2019).

II.2.2 Remonte

El remonte se define como la máxima (run-up) y mínima (run-down) altura respectivamente, medida desde el nivel medio de la superficie libre del agua en reposo, hasta la intersección entre la línea que define el talud del dique y la superficie libre (Mares Nasarre, 2017).

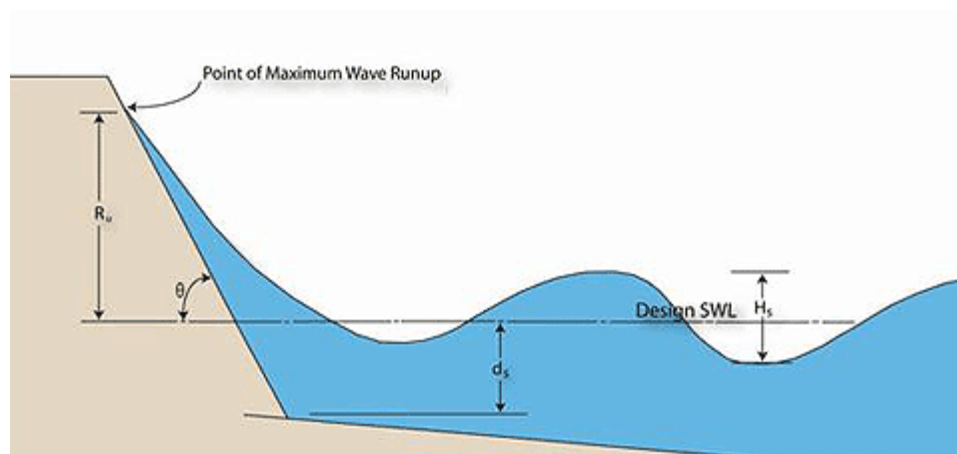


Figura 14 - Esquemmatización del remonte

II.2.3 Rebase

El rebase (overtopping) es la medida de caudal de agua por metro lineal que sobrepasa la coronación del dique. Para que se produzca será necesario que la cota de coronación de la

obra sea inferior a la altura alcanzada por el remonte sobre el nivel medio del mar (Mares Nasarre, 2017).

En función del volumen de agua que sobrepasa la estructura, existen diferentes tipos de rebase (Van der Meer et al., 2018):

- **Green water:** este rebase se da cuando una lámina de agua continua sobrepasa la coronación del dique.
- **Splash:** ocurre cuando el agua que rebasa la estructura es producto de la salpicadura provocada por la rotura de la ola en el frente del dique.
- **Spray:** se da cuando el agua que rebasa la estructura es consecuencia de la acción del viento sobre las crestas de las olas en el pie de la estructura.

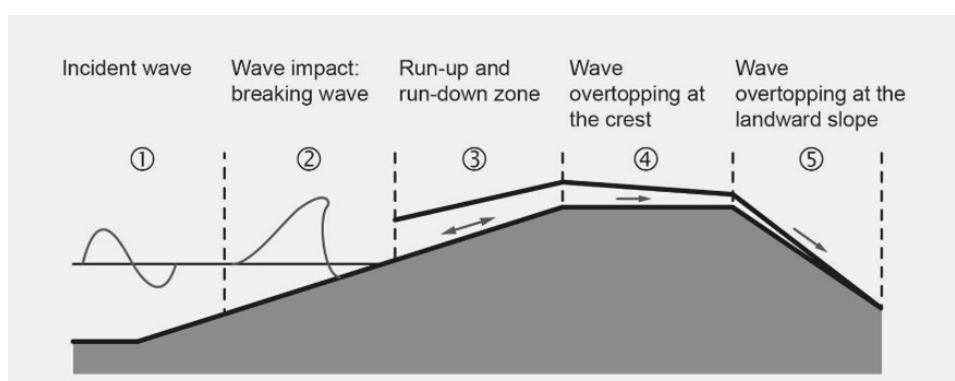


Figura 15 - Esquemmatización del rebase en un dique en talud (Van der Meer et al., 2018)

II.3 Obras marítimas

Las obras marítimas son aquellas sobre las que actúa el mar o están relacionadas con embarcaciones y áreas de navegación.

Atendiendo a su localización las obras marítimas se clasifican en:

- **Obras exteriores:** en zonas alejadas de la costa y a gran profundidad.
- **Obras costeras:** en la zona litoral, a poca profundidad y sometidas a la acción del oleaje continuamente.
- **Obras interiores:** situadas en zonas abrigadas, no sometidas a la acción del oleaje.

II.3.1 Obras exteriores

Están situadas a gran profundidad, expuestas al oleaje, corrientes marinas y acciones sobre la plataforma continental.

En los últimos años, este tipo de obras ha experimentado una fuerte expansión gracias al aumento del precio de los productos petroleros, constituyendo la tecnología off-shore. Aunque es una faceta reciente de la Ingeniería Marítima, es indudable que su importancia económica la ha hecho en algunos países (petroleros) el tema más importante de

investigación. Dentro de estas obras se destacan las conducciones submarinas, estructuras exteriores de atraque, de exploración y de explotación.

II.3.2 Obras costeras

Son obras situadas en la franja litoral y a poca profundidad, por lo que reciben la acción directa del oleaje. Modifican con su presencia los procesos litorales. Estas a su vez pueden ser:

- **De abrigo:** su objeto es reducir la intensidad del oleaje en una zona. Se persigue el abrigo para permitir generalmente el resguardo de estructuras flotantes, el amarre, carga y descarga y cualquier operación naval que precise calma (desembarco). Obras típicas de abrigo son los diques rompeolas (talud de escollera o de piezas de hormigón especiales), diques reflejantes, diques mixtos, rompeolas flotantes y sistemas neumáticos e hidráulicos.
- **De estabilización, defensa y regeneración:** cuyo objeto es modificar los procesos litorales, regenerar costas, estabilizar bocanas o como complemento de instalaciones portuarias. En esta clasificación podemos encontrar defensas de ribera, espigones transversales, diques exentos y sumergidos, by-pass de arenas y espigones de encauzamiento.
- **De señalización:** este tipo de obras están constituidas por diversos sistemas en tierra y flotantes, para la ordenación y seguridad de la navegación. Estos sistemas pueden ser del tipo radioeléctricos, luminosos, diurnos y acústicos.
- **De dragados:** dedicadas a la excavación de materiales bajo el nivel de las aguas.
- **De atraque y amarre:** cuando se realizan en zonas expuestas a la acción del oleaje, solo podrán realizarse operaciones si este es poco intenso.
- **De conducciones.**

II.3.3 Obras interiores

Son obras en zonas abrigadas o no, sometidas a la acción del oleaje, tales como obras de acceso a zonas de atraque y amarre u obras de servicio y seguridad.

- **Obras de atraque y amarre:** Permiten la aproximación del buque para realizar operaciones de transbordo de mercancías o personas, avituallamiento, etc. Estos pueden ser muelles, pantalanes, duques de alba, boyas, campos de boyas y monoboyas, soluciones mixtas y estaciones de transferencia a flote.
- **Obras de servicio a embarcaciones:** Son instalaciones para la construcción, mantenimiento y reparaciones de estructuras flotantes tales como gradas y varaderos, esclusas y diques secos y flotantes.

II.4 Diques en talud

Los diques en talud son la tipología de obra de abrigo que tenemos presente en nuestro ámbito de estudio. Estos diques (con o sin superestructura) ofrecen al oleaje un paramento rugoso de materiales sueltos en talud que provoca la rotura del oleaje. Son diques más fáciles de construir, siendo especialmente apropiados para emplazamientos de poca profundidad, oleajes intensos y fondos marinos heterogéneos y de mala calidad.

La función principal del dique en talud es reducir la acción del oleaje en una zona y facilitar operaciones de atraque, amarre, carga y descarga provocando la rotura del oleaje. Los diques en talud tradicionales constan de las siguientes partes fundamentalmente (Mares Nasarre, 2017):

- **Núcleo:** es la estructura de soporte del dique y del manto de protección, siendo así por tanto de vital importancia su cimentación. Se encuentra constituido por materiales sueltos todo-uno de cantera. Cabe destacar la importancia de la permeabilidad de esta parte del dique, pues condiciona tanto la estabilidad del dique como las elevaciones de agua que van a producirse sobre el mismo. Esto es, a mayor paso de agua, mayor estabilidad y menores elevaciones sobre el talud. Esta característica también es condicionante para la transmisión de la energía del oleaje al intradós.
- **Capas de filtro:** capas intermedias constituidas por escolleras de tamaño inferior al de los elementos del manto y superior a los elementos del núcleo. Su finalidad es evitar que el material que forma el núcleo escape a través de los huecos de las capas exteriores.
- **Manto de protección:** el manto principal tiene como objetivo proteger al dique de la rotura del oleaje y se encuentra constituido por escollera o elementos de hormigón de gran tamaño, denominados armour units dispuestos en una o varias capas.
- **Espaldón:** es un elemento de hormigón en masa situado sobre la coronación del dique, reduce el rebase y facilita el acceso a las instalaciones.
- **Berma de pie:** situada en la parte inferior del manto constituido por escollera o piezas fabricadas de hormigón. Su función es evitar la socavación y erosión de la cimentación.

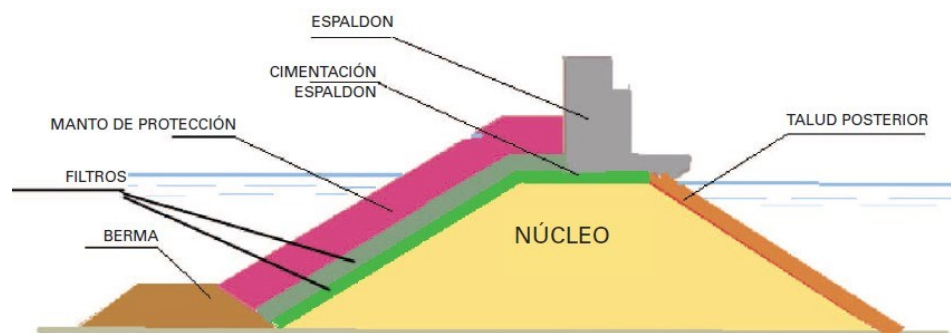


Figura 16 - Esquema de sección tipo de un dique en talud (Grau, 2008)

II.5 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Según Kang-Tsung (2007), un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en español e inglés respectivamente) es un sistema computacional para la captura, almacenamiento, consulta, análisis y visualización de datos geospaciales en un ordenador o entorno computacional. Estos datos, llamados también datos georreferenciados, describen tanto la localización como las características de objetos espaciales tales como vías de comunicación, parcelas y vegetación en la superficie terrestre.

Esta habilidad de los SIG, dígase el manejo y procesamiento de estos datos, es lo que los distingue de otros sistemas de información, posicionándolos como una herramienta tecnológica de importancia para analistas de mercados, ingenieros del medio ambiente y planificadores urbanos y regionales.

Los mapas realizados en un SIG están compuestos de capas o colecciones de objetos geográficos que son parecidos entre sí y están definidos por una simbología con el objetivo de crear una jerarquía de capas en el medio visual. Estos objetos tienen un sinnúmero de variedad de formas, sin embargo, solo se pueden representar de tres formas geométricas distintas. Este conjunto de datos colectivamente recibe el nombre de datos vectoriales, pudiendo ser según Law y Collins (2015) de la manera siguiente:

- **Polígonos:** estos representan objetos lo suficientemente grandes para ser delimitados o tener fronteras, tales como países, lagos y parcelas.
- **Líneas:** representan objetos relativamente pequeños para ser considerados polígonos, dentro de estos podemos encontrar ríos, vías de comunicación y sistemas de tuberías.
- **Puntos:** son utilizados para señalar elementos tales como ciudades, edificios e hidrantes.

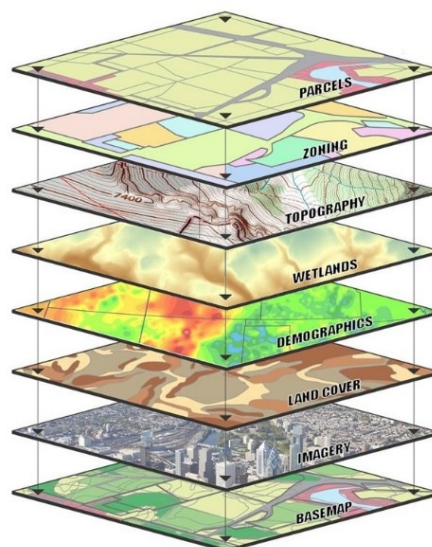


Figura 17 - Estructura de visualización de datos en un SIG, estableciendo una jerarquía desde las capas superiores hasta las inferiores (USGS, 2019)

Al contrario de países o ríos, los accidentes y fenómenos naturales, tales como las elevaciones, pendientes, temperaturas y precipitaciones no poseen una forma distintiva. Lo que sí tienen son valores cuantificables para cualquier locación en el globo terráqueo. Fenómenos geográficos de este tipo son más fáciles de representar como superficies en vez de objetos.

El tipo más común de superficie es la ráster, esta es una matriz de celdas cuadradas de idéntico tamaño. Cada celda representa un valor, usualmente una cantidad, como elevaciones, por ejemplo.

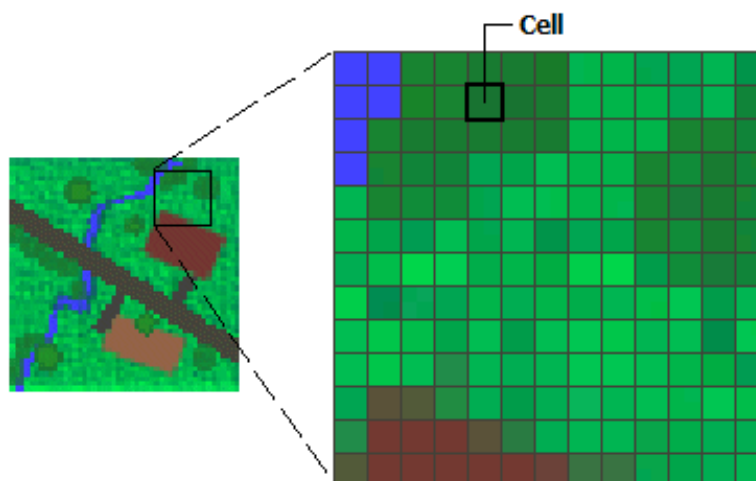


Figura 18 - Estructura de un ráster (Esri, 2019)

Una gran variedad de datos usados en los SIG está codificada en formato ráster. Estos a su vez pueden ser imágenes satelitales, ortofotos aéreas, mapas escaneados, Modelos Digitales de Elevación (MDE o DEM, por sus siglas en español e inglés respectivamente), datos LiDAR, entre otros (Kang-Tsung, 2007).



Figura 19 - Ráster representando elevaciones, sombras y pendientes para una misma zona (Law & Collins, 2015)

II.6 Cambio climático global

II.6.1 El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en su artículo 1, define el cambio climático como el “cambio de clima atribuido directa o

indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”, (Pachauri, Meyer, & Redacción, 2014). Diferenciando de esta forma, entre:

- El cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica.
- Y la variabilidad del clima atribuible a causas naturales.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) fue creado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 1988, con la finalidad de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica pertinente para la comprensión del riesgo de cambio climático inducido por los seres humanos (Davidson & Metz, 2000). Desde su creación, el IPCC ha preparado y publicado cinco informes de varios volúmenes, proporcionando a los responsables de políticas las evaluaciones científicas y técnicas más autorizadas y objetivas en el ámbito del cambio climático y el medio ambiente.

En 1990, el IPCC publica su primer informe, en el cual declara con seguridad que existe un efecto invernadero natural que hace que la Tierra sea más cálida de lo que sería en caso de no existir este efecto. De la misma forma afirma que las emisiones producidas por las actividades humanas aumentan sustancialmente las concentraciones atmosféricas de los Gases de Efecto Invernadero (GEIs), estos son el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos (CFCs), potenciando el efecto invernadero, produciendo un calentamiento adicional de la superficie de la Tierra (J. Houghton, Izrael, & Reinstein, 1992).

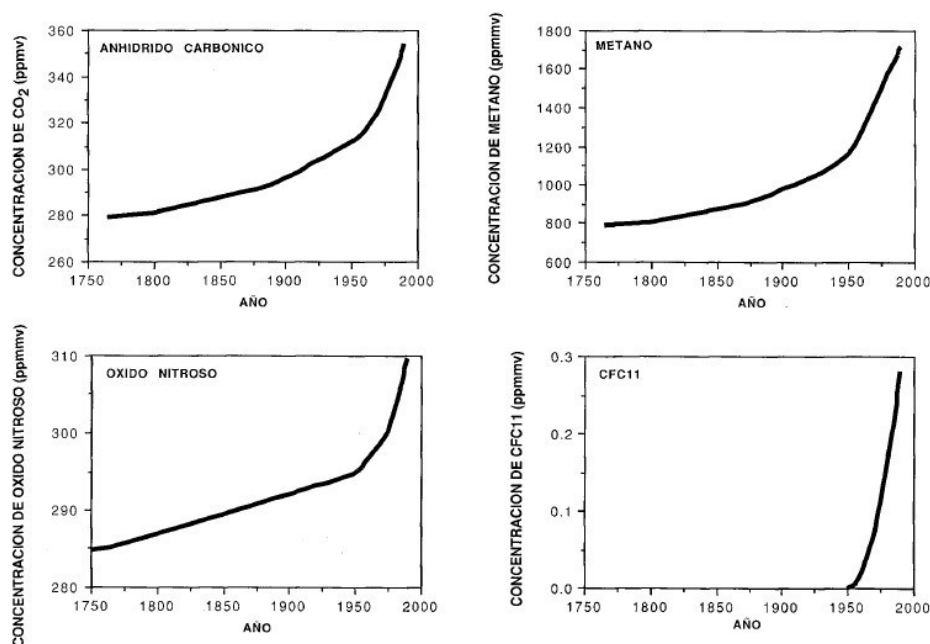


Figura 20 - Evolución de las concentraciones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos en la atmósfera desde el siglo XVIII (J. T. Houghton et al., 1990)

Con el objetivo de trazar proyecciones sobre la evolución de este calentamiento, se desarrollaron cuatro escenarios de emisiones futuras, que van desde la adopción de escasas o ninguna medida para frenar las emisiones, esto es, el Escenario A, o “de seguir todo como hasta ahora”, hasta otros supuestos basados en niveles de control crecientes, denominados Escenarios B, C y D, respectivamente. Estos escenarios y sus variables se introducen en los modelos de circulación mundial (GCM, por sus siglas en inglés) para realizar un análisis futuro de la concentración de GEIs en la atmósfera (J. Houghton et al., 1992).

Sobre la base de los resultados de dichos modelos, el IPCC formula los siguientes posibles impactos del cambio climático (J. Houghton et al., 1992):

- Una duplicación efectiva del dióxido de carbono en la atmósfera entre 1990 y los años 2025-2050.
- Un aumento consiguiente de la temperatura media mundial de entre 1,5°C y 4,5°C.
- Una distribución desigual del aumento de la temperatura mundial, que sería menor (la mitad del incremento medio) en las regiones tropicales, y mayor (el doble del incremento medio) en las regiones polares.
- Una elevación del nivel medio global del mar con significativas variaciones regionales de aproximadamente 0,30 a 0,50 m para el año 2050 y de aproximadamente 1 m para el año 2100, junto con una elevación de temperatura de la capa superficial del océano de entre 0,2°C y 2,5°C. El efecto más severo al que daría lugar esta elevación se produciría con la ocurrencia de temporales y la consiguiente marea meteorológica a su paso, cuya magnitud también podría verse afectada por el cambio climático.

Estimaciones sobre la expansión térmica de los océanos y el incremento de la tasa de derretimiento de los glaciares en zonas montañosas y en Groenlandia Occidental durante el último siglo demuestran que la mayor parte de esta elevación parece estar relacionada con el calentamiento observado. Esta conexión aparente entre el aumento observado del nivel medio del mar (1 a 2 mm/año) y el calentamiento global sienta una base para creer que el calentamiento futuro conducirá a una aceleración de la subida del nivel del mar (J. T. Houghton et al., 1990).

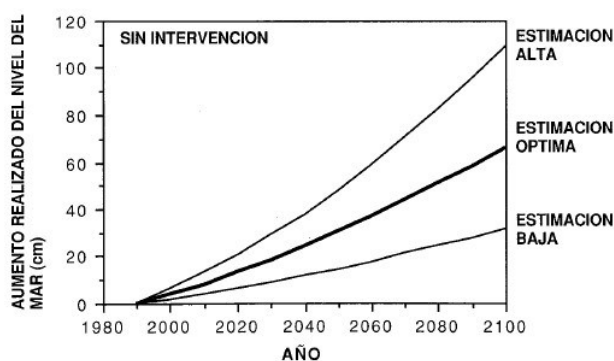


Figura 21 - Aumento predicho del nivel medio global del mar según el Escenario A. Estimación óptima, y margen de variación (J. T. Houghton et al., 1990)

En lo que respecta a esta subida, se prevé que en los próximos 100 años los efectos de los bancos de hielo del Antártico y de Groenlandia sean pequeños pero estos pueden contribuir de manera importante a la incertidumbre de las predicciones (J. T. Houghton et al., 1990).

II.6.1.1 5.º Informe del IPCC (2013)

En su quinto y más reciente informe, el IPCC afirma que la influencia humana en el sistema climático es clara. Los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales, con un calentamiento inequívoco y cambios sin precedentes en los últimos decenios a milenios, indicando la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos a estos cambios.

Cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. Es muy probable que el período comprendido entre 1983 y 2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 800 años en el hemisferio norte, donde es posible realizar una evaluación de ese tipo, y es probable que ese período haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1.400 años.

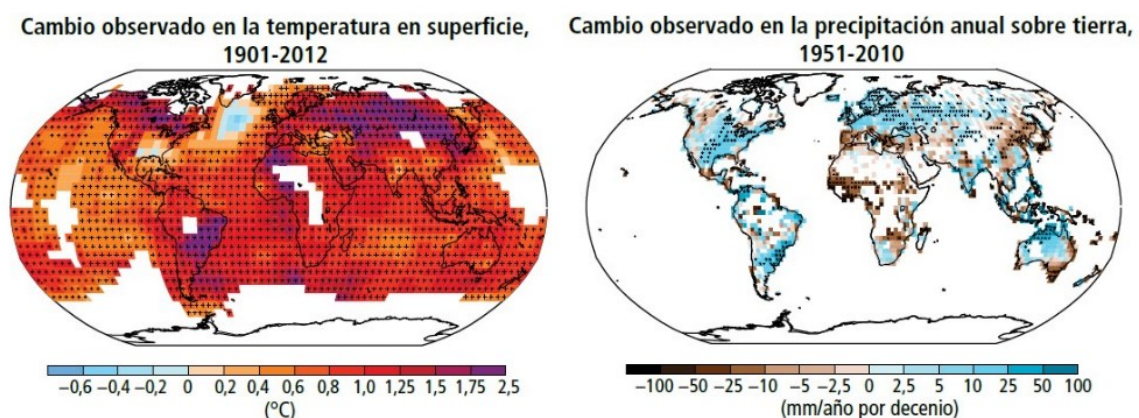


Figura 22 - Cambios observados en la temperatura en superficie y precipitación anual sobre tierra entre 1901-2012 y 1951-2010 respectivamente (Pachauri et al., 2014)

Las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico, y actualmente son mayores que nunca. Como consecuencia, se han alcanzado unas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sin comparación en por lo menos los últimos 800.000 años. Los efectos de las emisiones, así como de otros factores antropógenos, se han detectado en todo el sistema climático y es sumamente probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX.

Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios han sido asociados con influencias humanas, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, el

aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos globales del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones.

Es probable que existan más regiones en las que haya aumentado el número de sucesos de precipitaciones intensas que en las que haya disminuido. La reciente detección de una tendencia creciente en las precipitaciones y caudales extremos en algunas captaciones conlleva mayores riesgos de inundación a escala regional.

Es probable que los niveles del mar extremos (por ejemplo, los que se producen con las mareas meteorológicas) hayan aumentado desde 1970, principalmente como consecuencia del aumento del nivel medio global del mar.

Durante el período 1901-2010, el nivel medio global del mar se elevó 0,19 (0,17 a 0,21) m. Desde mediados del siglo XIX, el ritmo de la elevación del nivel del mar ha sido superior a la media de los dos milenios anteriores.

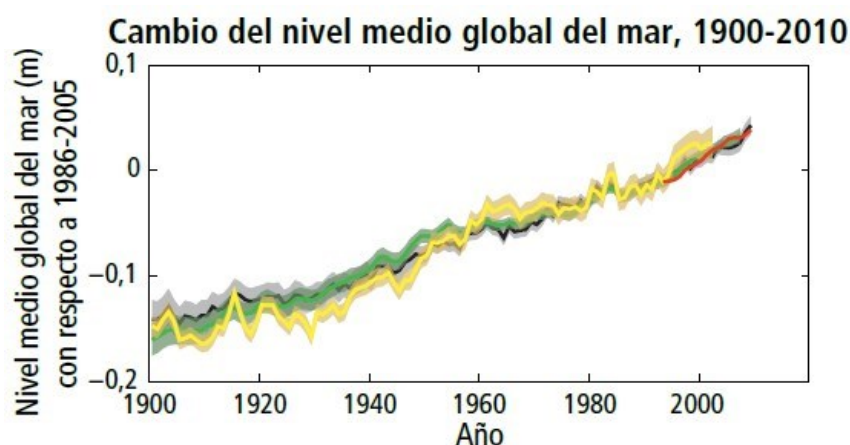


Figura 23 - Nivel medio global del mar con respecto al promedio del conjunto de datos de más larga duración entre 1986 y 2005, y con todos los conjuntos de datos alineados para tener el mismo valor en 1993, primer año de datos de altimetría por satélite (Pachauri et al., 2014)

Es muy probable que la tasa media de elevación promediada del nivel medio global del mar haya sido de 1,7 (1,5 a 1,9) mm/año entre 1901 y 2010, y de 3,2 (2,8 a 3,6) mm/año entre 1993 y 2010. Los datos recogidos con mareógrafos y altímetros satelitales coinciden en que en este último período la tasa fue más alta.

Desde principios de la década de 1970, la combinación de la pérdida de masa de los glaciares y la expansión térmica del océano provocada por el calentamiento dan razón de aproximadamente el 75% de la elevación observada del nivel medio global del mar.

Durante el período 1993-2010, la elevación del nivel medio global del mar coincide, con la suma de las contribuciones observadas de la expansión térmica del océano debida al calentamiento y de los cambios en los glaciares, en el manto de hielo de Groenlandia, en el manto de hielo de la Antártida y en el almacenamiento terrestre de agua.

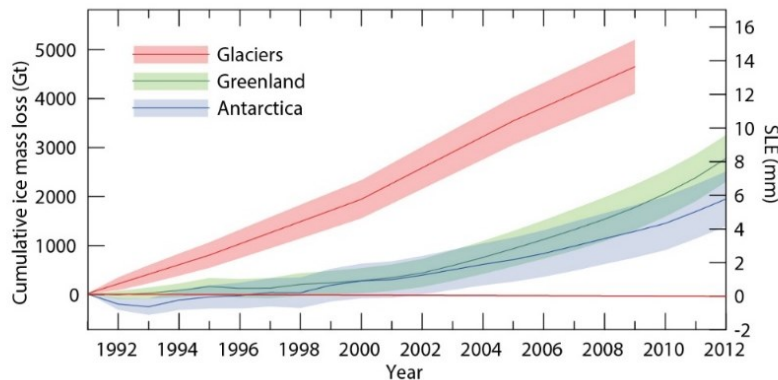


Figura 24 - Evaluación de la pérdida total de hielo de los glaciares y capas de hielo en términos de masa (Gt) y su equivalente en términos del nivel del mar (mm) (Pachauri et al., 2014)

Los impactos de los recientes fenómenos extremos conexos al clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales, ponen de relieve una importante vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática.

La emisión continua de gases de efecto invernadero causará un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas.

Para contener el cambio climático sería necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual, junto con la adaptación, puede limitar los riesgos del cambio climático.

Las emisiones acumuladas de CO₂ determinarán en gran medida el calentamiento medio global en superficie a finales del siglo XXI. Las proyecciones de las emisiones de gases de efecto invernadero presentan un amplio margen de variación, dependiendo principalmente del tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática de las naciones.

A partir de este informe, el IPCC introduce formalmente cuatro nuevos escenarios de cambio climático basados en las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en inglés) descritas por Moss et al. (2010) y Van Vuuren et al. (2011).

Estos escenarios hacen sus estimaciones basados en los factores mencionados anteriormente, describiendo cuatro trayectorias distintas en el siglo XXI de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (en ppm), las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso del suelo.

Escenario	Forzamiento radiativo (Wm ⁻²)	Concentración CO ₂ -eq/año (ppm)	Incremento temperatura (°C) finales siglo XXI respecto de 1986-2005	Trayectoria
RCP8,5	>8,5 en 2100	>935,90	2,6 a 4,8	Creciente

RCP6,0	~6,0 al estabilizarse después de 2100	~669,70	1,4 a 3,1	Estabilización
RCP4,5	~4,5 al estabilizarse después de 2100	~538,40	1,1 a 2,6	Estabilización
RCP2,6	~3,0 en su pico antes de 2100 y luego declina	~421 en su pico y luego declina	0,3 a 1,7	Pico y declina

Tabla 4 – Escenarios RCPs, elaboración propia con datos de (Meinshausen et al., 2011; Moss et al., 2010; Pachauri et al., 2014)

Por «representativas» se quiere decir que cada RCP provee solo uno de varios posibles escenarios que podrían conducir a las características del forzamiento radiativo específico de ese futuro en cuestión. El término «trayectorias» enfatiza que no solo interesan las concentraciones en el largo plazo, sino también la trayectoria tomada a través del tiempo para llegar al objetivo trazado (Moss et al., 2010).

El forzamiento radiativo, es un término utilizado por el IPCC desde su segundo informe en 1995, para definir la perturbación del balance energético del sistema Atmósfera-Tierra en vatios por metro cuadrado (Wm^{-2}) (J. T. Houghton et al., 1995) a raíz de un cambio interno o de un cambio en el sistema climático, como por ejemplo, un forzamiento radiativo positivo, como el que se produce por las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero, tiende a calentar la superficie. Un forzamiento radiativo negativo, que puede deberse a un aumento de ciertos tipos de aerosoles (partículas microscópicas suspendidas en el aire), tiende a enfriar la superficie (J. T. Houghton et al., 2001a).

En todos los escenarios de emisiones evaluados, las proyecciones señalan que la temperatura en superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y duren más, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. El océano se seguirá calentando y acidificando, y el nivel medio global del mar continuará elevándose.

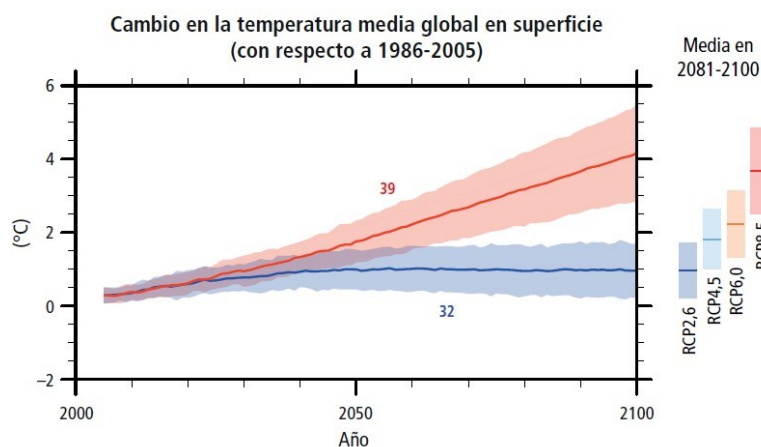


Figura 25 - Cambio en la temperatura media global en superficie de 2006 a 2100 determinados por simulaciones multimodelos en relación con 1986-2005 (Pachauri et al., 2014)

La elevación del nivel medio global del mar continuará durante el siglo XXI, y es muy probable que ocurra a un ritmo más rápido que el observado entre 1971 y 2010. Para el período 2081-2100 en relación con 1986-2005, es probable que la elevación ocurra en los rangos de 0,26 a 0,55 m y de 0,45 a 0,98 m para los escenarios RCP2,6 y RCP8,5 respectivamente.

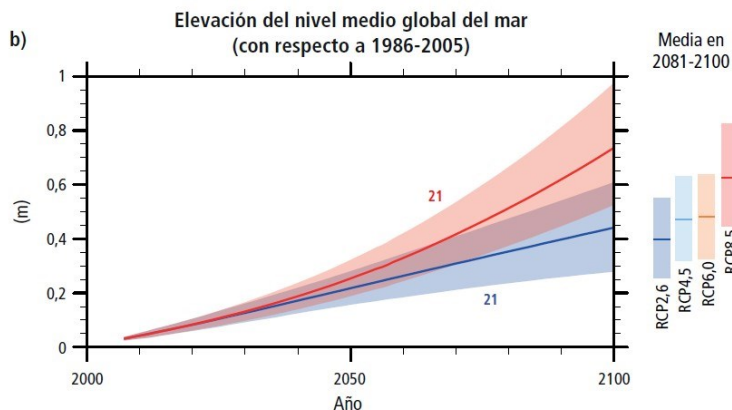


Figura 26 - Elevación del nivel medio global del mar de 2006 a 2100 determinado por simulaciones multimodelos en relación con 1986-2005. (Pachauri et al., 2014)

La elevación del nivel del mar no será uniforme entre las regiones en que se puede dividir el globo terráqueo. Es muy probable que para finales del siglo XXI el nivel del mar aumente en aproximadamente más del 95% de las zonas oceánicas. Las proyecciones señalan que alrededor del 70% de las costas de todo el mundo experimentarán un cambio de nivel del mar en un intervalo de $\pm 20\%$ de la media global.

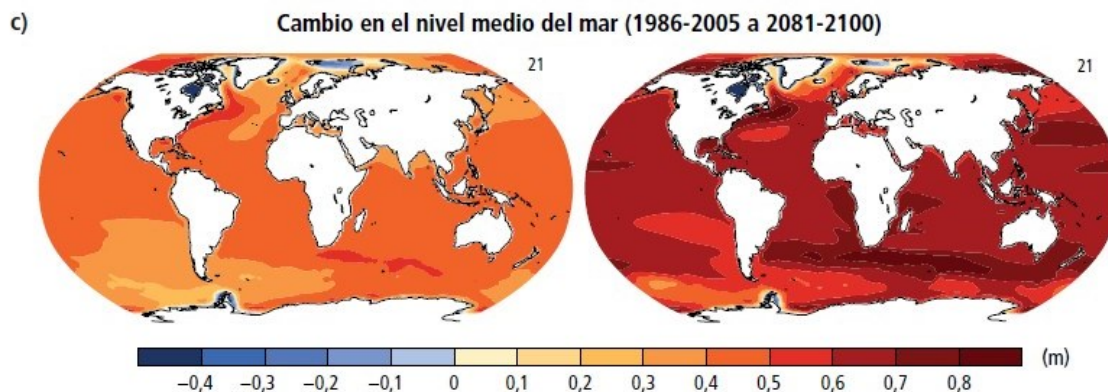


Figura 27 - Proyecciones medias del cambio en el nivel medio global del mar para los escenarios RCP2,6 a la derecha y RCP8,5 a la izquierda. Los cambios se muestran en relación con el período 1986-2005 (Pachauri et al., 2014)

II.7 Cambio climático en Estados Unidos de América (EE. UU.)

El 16 de noviembre de 1990 se firma la Ley de Investigación sobre el Cambio Mundial (Global Change Research Act of 1990, en inglés), mediante la cual se crea el Programa de Estados Unidos para la Investigación sobre el Cambio Mundial (USGCRP, por sus siglas en inglés) enfocado en el entendimiento y respuesta al cambio mundial, incluyendo los efectos acumulativos de las actividades humanas y los procesos naturales en el medio ambiente para promover discusiones en torno a protocolos internacionales en investigación sobre el cambio mundial y otros propósitos (U.S. Congress, 1990).

A dicho programa, se le exige la rendición de un informe como máximo cada cuatro años, ante el Congreso y el presidente de EE. UU., que:

1. Integre, evalúe e interprete los resultados del programa.
2. Analice los efectos del cambio mundial en el entorno natural, la agricultura, la producción y el uso de energía, los recursos terrestres y acuáticos, el transporte, la salud y el bienestar humano, los sistemas sociales, humanos y la diversidad biológica.
3. Analice las tendencias actuales en el cambio mundial, tanto naturales como inducidos por los humanos y proyecte las tendencias mayores para los 25 a 100 años siguientes.

A este informe enfocado en EE. UU., dividiéndolo en 10 regiones territoriales (Noreste, Sudeste, Caribe Estadounidense, Medio Oeste, Grandes Llanuras del Norte, Grandes Llanuras del Sur, Noroeste, Sudoeste, Alaska, Hawái y Regiones de las Islas del Pacífico asociadas a EE. UU.) se le llama Evaluación Nacional del Clima (NCA, por sus siglas en inglés), y sirve de base a los esfuerzos de evaluación de riesgos asociados al clima e informa en la toma de decisiones a los responsables de políticas para responder ante estos (Wuebbles, Fahey, Hibbard, Dokken, et al., 2017).

En el año 2001 se entrega la primera Evaluación Nacional del Clima, en la misma se afirma que de continuar el crecimiento de las emisiones de GEIs, los principales modelos climatológicos usados en esta evaluación proyectan incrementos de temperatura en EE. UU. de 3° a 5°C en promedio, superiores a las proyecciones globales del IPCC en su primer informe (J. Houghton et al., 1992) para los próximos 100 años, sin descartar un mayor margen de incrementos (USGCRP, 2001).

Según este informe, durante el siglo XX, la temperatura promedio de EE. UU. se incrementó en promedio 0,6°C con algunas regiones experimentando incrementos de hasta 2,4°C y otras mostrando ligeros enfriamientos. Las precipitaciones totales anuales se incrementaron con el mayor aporte viniendo de eventos extremos (USGCRP, 2001).

Las proyecciones de la expansión de los usos del carbón, el petróleo y el gas natural como fuentes de energía indican que las actividades humanas provocarán un incremento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera de 2 a 3 mayor a la de los niveles preindustriales para

finales del siglo XXI a menos que medidas de control sean tomadas. Las concentraciones de metano y otros GEIs también se proyectan al alza y se espera que los controles impuestos a las emisiones de clorofluorocarbonos permitan que sus concentraciones disminuyan (USGCRP, 2001).

En lo que respecta al incremento del nivel medio global del mar, el reporte indica que este incremento ha sido de 0,10 a 0,20 metros durante el siglo pasado, proyectando un incremento de 0,13 a 0,95 metros durante el siglo XXI (USGCRP, 2001).

Aunque el derretimiento de los mantos de hielo polar podría contribuir al incremento del nivel medio global del mar en el largo plazo, ninguno de los modelos utilizados en este reporte incluyó la consideración de los cambios causados por la influencia de los glaciares y mantos de hielo en la Antártida y en Groenlandia, de ahí unos márgenes de incrementos tan amplios (USGCRP, 2001).

Los modelos tampoco incluyen el significativo componente local causado por cambios en la altura de las líneas costeras y sus acreciones o depresiones debido a efectos locales como el bombeo de aguas subterráneas, movimientos tectónicos y ajustes isostáticos del último período glacial (USGCRP, 2001).

Sobre los eventos climatológicos extremos en el informe se menciona que la frecuencia de ocurrencia de que se excedan ciertos umbrales de intensidad podría cambiar debido a que las temperaturas y humedad absolutas están proyectadas a incrementar y por ende el ciclo hidrológico de evaporación y precipitación. Varios modelos indican una mayor frecuencia de extremos en temperaturas altas y menor frecuencia de extremos en temperaturas bajas como resultados del incremento de las concentraciones de GEIs (USGCRP, 2001).

II.7.1 4.^a Evaluación Nacional del Clima (2017-2018)

La cuarta y más reciente entrega de la Evaluación Nacional del Clima se divide en dos partes. La primera, el Informe Especial sobre la Ciencia Climatológica: Volumen I de la NCA4 (CSSR, por sus siglas en inglés), publicado en 2017, presenta un análisis detallado de la manera en que el cambio climático está afectando el sistema terrestre físico a través de Estados Unidos y provee la ciencia física fundacional en la que se basa gran parte de la evaluación de los impactos presentados en el reporte.

El CSSR integra y evalúa los resultados actuales de la ciencia climatológica y discute las incertidumbres relacionadas con estos resultados. El reporte analiza las tendencias del cambio climático, tanto naturales como inducidas por el ser humano, y proyecta las tendencias principales hasta el fin de este siglo. Los cambios en la temperatura, los patrones de precipitación, el incremento en el nivel medio global del mar y otros resultados climáticos proyectados se basan en una gama de escenarios empleados extensamente en la comunidad de investigación climática, conocidas como las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en inglés), enfocándose en uno de bajas emisiones como el RCP4,5 y otro de altas como el RCP8,5.

La segunda parte de la evaluación, el Informe de Impactos, Riesgos y Adaptación en Estados Unidos: Volumen II de la NCA4, publicado en 2018, se centra en los elementos del bienestar humano, social y ambiental del cambio climático y la variabilidad para las 10 regiones nacionales, con atención especial a los riesgos observados y proyectados, la consideración de la reducción de riesgos y las consecuencias de distintas trayectorias de mitigación.

En lo que respecta a los cambios observados, el promedio de temperaturas anuales ha incrementado en 1,0°C en los Estados Unidos continentales (Los 48 estados localizados al sur de la frontera con Canadá y el Distrito de Columbia) desde el inicio del siglo XX. Alaska se calienta más rápido que cualquier otro estado y se ha calentado dos veces más rápido que el promedio global desde mediados del siglo XX.

La duración de la temporada de olas de calor en muchas ciudades de Estados Unidos se ha incrementado en más de 40 días desde la década de 1960. La cantidad relativa de lluvia anual que proviene de eventos de precipitación extremos y de un solo día ha cambiado en el último siglo; desde 1910, un mayor porcentaje de terreno en los Estados Unidos continentales recibe precipitación en la forma de estos eventos intensos de un solo día.

Ocurrieron grandes descensos en la nieve acumulada en el oeste de Estados Unidos de 1955 a 2016. Si bien existe un número de formas de medir la sequía, actualmente no hay un cambio detectable en las estadísticas de sequía a largo plazo en Estados Unidos. Desde los inicios de la década de 1980, el alcance del hielo marino anual mínimo (observado en septiembre de cada año) en el océano Ártico ha disminuido a una tasa de -11 % a -16 % por década.

La temperatura de los océanos en toda su profundidad se ha incrementado desde 1960 y las aguas superficiales han incrementado su temperatura en $0,7^{\circ} \pm 0,08^{\circ}\text{C}$ por siglo en el período comprendido entre 1900 y 2016.

Se proyecta que las temperaturas promedio anuales en Estados Unidos continúen aumentando en las próximas décadas. Independientemente del escenario futuro, se esperan elevaciones adicionales en las temperaturas en los Estados Unidos continentales de al menos 1,4°C relativas al período 1986-2015 para mediados de este siglo.

Como resultado, se espera que los años cálidos registrados recientemente sean comunes en un futuro cercano. Para finales de este siglo, se esperan incrementos de 1,6° a 4,1°C (2,8° a 7,3°F) en un escenario bajo (RCP4,5) y de 3,2° a 6,6°C (5,8° a 11,9°F) en un escenario más alto (RCP8,5) relativos al período 1986–2015.

Cambios proyectados en las temperaturas de promedio anuales en los Estados Unidos

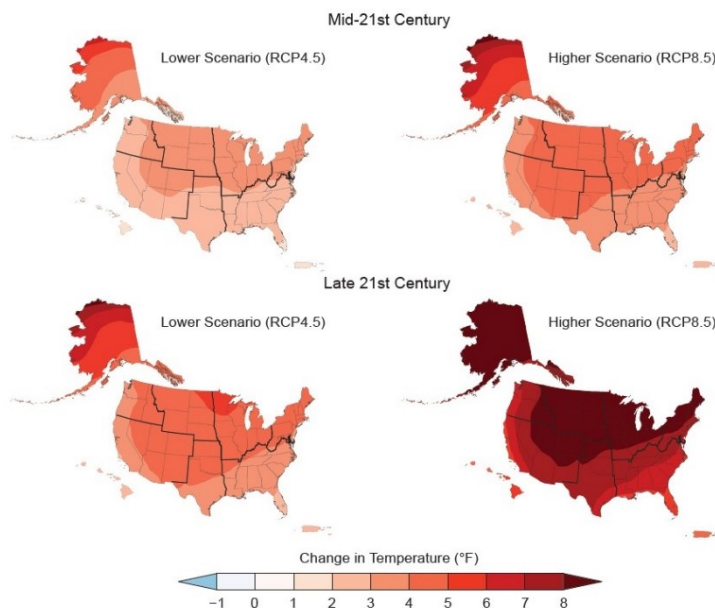


Figura 28 - Cambios proyectados en la temperatura promedio anual para mediados y finales del siglo XXI de acuerdo con dos trayectorias futuras. (Reidmiller et al., 2018)

Globalmente, se espera que la temperatura de la superficie de los océanos se incremente en $2,7^{\circ} \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ para el 2100 y que continúe el derretimiento de las masas de hielo en tierra (como Groenlandia, la Antártida y los glaciares de montaña).

A medida que los océanos se han calentado y el hielo terrestre se ha derretido el nivel medio relativo del mar en la costa de Estados Unidos (sin incluir el movimiento de la tierra) se ha incrementado en unos 23 centímetros desde los inicios del siglo XX.

Los cambios en el nivel del mar se producen por una variedad de mecanismos que operan a diferentes escalas temporales y espaciales (Kopp, Hay, Little, & Mitrovica, 2015). El incremento global en el nivel medio global del mar se debe principalmente a dos razones:

- El incremento del volumen de agua en los océanos debido a la expansión térmica de estos mientras su temperatura aumenta.
- El incremento de las masas de agua en los océanos debido al derretimiento del hielo en los glaciares en montañas y en las láminas de hielo de la Antártida y Groenlandia.

Los cambios en el nivel del mar no son uniformes a nivel global debido a procesos geológicos no asociados al clima, la dinámica océano-atmósfera y la huella gravitacional, elástica y rotacional de los efectos de la redistribución de las masas de hielo y de los océanos (Kopp et al., 2015).

La elevación del nivel del mar relativo será mayor donde la tierra se hunde (como en toda la costa del Golfo de México), y a la vez, la elevación será menor donde la tierra se eleva (como en parte de Alaska).

Se espera que el nivel del mar continúe elevándose en casi toda la costa de Estados Unidos, y para el año 2100, en el escenario más alto, la altura de las inundaciones costeras que hoy causan grandes daños a la infraestructura sería común durante la pleamar a nivel nacional.

El relativo cambio proyectado del nivel del mar en los Estados Unidos para el año 2100

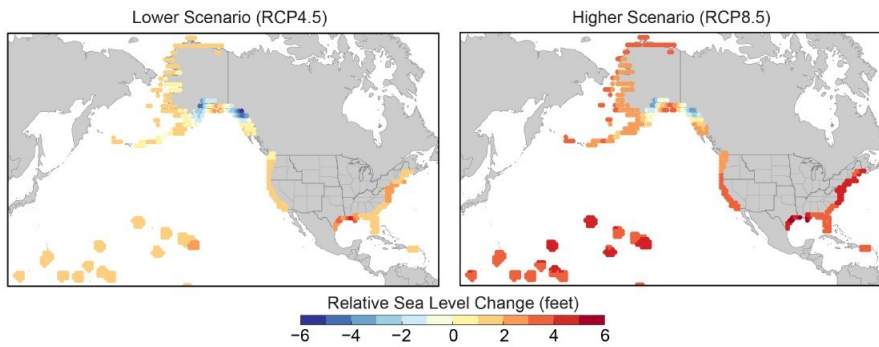


Figura 29 - Mapa de las proyecciones del cambio en el nivel del mar relativo en la costa de Estados Unidos para el 2100 en adición a un incremento del nivel medio global del mar de 1 metro (comparado con el año 2000) (Reidmiller et al., 2018)

Nueva información científica sobre la capa de hielo de la Antártida sugiere que, para los escenarios más altos, es físicamente posible un incremento de más de 2,4 m para 2100, aunque la probabilidad de un resultado tan extremo no puede ser evaluada en este momento. Las precipitaciones abundantes, las inundaciones costeras, el calor y los cambios en la precipitación y temperatura promedio afectan los recursos (tales como las calles y los puentes) en todos los medios de transporte.

Climate Change and Notable Vulnerabilities of Transportation Assets

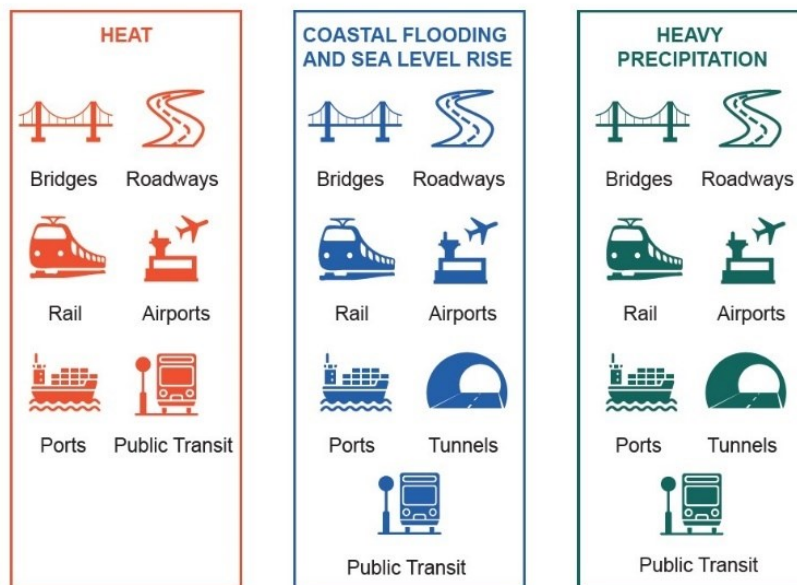


Figura 30 - Principales peligros relacionados con el clima y los recursos del transporte afectados (Wuebbles, Fahey, Hibbard, Deangelo, et al., 2017)

Asumiendo que las características de los eventos meteorológicos no cambien, el incremento del nivel medio global del mar incidirá en la frecuencia y extensión de las inundaciones costeras extremas asociadas a estos eventos.

Casi toda la costa estadounidense experimentará un incremento del nivel medio relativo del mar mayor que el promedio global en respuesta a la pérdida de hielo antártico, por lo cual estaría particularmente afectada por escenarios que reproduzcan una gran pérdida de masa de hielo e incrementos extremos del nivel medio global del mar. En el Golden Gate Bridge de la ciudad de San Francisco, ubicada al norte de California, el nivel del mar aumentó 0,23 metros entre 1854 y 2016 debido al cambio climático.

Nuestro ámbito de estudio pertenece a la región Sudoeste, la cual abarca diversos ecosistemas, culturas y economías, lo que refleja una amplia gama de condiciones climáticas, incluido el clima más cálido y seco de Estados Unidos. En el marco de la 4.^a Evaluación Nacional del Clima, las autoridades competentes en el tema del estado de California publicaron una serie de informes relativos al cambio climático en su demarcación, cuyas observaciones y proyecciones con miras a reducir riesgos futuros y desarrollar planes y políticas de actuación y mitigación se discutirán a continuación.

II.7.2 Cambio Climático en California (2018)

California es una de las regiones más desafiadas por el clima de América del Norte; su clima histórico es extremadamente variable, y el cambio climático está haciendo que las condiciones extremas sean más frecuentes y graves. Las temperaturas de California ya están subiendo, las olas de calor son más frecuentes, y la precipitación continúa siendo muy variable.

Desde 2012, California ha experimentado varios de los eventos naturales más extremos en su historia: una grave sequía en 2012-2016, una casi inexistente acumulación de nieve durante el invierno en la Sierra Nevada en 2014-2015, una cantidad cada vez mayor y más grave de incendios forestales, y años seguidos de temperaturas promedio más cálidas.

La costa icónica de California es una parte integral de la identidad del estado, pero el cambio climático está cambiando rápidamente el océano y la costa. La región costera, que abarca más de 1.900 kilómetros de costa, es una potencia económica que contribuyó 41.100 millones de dólares al PIB del estado, brindó 19.300 millones de dólares en sueldos y salarios, y suministró 502.073 puestos de trabajo en 2013. El aumento del nivel medio global del mar, el calentamiento de las aguas oceánicas, el aumento de la acidez y la disminución de los niveles de oxígeno disuelto tendrán efectos que se extenderán mucho más allá de las tres cuartas partes de los californianos que viven en los condados costeros.







	IMPACTO DEL CLIMA	DIRECCIÓN DEL CAMBIO	CONFIANZA CIENTÍFICA DE FUTUROS CAMBIOS
	TEMPERATURA	CADA VEZ MAYOR ↗	Muy alta
	NIVELES DEL MAR	EN AUMENTO ↗	Muy alta
	NIEVE ACUMULADA	EN DESCENSO ↘	Muy alta
	EVENTOS DE PRECIPITACIÓN INTENSA	EN AUMENTO ↗	De medio a alta
	SEQUÍAS	EN AUMENTO ↗	De medio a alta
	ÁREAS DESTRUIDAS POR INCENDIOS FORESTALES	EN AUMENTO ↗	De medio a alta

Figura 31 - Áreas de impacto del cambio climático, dirección del cambio según las proyecciones y la confianza en las mismas (Thorne et al., 2018)

Es casi seguro que el nivel medio global del mar aumentará más allá de los 0,15 metros que experimentó gran parte de California durante el siglo pasado, pero hay preguntas importantes sobre qué tan rápido aumentará y con qué intensidad se verá reflejada.

Las proyecciones de la 4^{ta} Evaluación Nacional del Clima (NCA4) ponen de relieve el hecho de que los niveles del mar dependen de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como del derretimiento y la pérdida de hielo asociados en Groenlandia y la Antártida.

Si las emisiones continúan a las tasas actuales, los resultados del modelo de la NCA4 indican que, para el año 2100, el aumento total del nivel del mar será de 1,37 metros, casi el doble del aumento que ocurriría si las emisiones de gases de efecto invernadero se redujeran para disminuir el riesgo.

Las carreteras, los ferrocarriles, las tuberías, las vías navegables, los puertos y los aeropuertos de California son fundamentales para el movimiento de personas y bienes y se verán afectados de manera significativa por el cambio climático.

Los incendios forestales son una amenaza cada vez mayor para el sistema de transporte de California, y también pueden tener efectos en cascada, como el desprendimiento de tierras y los deslizamientos de lodo, que se producen después de que llueva en las áreas recién destruidas por los incendios.

También se espera que las temperaturas cada vez mayores aumenten los costos de construcción de carreteras un 3-9%. Es necesario adaptar los materiales de la calzada para que soporten temperaturas más altas con el fin de evitar costos potenciales de más de 1.000 millones de dólares para el año 2070. Ciento ochenta y cinco kilómetros de vías ferroviarias podrían estar en riesgo de sufrir inundaciones costeras para 2040, con 458 kilómetros adicionales en riesgo para el año 2100.

Los aeropuertos de las principales áreas urbanas, incluidos los de San Francisco, Oakland y San Diego, serán vulnerables a sufrir grandes inundaciones debido a una combinación de aumentos del nivel medio global del mar y mareas meteorológicas entre 2040 y 2080, en función de la ubicación, sin la implementación de medidas de protección.

El desarrollo resiliente ante el aumento del nivel medio global del mar en California requiere enfoques específicos a las necesidades de las comunidades, los impactos climáticos y muchos otros factores. Las opciones para proteger a las comunidades y los ecosistemas incluyen combinaciones de defensas ribereñas, infraestructura natural y enfoques híbridos.

II.7.2.1 Cambio climático en la región de Los Ángeles, California (2018)

La región de Los Ángeles contiene la totalidad de los condados de Ventura, Orange y Los Ángeles (ubicación del ámbito del presente estudio) junto a porciones de los condados de San Bernardino y Riverside. La topografía de esta región se caracteriza por contar con extensas planicies costeras, sistemas montañosos y zonas desérticas. En esta región habitan aproximadamente 18 millones de personas, comprendiendo la mitad de la población del estado de California.

Esta región es de inmenso valor económico para el estado y la nación, ya que es la sede de industrias del entretenimiento y medios digitales, del comercio internacional a través de los puertos de Los Ángeles y de Long Beach, de defensa, medicina y tecnología, por lo cual resulta imperativo el asegurar que los sistemas humanos, económicos y naturales a lo largo de esta región se mantengan bajo el cambiante clima futuro.

Durante el pasado siglo, las observaciones indican que las temperaturas se han incrementado a lo largo de todo el sur de California. Según registros que van desde 1896 hasta 2015, se han detectado incrementos en promedios anuales, máximos y mínimos de temperatura de 0,16°C por década, con el 2014 como el año con las temperaturas más altas hasta la fecha.

Se espera que el calentamiento continúe en aumento para toda la región en las décadas venideras según las proyecciones para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5. Para las primeras décadas del siglo XXI, las proyecciones bajo ambos escenarios son similares, pero según nos acercamos a fin de siglo, estas toman trayectorias distintas, con un incremento sostenido en el escenario más alto y una fase de meseta en el más bajo según los modelos utilizados.

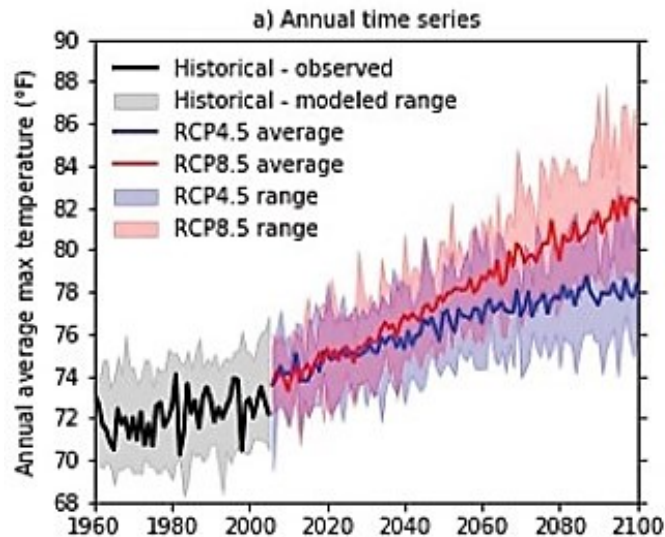


Figura 32 - Temperatura máxima promedio anual en la región de Los Ángeles en °F, con registros históricos en negro, históricos modelados en gris y proyecciones futuras en azul para el escenario RCP4,5 y en rojo para el escenario RCP8,5 (A. Hall et al., 2018)

Comparando con un máximo valor promedio anual de 22,5°C, para el escenario RCP4,5 a inicios del siglo XXI se proyectan temperaturas promedio anuales de 23,78°C, a mediados de siglo 24,83°C y 25,44°C a finales de siglo. Del mismo modo para el escenario RCP8,5 a inicios de siglo se proyectan 23,94°C, a mediados de siglo 25,67°C y 27,18°C a finales de siglo.

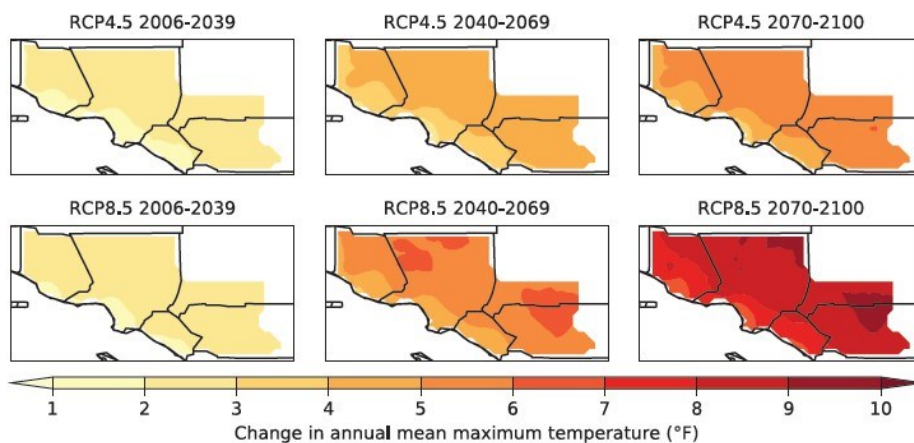


Figura 33 - Patrones espaciales de las proyecciones de los cambios modelados en la temperatura máxima promedio anual en °F bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 para tres periodos de tiempo: 2006-2039 (inicios del siglo XXI), 2040-2069 (mediados del siglo XXI) y 2070-2100 (finales del siglo XXI) (A. Hall et al., 2018)

Las precipitaciones en la región de Los Ángeles son muy cambiantes año tras año con solo cinco tormentas cada año representando el 50% de la precipitación total anual. Fenómenos naturales que inciden en la variabilidad del clima como “El Niño”, pueden influenciar en la cantidad de precipitación que la región recibe, pero no hay tendencias claras en las precipitaciones históricas de esta región. A pesar de pequeños cambios en las precipitaciones promedio, se proyecta que los extremos secos y húmedos aumenten en el futuro.

Durante el último siglo, la expansión térmica de los océanos fue el mayor contribuyente del incremento del nivel medio global del mar y las contribuciones secundarias del derretimiento de los glaciares en las montañas y del hielo en los mantos de Groenlandia y la Antártida. Los movimientos verticales del suelo junto a los cambios en los fenómenos oceánicos y atmosféricos también influyen en el incremento local del nivel del mar a lo largo de la línea costera de California.

Se espera que el ascenso del nivel de los océanos continúe. En la presente evaluación se tomaron proyecciones probabilísticas de este fenómeno y se incorporaron nuevas dinámicas de las láminas de hielo de la Antártida, las cuales incluyen procesos que podrían causar una contribución más significativa al incremento global que la que se tenía pensada.

Específicamente en los percentiles 5, 50 y 95 para el año 2050 bajo el escenario RCP4,5 encontramos incrementos de 2,80, 14,98 y 28,19 centímetros. Para el escenario RCP8,5 tenemos 5,84, 18,54 y 33,78 centímetros respectivamente. Del mismo modo para el año 2100, bajo el escenario RCP4,5 las proyecciones arrojan incrementos de 25,91, 64,51 y 131,32 centímetros. Para el escenario RCP8,5 tenemos 62,99, 127,51 y 230,89 centímetros.

El cambio climático tendrá efectos directos e indirectos en el sistema de transportes del sur de California. Efectos directos incluyen daños a las infraestructuras y cambios en el uso de vehículos y sistemas. Efectos indirectos de los impactos climáticos podrían cambiar los flujos de comercio, patrones en el uso del suelo, el suministro y demanda de energía de transportes y las instituciones, leyes y políticas que dan forma al sistema de transporte.

Un nodo relevante de este sector es nuestro ámbito de estudio, compuesto por los puertos de Los Ángeles y Long Beach. Este complejo portuario es una infraestructura vulnerable ante las amenazas del cambio climático, ya que el incremento del nivel medio global del mar podría afectar las distancias de despeje entre el equipamiento portuario, vías de comunicación y los buques. También el incremento en los niveles de agua podría provocar rebases en los diques que protegen el complejo y dañarlos. Con este daño, la protección que los diques ofrecen se vería afectada, pudiendo incrementar las erosiones en las playas y acantilados y comprometer las infraestructuras de recreación, comercio y transporte adyacentes a los puertos.

II.8 Cambios en el nivel del mar

El nivel del mar observado a lo largo de las costas cambia en respuesta a una amplia gama de mecanismos de forzamientos astronómicos, meteorológicos, climatológicos, geofísicos y oceanográficos. Este nivel está constantemente cambiando en cualquier punto dado, ya sea por influencia de ondas de bajas y altas frecuencias, tsunamis, mareas diarias y variaciones mensuales, estacionales y anuales.

El cambio del nivel medio global del mar, es decir, la altura promedio de todos los océanos y mares del planeta, es causado por el cambio global en el volumen de sus aguas. En la presente

investigación nos centramos en una de las variantes del cambio en el nivel del mar, dicha variante es **su incremento**.

Como hemos visto anteriormente, el incremento del nivel medio global del mar es uno de los impactos más certeros del cambio climático inducido por el ser humano y uno de los cuales seguirá en proceso durante siglos debido a las escalas de tiempo asociadas a estos procesos climáticos y su respuesta a la estabilización de las concentraciones de GEIs.

Debido a la creciente aglomeración de personas y actividades económicas que hoy en día se ubican en la costa y la importancia de los ecosistemas costeros, los potenciales impactos del incremento en el nivel del mar han evocado gran preocupación en la comunidad científica según Nicholls et al. (2011).

Algunos impactos potenciales del incremento en el nivel del mar ya se han evaluado a escalas global, regional, nacional y local con una gran variedad de alcances y metodologías aplicadas. La mayoría de estas evaluaciones se han basado en escenarios, definidos como una descripción de futuras condiciones potenciales de manera que permitan la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre.

Con el propósito de evaluar el incremento en el nivel del mar resulta indispensable la consideración de este fenómeno en sus dos componentes espaciales, una escala global y una regional, relativa o local, las cuales se explican a continuación.

II.8.1 Incremento del nivel medio global del mar

El incremento del nivel medio global del mar se produce principalmente por tres factores:

- La expansión térmica de los mares y océanos mientras se van calentando.
- El incremento de las masas de agua por el derretimiento del hielo ubicado en glaciares y casquetes de hielo.
- Cambios netos en los depósitos de agua en tierra, tales como la extracción de agua subterránea y el represamiento de cauces.

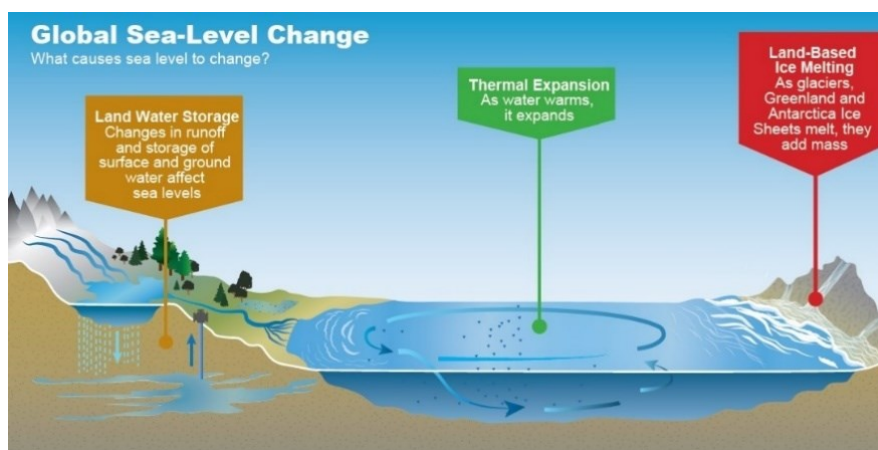


Figura 34 - Esquema de los factores que inciden en los cambios del nivel medio global del mar (J. A. Hall et al., 2016)

Los registros instrumentales del cambio del nivel medio global del mar están compuestos principalmente de medidas a partir de mareógrafos durante los últimos dos a tres siglos y desde principios de la década de los 90s de medidas altimétricas mediante radares satelitales.

Estimaciones a partir de mediciones mediante mareógrafos realizadas por Church y White (2006, 2011) y Jevrejeva et al. (2009), concluyen que aunque diferentes estrategias se hayan desarrollado para constatar la falta de homogeneidad en la cobertura espacial y temporal de estos datos y para corregir los efectos provocados por los movimientos tectónicos verticales (los cuales son también registrados por los mareógrafos en adición a los cambios en el nivel del mar y su variabilidad), es muy probable que el nivel medio global del mar se haya elevado a una tasa de $1,7 \pm 0,2$ mm/año entre 1901 y 2010 para una subida total de $0,19 \pm 0,2$ m.

En lo que respecta a las mediciones de alta precisión mediante altimetría satelital, las mismas datan del 1993, cubriendo casi en su totalidad el globo terráqueo.

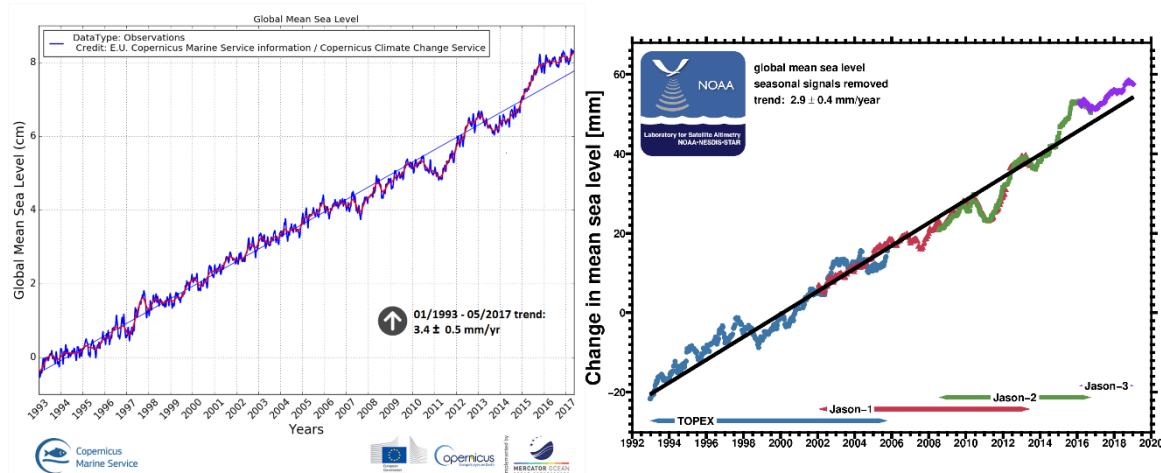


Figura 35 - Comparación de registros de datos altimétricos del incremento del nivel medio global del mar captados mediante satélites a partir de 1993 (ESA - CMEMS, 2018; NOAA - LSA, 2019b)

En la imagen anterior podemos apreciar a la izquierda datos procesados por el Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S, por sus siglas en inglés) de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) hasta mayo de 2017 que muestran un incremento de $3,4 \pm 0,5$ mm/año en el nivel medio global del mar. A la derecha, datos procesados por el Laboratorio de Altimetría Satelital de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EE. UU. (NOAA, por sus siglas en inglés) hasta diciembre de 2018, exhiben un incremento de $2,9 \pm 0,4$ mm/año sin incluir ajustes isostáticos (la elevación de masas terrestres que una vez estuvieron presionadas por glaciares en la última glaciación). De incluirse estos ajustes, la tasa de incremento sería de $3,25 \pm 0,4$ mm/año.

Numerosas investigaciones se han llevado a cabo para documentar la evolución de este fenómeno global (algunas de las cuales forman parte de la revisión histórica realizada sobre este campo) a partir de modelos climatológicos, aproximaciones semiempíricas, métodos probabilísticos y procesos físicos, con el objetivo de determinar en lo posible la máxima contribución de la pérdida de los casquetes de hielo y glaciares, principal fuente de

incertidumbre en los análisis de este fenómeno junto con el aporte de la expansión térmica de las aguas y los cambios netos en los depósitos de agua en tierra.

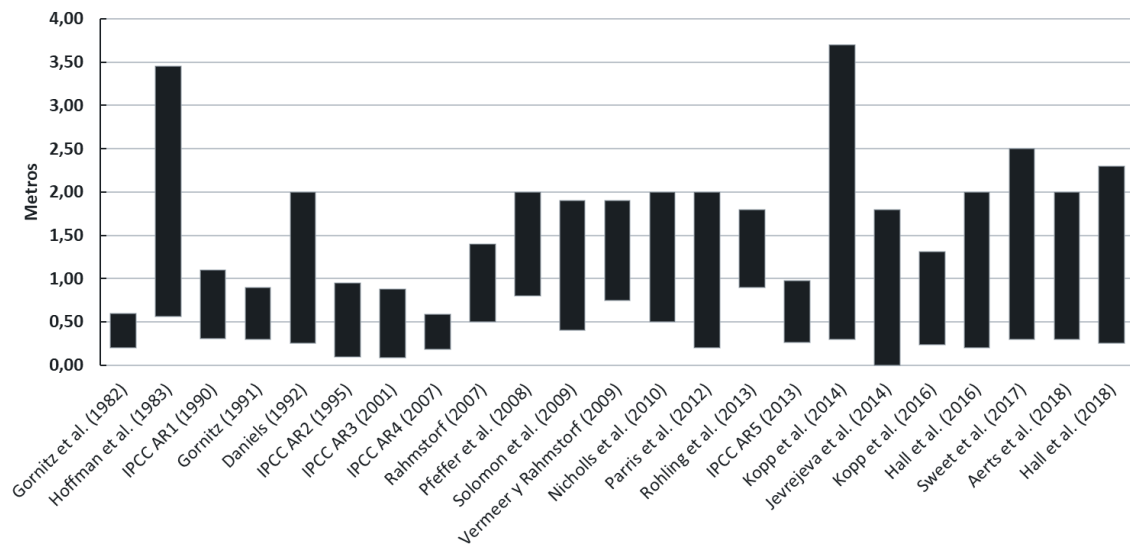


Figura 36 - Resumen de las proyecciones del incremento del nivel medio global del mar para 2100

Si se promedian las proyecciones realizadas en estas investigaciones, se obtiene como resultado que se producirá para 2100 un incremento del nivel medio global del mar de 0,34 a 1,74 metros.

Estas proyecciones globales, aunque representan un punto de partida vital, son por sí solas insuficientes para la toma de decisiones a escalas regionales y locales. Los cambios en el nivel del mar bajo el cambio climático no se darán de una manera uniforme en el globo terráqueo, por lo cual, los factores que contribuyen a las variaciones de estos niveles de la media global no se comportan de la misma forma.

II.8.2 Incremento del nivel relativo del mar

El cambio en el nivel relativo del mar es el cambio local con respecto a la elevación del terreno en un punto específico de la costa, pudiendo ser positivo (incremento del nivel) o negativo (reducción del nivel).

Los niveles del mar no se han elevado uniformemente alrededor del globo en ningún punto de la historia para la cual se tienen registros. Estos niveles han sido muy variables a nivel espacial.

A nivel regional y local, varios factores influyen en los cambios del nivel del mar, los cuales pueden ser según Sweet et al. (2017):

- **Factores meteorológicos y oceanográficos:** estos comprenden diferencias en las tasas de expansión y circulación de los mares y océanos, cambios en la presión atmosférica y en los patrones de viento.

- **Cambios en los campos gravitatorios regionales:** debido al derretimiento del hielo, se produce una redistribución de las masas de agua alejadas de Groenlandia, la Antártida y los glaciares. Si el hielo polar se derrite, el volumen de agua en los océanos aumenta, pero a la misma vez, la fuerza de gravedad del casquete polar en los océanos cercanos a este disminuye, provocando que el incremento del nivel del mar se produzca a mayor velocidad en áreas alejadas del origen del derretimiento.
- **Movimientos verticales del terreno:** estos comprenden el levantamiento (hacia arriba) y la subsidencia (hacia abajo) que se producen por varias causas naturales y procesos geológicos inducidos por el ser humano. Estos a su vez pueden ser causados por:
 - Movimientos tectónicos.
 - Compactación de sedimentos.
 - Extracción de aguas subterráneas y petróleo.
 - Ajuste isostático, esto es, la elevación de masas terrestres que habían sido presionadas por el enorme peso de los casquetes glaciares durante la última glaciación.

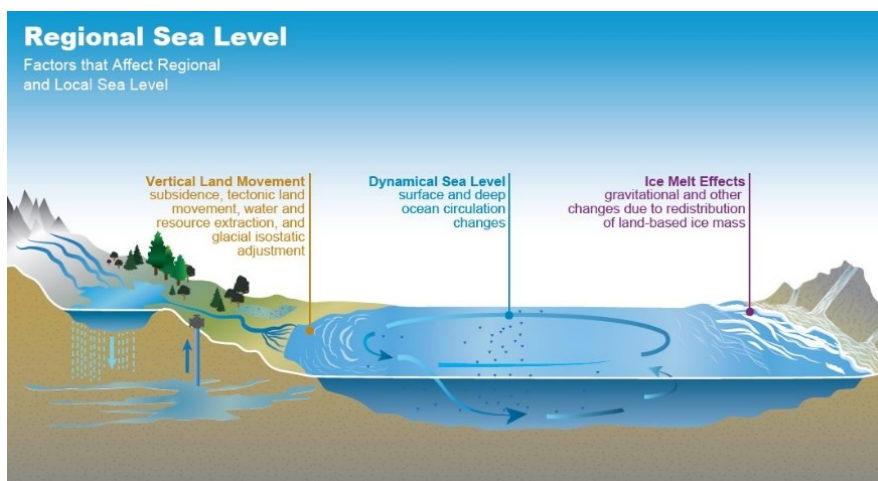


Figura 37 - Esquematación de los factores que inciden en el cambio del nivel relativo del mar (J. A. Hall et al., 2016)

Otros procesos, tales como los cambios en las descargas de grandes ríos pueden influenciar el nivel relativo del mar, lo cual, de ser relevante, podría ser investigado en el marco de una evaluación de impactos.

IMPACTOS FÍSICOS RELACIONADOS CON EL INCREMENTO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR	
Inundación y daños por tormentas	Storm surge Estancamiento de aguas
Pérdida a largo plazo de humedales y cambios en su extensión	
Alteración de los patrones de erosión y acreción	
Intrusión de agua salada	Aguas superficiales Aguas subterráneas

Elevación del nivel freático

Tabla 5 - Impactos asociados al incremento relativo del nivel del mar (R.J. Nicholls et al., 2011)

La inclusión de componentes regionales de los cambios en el nivel relativo del mar es importante a la hora de desarrollar escenarios donde se evalúan sus impactos y la adaptación a estos, debido a que proveen una relación entre el cambio climático (escala global) y estrategias de gestión de zonas costeras (escala regional a local).

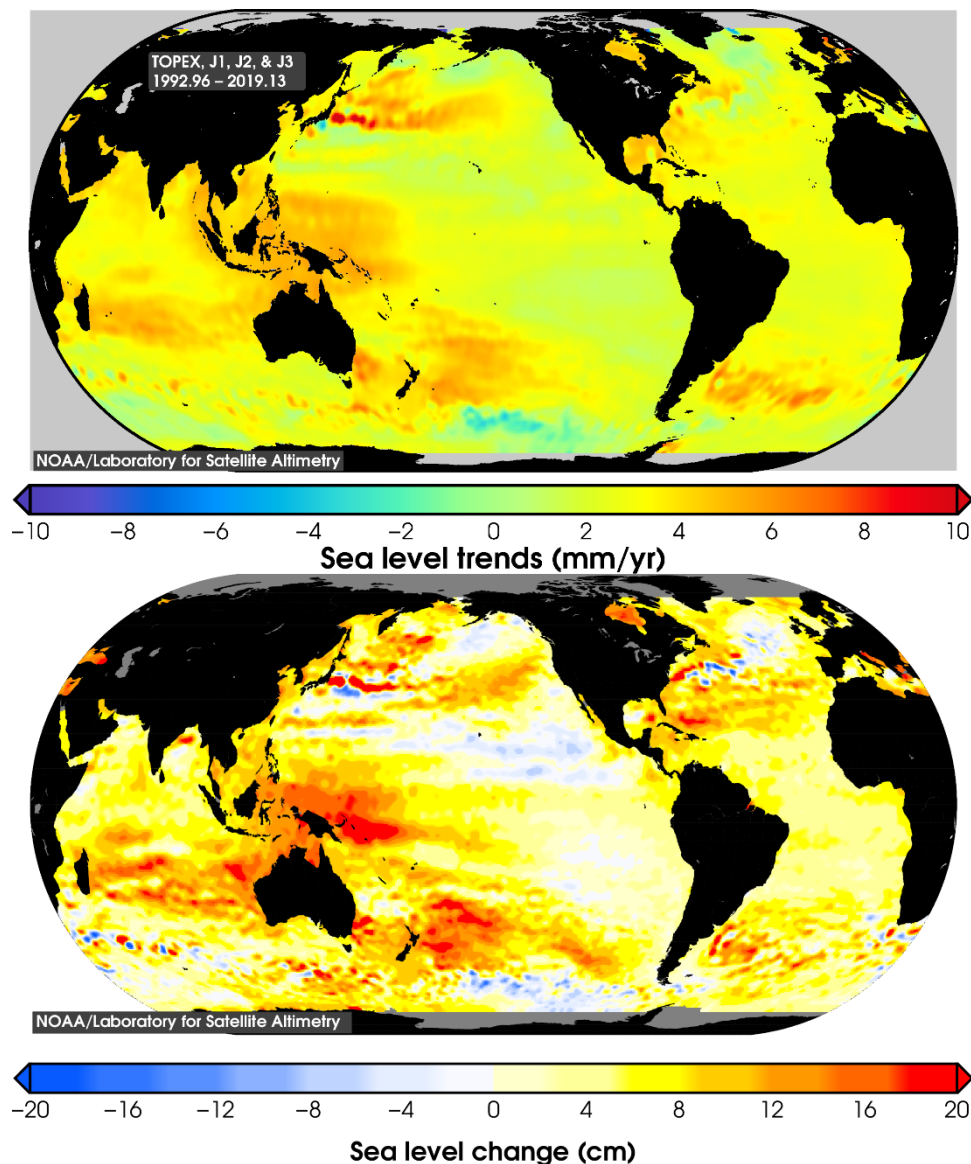


Figura 38 - Representación de la variación anual de los cambios en el nivel del mar (arriba) y su cambio total desde 1993 (abajo) (NOAA - LSA, 2019a)

En la imagen superior se pueden apreciar las variaciones regionales a partir de las cuales se obtiene la media y la tasa de incremento anual del nivel medio global del mar. Por ejemplo, en el Océano Pacífico Occidental se registran cambios de hasta 20 centímetros de incremento a una tasa de 4-6 mm/año y en el Pacífico Oriental observamos descensos de 4 centímetros a una tasa de 0-(-1) mm/año.

II.8.2.1 Nivel relativo del mar en el ámbito de estudio

El nivel relativo del mar en el ámbito de estudio, dígame los puertos de Los Ángeles y Long Beach, se registra en la estación número 94166060, un mareógrafo ubicado en el Puerto de Los Ángeles en las coordenadas 33° 43,2' N 118° 16,4' W, con datos que datan de noviembre del 1923.

A partir de estas observaciones se construye la tendencia que caracteriza el cambio en el nivel relativo del mar para el ámbito de estudio según los forzamientos actuales, presentando un incremento de $1,01 \pm 0,23$ mm/año para el período 1923-2018, lo que equivale a 0,10 metros de aumento en total.

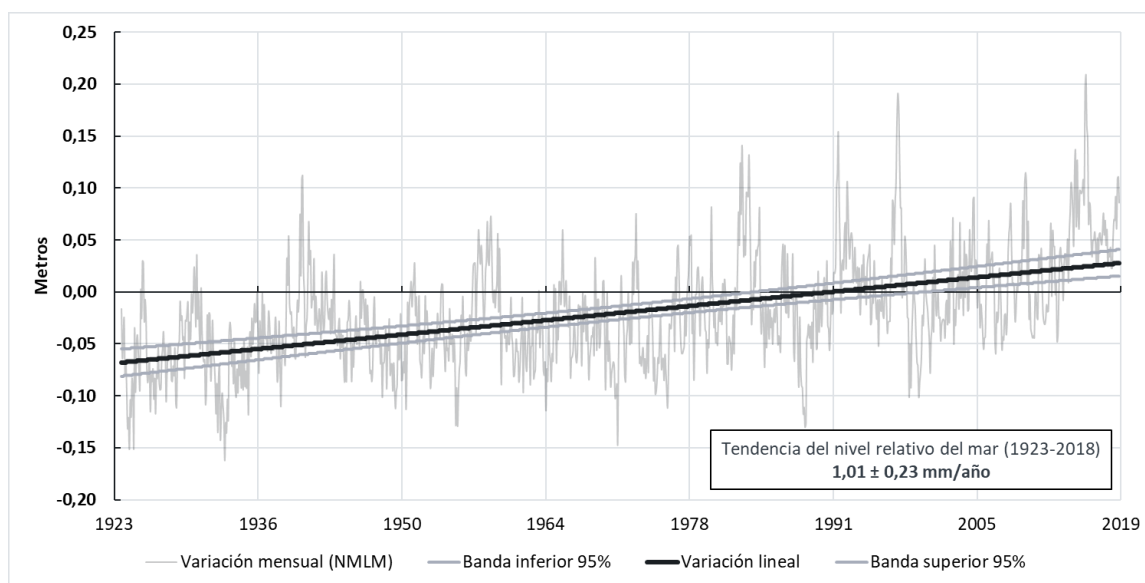


Figura 39 - Incremento del nivel relativo del mar en el ámbito de estudio, elaboración propia con datos de (NOAA, 2019b)

II.8.3 Efectos en niveles extremos

El cambio climático afectará los niveles extremos del mar y el oleaje de dos formas:

- Debido a que las tormentas tropicales y extra tropicales son uno de los principales causantes de niveles del mar y oleajes extremos, cambios futuros en la intensidad, frecuencia, duración y trayectoria de estos fenómenos, los impactarán directamente.
- El incremento del nivel medio global del mar se sumará a los niveles extremos de este, independientemente de los cambios en los componentes relacionados con los temporales.

El cambio en el nivel medio global del mar también aumentará el riesgo de inundación costera debido a cambios en el run-up del oleaje. Las investigaciones realizadas por Menéndez y Woodworth (2010), mediante el análisis estadístico de observaciones de mareógrafos indican un incremento en los niveles extremos observables a nivel mundial, causados por el incremento del nivel medio global del mar, indicando que la altura de eventos de inundación

extrema con un período de retorno de 50 años se ha incrementado entre 2 y 10 centímetros por década desde 1970.

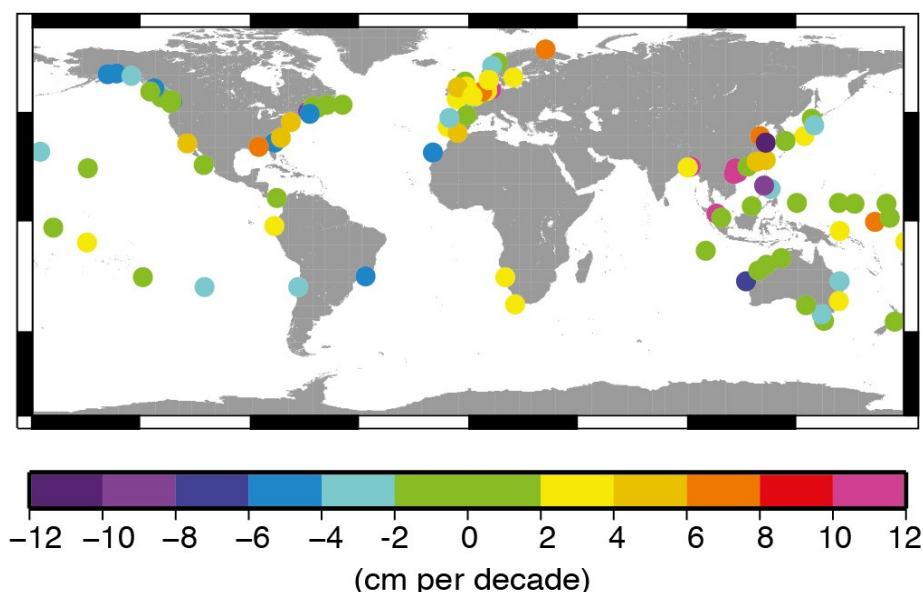


Figura 40 - Elevación total de eventos de inundación extrema con un período de retorno de 50 años, tomado de (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013) con datos de (Menéndez & Woodworth, 2010)

Fenómenos climáticos como "El Niño" y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) también tienen una influencia cuantificable en los niveles extremos de varias regiones acorde a lo planteado por Walsh et al. (2012).

Según Seneviratne et al. (2012), es muy probable que el incremento del nivel medio global del mar contribuya al incremento futuro de niveles extremos. Los estudios de Woth et al. (2006) y Brown et al. (2010), concluyen que el incremento del nivel medio global del mar tiene un potencial mayor que los cambios meteorológicos de incrementar los niveles extremos del mar a finales del siglo XXI en regiones de Australia, Irlanda y Reino Unido.

En otro estudio, se encontraron grandes incrementos en la frecuencia de niveles extremos del mar para el 2050 en un conjunto de zonas costeras en EE. UU. basados en proyecciones semiempíricas del incremento del nivel medio global del mar y estadísticas extremas del siglo XX (Tebaldi et al., 2012).

Por otro lado, mediante el uso de series de mareas proyectadas en el tiempo, el incremento del nivel medio global del mar, componentes de las fluctuaciones del nivel del mar derivadas de campos de presiones y forzamientos eólicos y la contribución del fenómeno de "El Niño" a través de proyecciones en la variación de la temperatura de la superficie del mar para el siglo XXI, Cayan et al. (2008) demostraron que, para escenarios de alto nivel de incrementos en el nivel medio global del mar, la frecuencia y magnitud de extremos a lo largo de las costas de California se ven incrementados considerablemente relativos a niveles experimentados en el siglo XX.

Niveles más altos del mar pueden reducir de forma significativa el período de retorno de la excedencia de umbrales determinados. Para una red de 198 mareógrafos cubriendo gran parte del globo terráqueo, Hunter (2012) estimó el factor de multiplicación mediante el cual la frecuencia de los niveles del mar que exceden una altura determinada aumentaría para un incremento del nivel medio global del mar de 0,5 metros. Más tarde el IPCC (2013), repetiría este experimento, pero mediante proyecciones regionales para un escenario de emisiones intermedias RCP4,5 (ambos experimentos se exponen a continuación).

Dicho factor de multiplicación dependerá exponencialmente de la inversa del parámetro de escala de Gumbel, definido por Coles y Tawn (1990) como un factor que describe las estadísticas de niveles extremos del mar causados por la combinación de mareas astronómicas y storm surges. Este factor de escala es generalmente mayor donde las mareas y storm surges son grandes, tendiendo a un factor de multiplicación pequeño y viceversa.

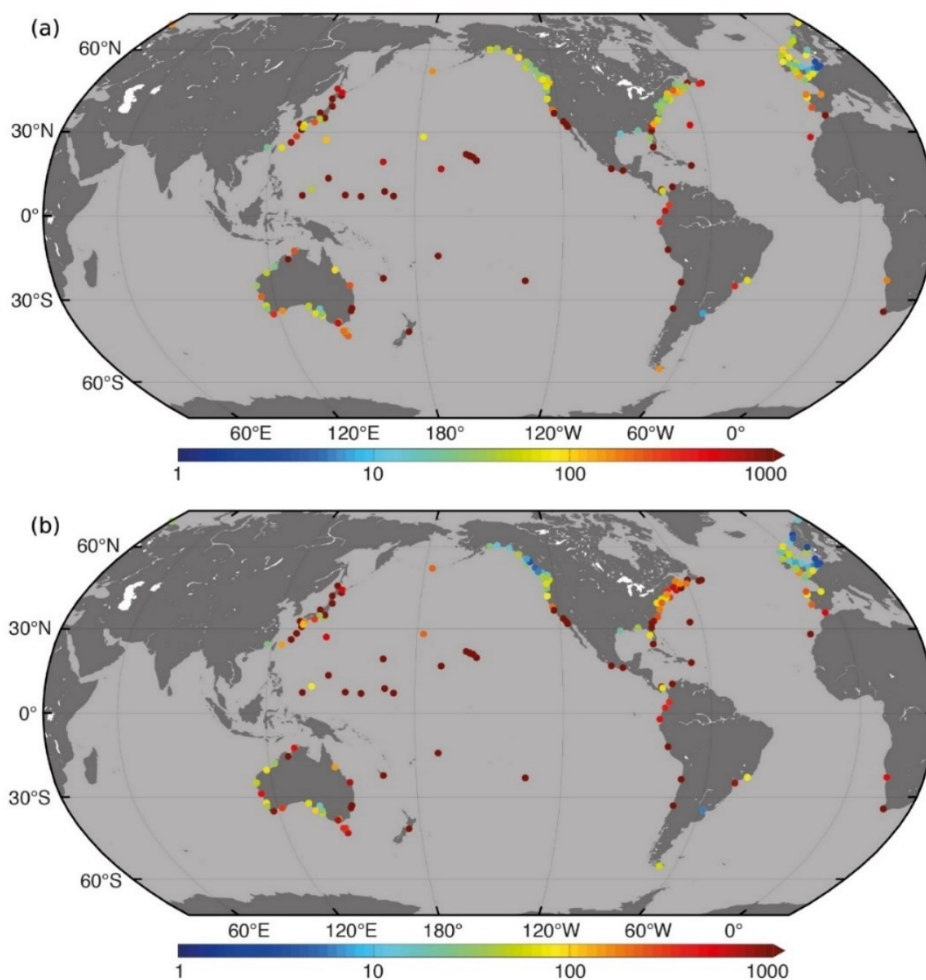


Figura 41 - Arriba, experimento de Hunter (2012). Abajo, reproducción del experimento por el IPCC (2013) a partir de proyecciones regionales para el escenario RCP4,5 (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013)

Específicamente en regiones donde las proyecciones relativas son mayores que las globales, tales como la costa este de Canadá y EE. UU. (donde la influencia de la capa de hielo de

Groenlandia resulta en un incremento del nivel medio global del mar mayor) y en regiones de gran incertidumbre (próximas a la Capa de hielo Laurentino, la cual abarcaba la mayor parte de Canadá y una gran parte del norte de EE. UU.) el factor de multiplicación es mayor, mientras que en regiones donde las proyecciones relativas son menores que las globales, tales como la costa noroeste de Norteamérica (donde el terreno se está elevando debido a cambios en los glaciares y casquetes), el factor de multiplicación es menor.

Según el IPCC (2013), es muy probable que se produzcan incrementos en la ocurrencia de niveles extremos en algunas regiones para 2100, con un probable incremento en las primeras décadas del siglo XXI. Los efectos combinados del incremento del nivel medio global del mar y cambios en los temporales incidirán considerablemente en estos niveles extremos.

II.8.4 Efectos en oleajes

Los cambios en las condiciones de las olas del mar vienen determinados por cambios en los mayores sistemas de vientos, especialmente en las áreas afectadas por temporales tropicales y extra-tropicales.

Basándose en datos recopilados a partir de sensores in-situ, observaciones altimétricas satelitales y hindcasts de modelos de ondas, Seneviratne et al. (2012) consideran que es probable que la altura de ola significativa (definida como la media del tercio superior de olas más altas en un registro) haya incrementado en regiones del Pacífico y Atlántico Norte durante los últimos 50 años. Según Young et al. (2011), estos registros de oleajes limitados dificultan la separación de largas tendencias y variaciones estacionales.

Un gran número de estudios, tales como los de Allan y Komar (2006), Adams et al. (2008), Menéndez et al. (2008), Hemer et al. (2010) e Izaguirre et al. (2011), relacionan los cambios en las climatologías de viento y oleajes a modos de variabilidad climática, tales como los fenómenos de “El Niño”, la Oscilación del Atlántico Norte y la Oscilación Antártica del Sur.

A pesar de que investigaciones como la de Wang et al. (2009) consideran las influencias antropogénicas en estos cambios, es probable que las tendencias observadas en la altura de ola significativa reportada durante los últimos 50 años sea un reflejo natural de variaciones en los forzamientos inducidos por el viento.

Recientes reducciones en las extensiones de hielo en Océano Ártico durante el verano han incrementado el área de fetch y la duración de la temporada de aguas abiertas en estas zonas según Overeem et al. (2011).

Hermer et al. (2013) presentan los resultados del primer colectivo de multi-modelos de proyecciones relacionadas con el clima y las olas, denominado COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Project, en inglés). En el mismo proyectan cambios de la altura de ola significativa en los océanos globales, con las mayores variaciones ocurriendo en el Océano Antártico, con incrementos medios aproximadamente 5-10% mayores que las medias que se tienen en el presente. También se registran variaciones en el Océano Pacífico del Sur

inferiores al 5% de incremento. Para el resto de las cuencas oceánicas se registran variaciones despreciables y disminuciones en la altura de ola significativa.

Varias investigaciones sobre la proyección dinámica de olas se han llevado a cabo con un enfoque regional, por ejemplo, en el Océano Pacífico, las proyecciones multi-modelos de Graham et al. (2013) indican la disminución en el cuantil superior de altura de ola significativa durante el invierno sobre latitudes medias del Pacífico del Norte para finales del siglo XXI asociada con una reducción de las velocidades de los vientos que soplan desde el oeste.

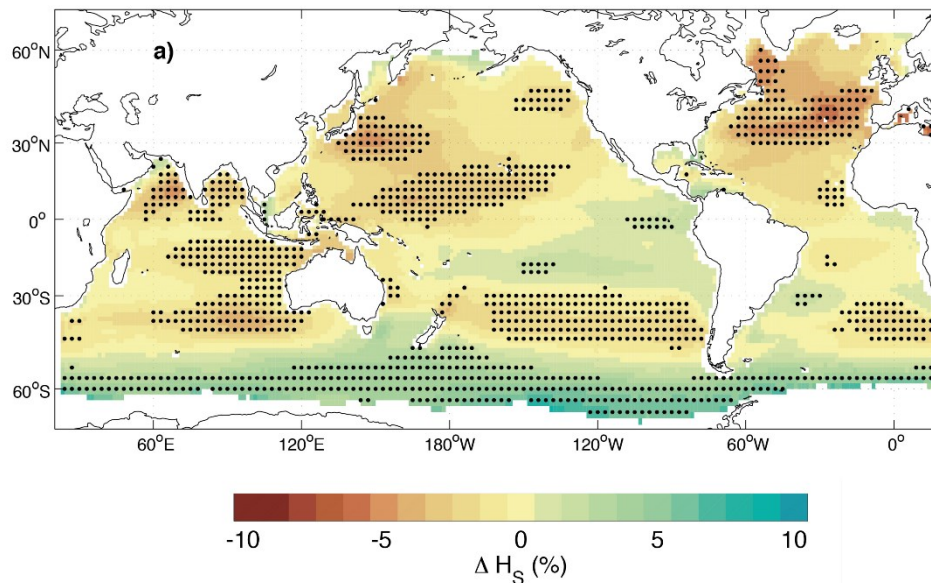


Figura 42 - Cambios proyectados en la altura de ola significativa para el período 2075-2100 comparado con 1980-2009 según Hemer et al. (2013) (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013)

Según Hemer et al. (2013), las comparaciones entre modelos están empezando a identificar aspectos comunes de las proyecciones de olas globalmente, pero en general, existe una baja confiabilidad en estas debido a las incertidumbres acerca de futuros estados de viento, particularmente del régimen de temporales, el limitado número de simulaciones realizadas en las medias de los colectivos de modelos y las diferentes metodologías utilizadas para el incremento de la resolución espacial y temporal (downscaling espacial y temporal) de los resultados de los modelos climáticos globales a escalas regionales.

II.8.5 Efectos en obras costeras

El incremento en el nivel medio global y relativo del mar puede influir en los siguientes aspectos relacionados con las obras costeras, particularmente las de abrigo, como los diques en talud:

- Remonte.
- Rebase.
- Estabilidad.

- Peso de los elementos del manto.

II.8.5.1 Remonte

Según Isobe (2013), el remonte en las obras de abrigo se incrementará debido al incremento del nivel del mar. En la siguiente imagen podemos observar debido al incremento del nivel del mar el aumento en el run-up, debido al aumento de la altura de ola a pie de la estructura, demostrando la necesidad del recrecido de estas estructuras ante esta acción, amplificada por el fenómeno del incremento del nivel del mar debido al cambio climático.

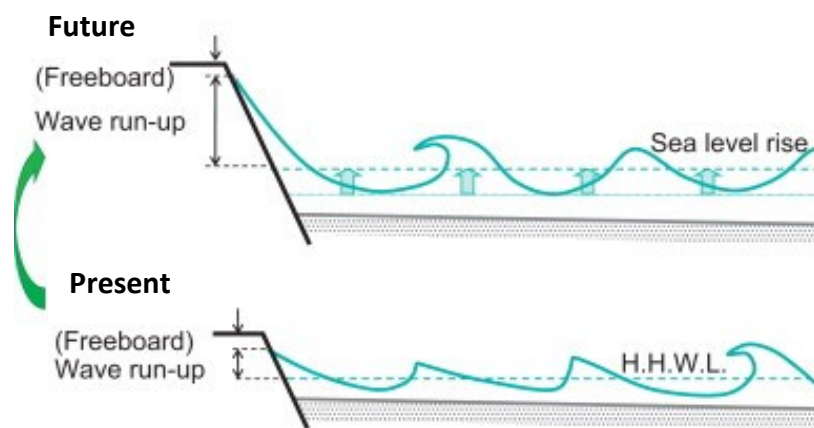


Figura 43 - Esquema del aumento del remonte debido al incremento del nivel del mar (Isobe, 2013)

II.8.5.2 Rebase

De acuerdo con lo planteado por Chini y Stansby (2012), las descargas por rebase son sensitivas al incremento del nivel del mar con la posibilidad de que aumente la frecuencia de estos eventos en función de la evolución del nivel del mar. Estos plantean que para un incremento del nivel del mar situado en el rango de 3-7 mm/año, el promedio de descargas por rebase con un período de retorno de 100 años se duplicaría para 2100 y se multiplicaría por 10 si el nivel del mar alcanza una elevación de 1 m para el mismo año.

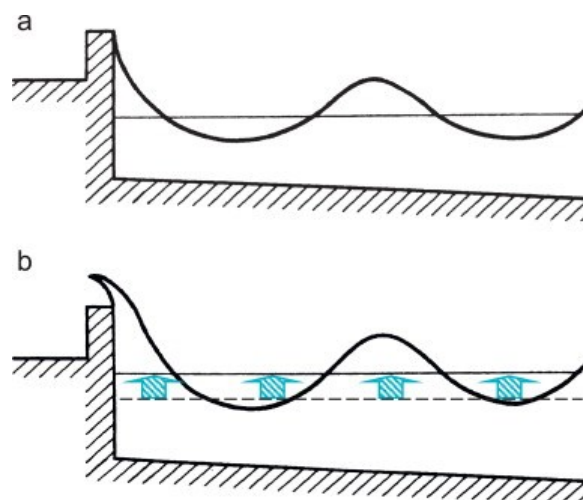


Figura 44 - Esquema del aumento del rebase debido al incremento del nivel del mar (Isobe, 2013)

Si partimos de la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el diseño y evaluación de obras de abrigo en condiciones donde el oleaje no está limitado por el fondo:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m_0}^3}} = 0,1035 * e^{\left(-\left(1,35 * \frac{R_c}{H_{m_0} * \gamma_f * \gamma_\beta * \gamma_v}\right)^{1,30}\right)}$$

Donde:

- q es el rebase medio, expresado en l/s/m sobre la estructura.
- g es la aceleración debida a la acción de la gravedad.
- H_{m_0} es la altura de ola significativa a pie de la estructura.
- R_c es el francobordo de la estructura.
- γ_f es un factor adimensional asociado a la rugosidad del manto de la estructura.
- γ_β es un factor adimensional asociado a la oblicuidad del oleaje incidente.
- γ_v es un factor adimensional que toma en consideración la existencia de una superestructura sobre la obra de abrigo.

Según el francobordo adimensional, dígame la relación R_c/H_{m_0} , a mayor altura de ola se requiere un mayor francobordo con el objetivo de reducir o eliminar los rebases en lo posible. El incremento del nivel medio global y relativo del mar intervendría en esta relación reduciendo el francobordo de la estructura y posiblemente comprometiendo su integridad de producirse un incremento de nivel considerable y su posterior combinación con eventos extremos.

II.8.5.3 Estabilidad

La estabilidad de los diques disminuye a medida que aumenta la fuerza boyante o flotabilidad debido al incremento del nivel del mar y si este se encuentra en la zona de rompientes, la altura de ola de diseño y la presión de la ola aumentarán con la profundidad del agua.

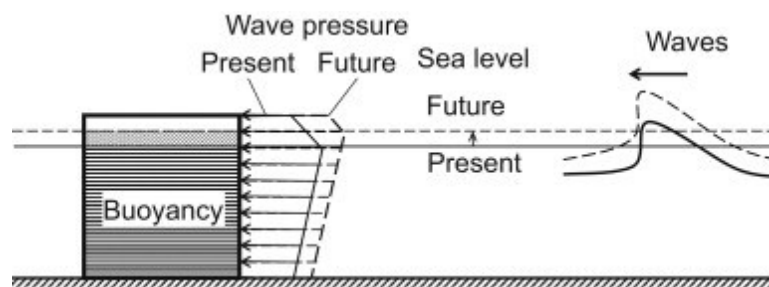


Figura 45 - Esquema del incremento de la fuerza del oleaje en un dique debido al incremento del nivel del mar (Isobe, 2013)

II.8.5.4 Peso de los elementos del manto

El peso de los elementos de protección a colocar en el manto de un dique en talud se determina mediante la fórmula de Hudson, esta es:

$$W = \frac{\rho_r * g * H_{1/3}^3}{K_D * (\rho_r / \rho_w - 1)^3 * \cot \alpha}$$

Donde:

- W es el peso necesario de las piezas del manto.
- g es la aceleración debida a la acción de la gravedad.
- ρ_w es la densidad del agua en contacto con la obra.
- $H_{1/3}$ es la altura de ola significativa de diseño.
- K_D es un coeficiente de estabilidad hidráulica asociado a la pieza.
- ρ_r es la densidad del material del que está compuesta la pieza para la cual se busca su peso.
- α es el talud de diseño del manto.

De acuerdo con esta formulación, el peso de las piezas incrementa proporcionalmente al cubo de la altura de ola significativa de diseño, lo que significa que el incremento en la altura de ola resultará en un incremento en el peso de las piezas del manto del dique.

CAPÍTULO III

III. Materiales y métodos

Con el objetivo general de estudiar la influencia del incremento del nivel del mar debido al cambio climático en las obras de abrigo y atraque de los puertos de Los Ángeles y Long Beach, la presente investigación se ha dividido en tres fases metodológicas las cuales se describen a continuación:

- Primero, se realizará el modelado y análisis mediante técnicas SIG de diversos incrementos del nivel del mar en la zona de estudio, los cuales se expondrán en este acápite. En este proceso se incorporarán las variaciones debidas a las mareas astronómica y meteorológica respectivamente, esta última asociada a un período de retorno que se calculará más adelante. Finalizado este proceso, se delimitará la superficie en riesgo de inundación de los puertos, estas son las localizadas por debajo de los niveles del mar y de mareas proyectados.
- Segundo, se analizará la variación del francobordo de seguridad de las obras de atraque que sirven a las terminales de contenedores de los puertos, comparando estos valores con los niveles mínimos y deseados de coronación permitidos por las normativas de diseño del Puerto de Long Beach.
- Tercero, en lo que respecta a las obras de abrigo, se analizarán los efectos que tendrán estos incrementos del nivel del mar en los rebases en los diques que protegen los puertos, tomando en consideración la dirección y altura de ola significativa incidente asociada a un período de retorno que se calculará más adelante. El cálculo de estos rebases, se hará mediante la ecuación 5.13 propuesta por el EurOtop (2018).

A continuación, se expondrán los materiales a utilizar en el desarrollo de la metodología planteada.

III.1 Datos geoespaciales

III.1.1 Ortofotos

Las ortofotos aéreas que se utilizarán en la presente investigación son distribuidas por el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS, por sus siglas en inglés) y la NOAA. Estas ortofotos, adquiridas y publicadas en 2016 y 2018 respectivamente cuentan con una resolución horizontal que va desde 1 a ½ metro (OCM-NOAA, 2018; USGS, 2016).

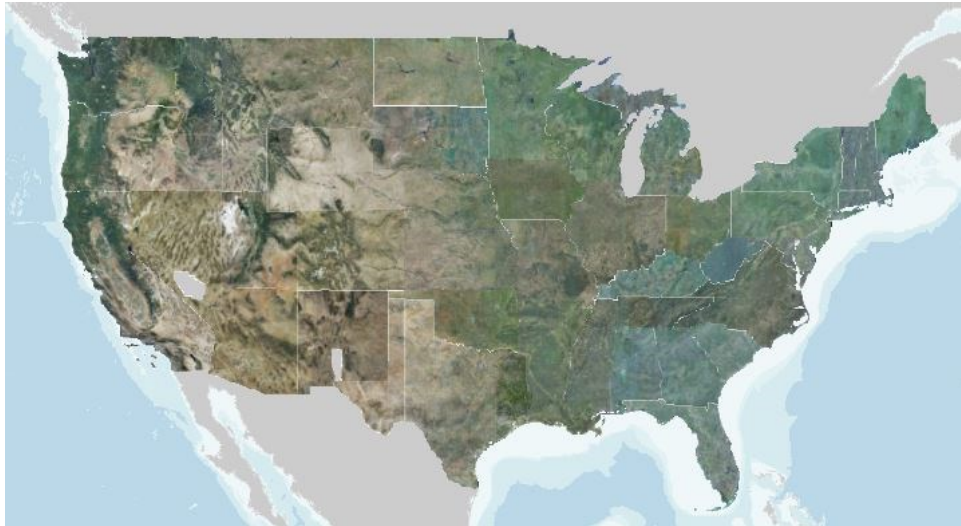


Figura 46 - Cobertura del catálogo de ortofotos utilizado (USGS, 2016)

III.1.2 Topografía

En lo que respecta a los datos topográficos, se utilizará un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución horizontal de 1 metro adquirida a través del Programa de Elevaciones 3D manejado por el USGS (PE3D o 3DEP, por sus siglas en español e inglés respectivamente) en el 2016 (3DEP-USGS, 2016). Las elevaciones mostradas en el modelo están referidas al nivel de la Pleamar Media Viva Equinoccial (PMVE).

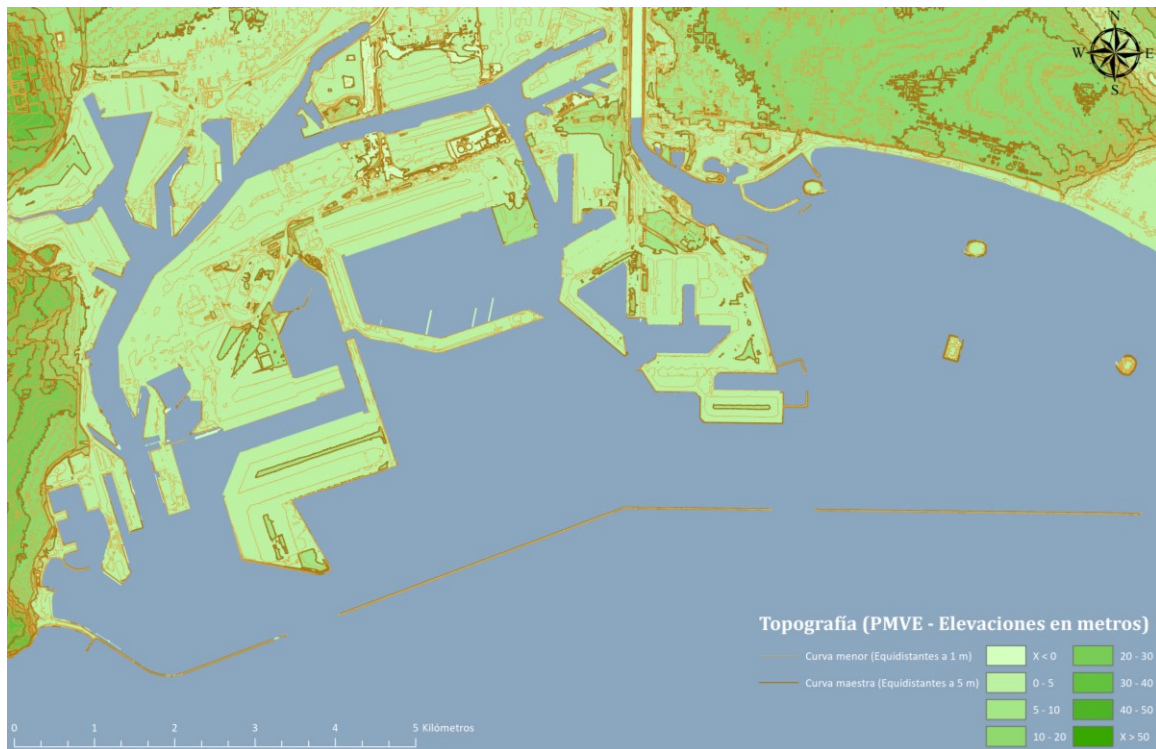


Figura 47 - Topografía del ámbito de estudio (Plano III.1 en la sección de Anejos)

III.1.3 Batimetría

Los datos relativos al relieve marino del ámbito de estudio se obtendrán a partir de un MDE compilado por la NOAA a finales de 2015 a partir de diversas fuentes de datos de elevación para todo el sur de California con una resolución horizontal promedio de 10 metros y elevaciones referidas al nivel de la Bajamar Media Viva Equinoccial (BMVE) en el ámbito de estudio (NCEI-NOAA, 2015).

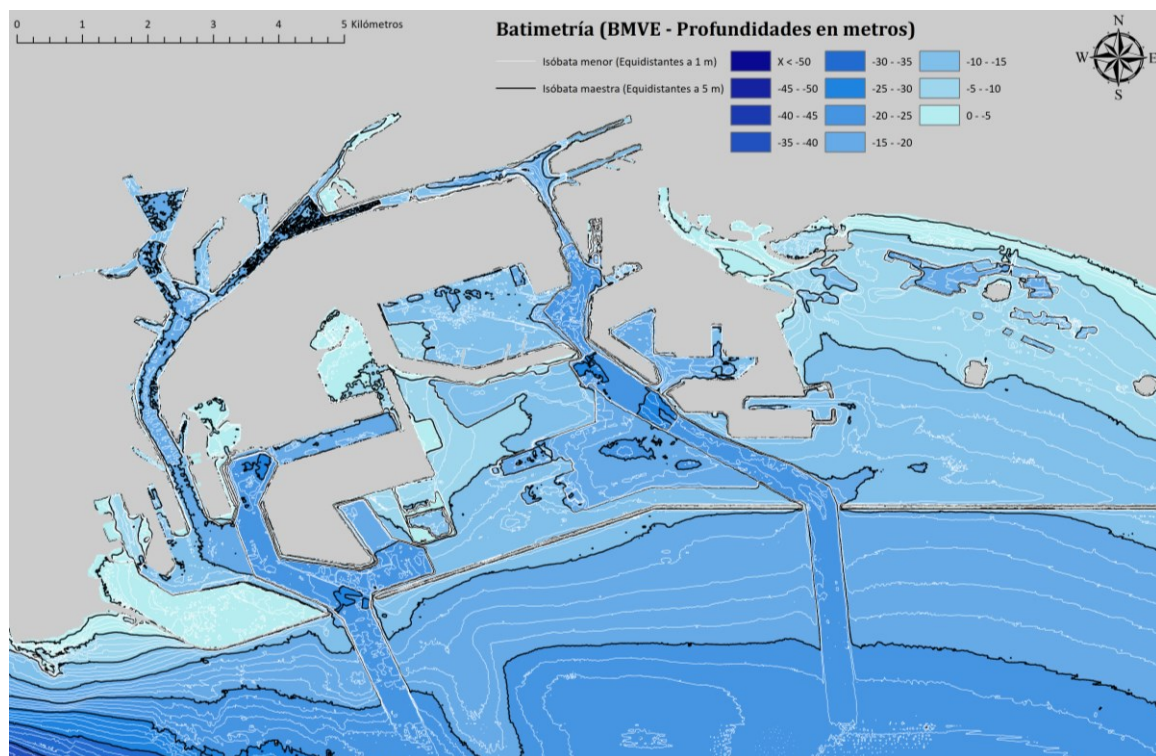


Figura 48 - Batimetría del ámbito de estudio (Plano III.2 en la sección de Anejos)

III.1.4 Vectores

Para la presente investigación se emplearán datos vectoriales (puntos, líneas y polígonos representativos de elementos en el espacio) distribuidos por el USGS y la administración del Condado de Los Ángeles a través de su geoportal de datos abiertos al público (LA County, 2019).

III.2 Incremento del nivel del mar en el ámbito de estudio

Para analizar cómo afectará el incremento del nivel medio global y nivel relativo del mar a los puertos de Los Ángeles y Long Beach se utilizarán las proyecciones de incremento relativo de la NOAA. Estas proyecciones se derivan del reporte de Sweet et al. (2017), en el cual establecen proyecciones probabilísticas del incremento del nivel medio global del mar

condicionadas por las emisiones de GEIs (específicamente CO₂) futuras y el calentamiento asociado del sistema océano-atmósfera en función de distintos escenarios basados en las Trayectorias Representativas de concentración (RCPs) descritas por Van Vuuren et al. (2011) incluidas en los informes del IPCC (2013) y el USGCRP (2017).

Con el objetivo de determinar un escenario que simule la evolución que han tenido las concentraciones de CO₂ se utilizarán los registros de la NOAA (Dlugokencky, Tans, & NOAA/ESRL, 2019) que datan de 1980 para proyectar los niveles que alcanzarán estos valores hacia el 2100, horizonte temporal del presente estudio.

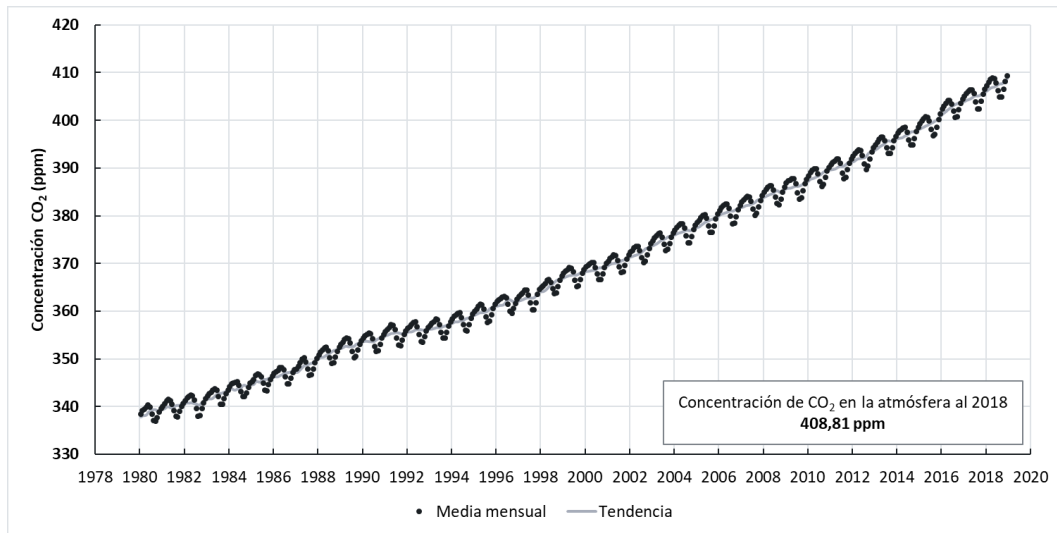


Figura 49 - Evolución de la concentración de CO₂ en la atmósfera, expresada en partes por millón (ppm) para el período 1980-2018, elaboración propia con datos de (Dlugokencky et al., 2019)

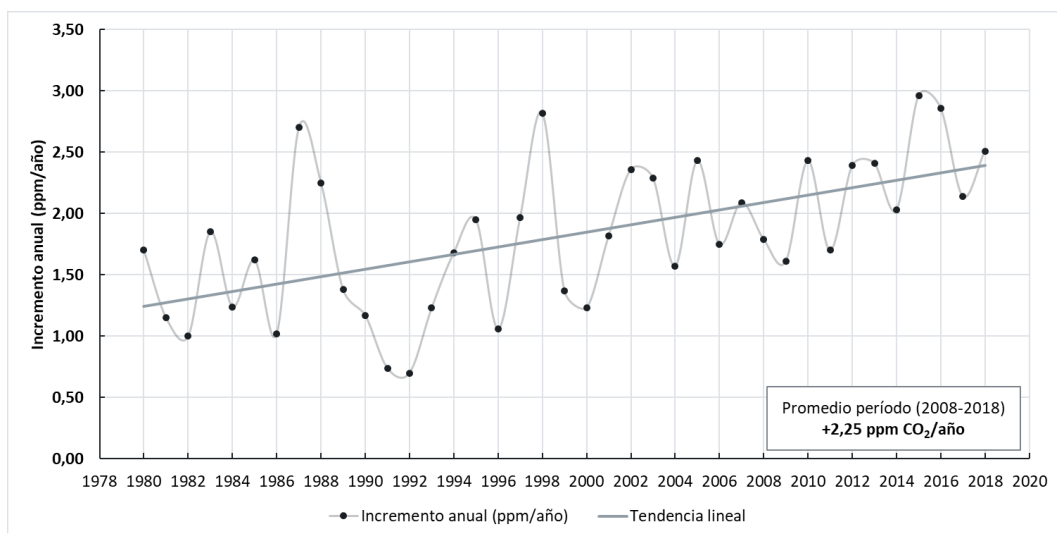


Figura 50 - Variación anual del incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, expresada en partes por millón por año (ppm/año) para el período 1980-2018, elaboración propia con datos de (Dlugokencky et al., 2019)

En las imágenes anteriores se puede observar que la concentración de CO₂ en la atmósfera al cierre del año 2018 fue de 408,81 ppm y que la misma ha crecido para la última década, dígase

el período 2008-2018, a un ritmo de aproximadamente +2,25 ppm/año. A partir de estos valores resulta posible la construcción de proyecciones de la concentración de este gas en la atmósfera para cualquier momento en el tiempo asumiendo que se mantenga invariable la tasa de incremento expuesta. Posteriormente los valores obtenidos serán comparados con los resultados del estudio de Meinshausen et al. (2011), cuyos valores fueron empleados por el IPCC en su quinto informe (2013) para definir las concentraciones de los GEIs y su evolución en el tiempo hasta el 2100.

PROYECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO ₂ POR DÉCADAS HACIA 2100					
Año	Proyección CO ₂ (ppm)	Escenarios de referencia			
		RCP2,6	RCP4,5	RCP6,0	RCP8,5
1765 (niveles preindustriales)		278			
1800		283			
1850		285			
1900		296			
1950		311			
2000		369			
Observación 2018		408,81			
2020	413,31	412,10	411,10	409,40	415,80
2030	435,81	430,80	435,00	428,90	448,80
2040	458,31	440,20	460,80	450,70	489,40
2050	480,81	442,70	486,50	477,70	540,50
2060	503,31	441,70	508,90	510,60	603,50
2070	525,81	437,50	524,30	549,80	677,10
2080	548,31	431,60	531,10	594,30	758,20
2090	570,81	426,00	533,70	635,60	844,80
2100	593,31	420,90	538,40	669,70	935,90

Tabla 6 - Proyección de la concentración de CO₂ por décadas hasta el 2100, elaboración propia con datos de (Meinshausen et al., 2011; Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013)

Una vez se determina una trayectoria de concentración representativa en base a las observaciones y tendencias actuales de los niveles de CO₂, es posible asociar la misma a uno o más escenarios de los planteados anteriormente, de esta forma si entramos en la tabla anterior y nos dirigimos al año 2050, podemos observar una proyección de 480,81 ppm de CO₂, la cual está por encima de la trayectoria trazada para el escenario RCP2,6 (442,70 ppm) y no alcanza la del escenario RCP8,5 (540,50 ppm), ubicándose entre los escenarios RCP4,5 y RCP6,0, los cuales presentan niveles de 486,50 y 477,70 ppm de CO₂ respectivamente.

De la misma forma, si tomamos como referencia la concentración proyectada para el año 2100 con 593,31 ppm de CO₂, quedando por encima del escenario RCP2,6 (420,90 ppm) y por

debajo del escenario RCP8,5 (935,90 ppm), ubicándose entre los escenarios RCP4,5 y RCP6,0, los cuales presentan niveles de 538,40 y 669,70 ppm de CO₂ respectivamente.

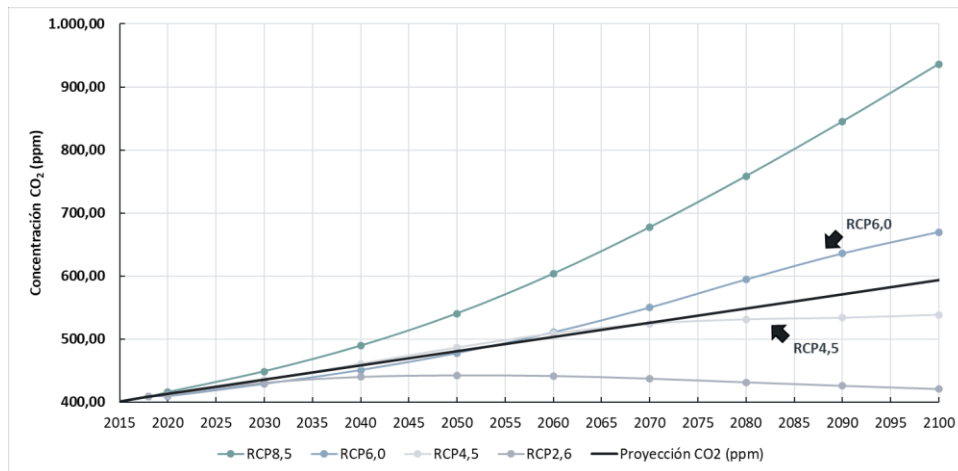


Figura 51 - Trayectorias de concentración representativas de CO₂ en el tiempo hasta el 2100 según la proyección construida a partir de datos observados y datos de escenarios de referencia de (Meinshausen et al., 2011; Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia & (eds.), 2013)

Los escenarios RCP para los cuales califica la proyección construida son los RCP4,5 y RCP6,0, para los cuales la NOAA y el USGCRP han construido proyecciones del incremento del nivel medio global y relativo del mar. Dichas proyecciones representan un total de cinco escenarios, de los cuales dos resultan de interés para el presente estudio, estos son el intermedio-bajo y el intermedio, en los cuales se estima un modesto incremento en la tasa de ascenso del nivel medio global del mar (con una tasa invariable de 5 mm/año hasta el 2100 o un incremento gradual de la misma hasta llegar a los 15 mm/año) y se toma en consideración posibles inestabilidades en los glaciares (Sweet, Horton, Kopp, LeGrande, & Romanou, 2017).

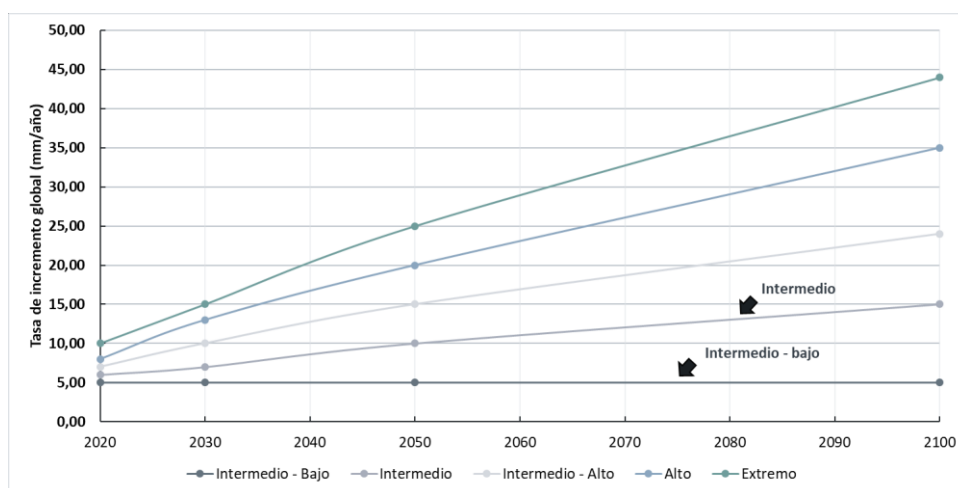


Figura 52 - Proyecciones de la NOAA y USGCRP de la tasa de incremento del nivel medio global del mar en mm/año hasta el 2100 (Sweet, Horton, et al., 2017)

Del mismo modo, para cada escenario de tasa de incremento global también se proyectan incrementos del nivel relativo del mar para el ámbito de estudio, las cuales para los escenarios

intermedio-bajo e intermedio van de 0,41 a 0,99 metros sobre la PMVE respectivamente para el año 2100 en adición a una subsidencia total acumulada de -0,08 metros para el mismo año.

Estos valores toman en consideración el incremento del nivel medio global del mar, los cambios regionales en la circulación de los océanos, los cambios en el campo gravitacional de la Tierra debido a la redistribución del hielo que se va derritiendo y el movimiento vertical del suelo, estimando una tasa anual de subsidencia del terreno de -1 mm/año.

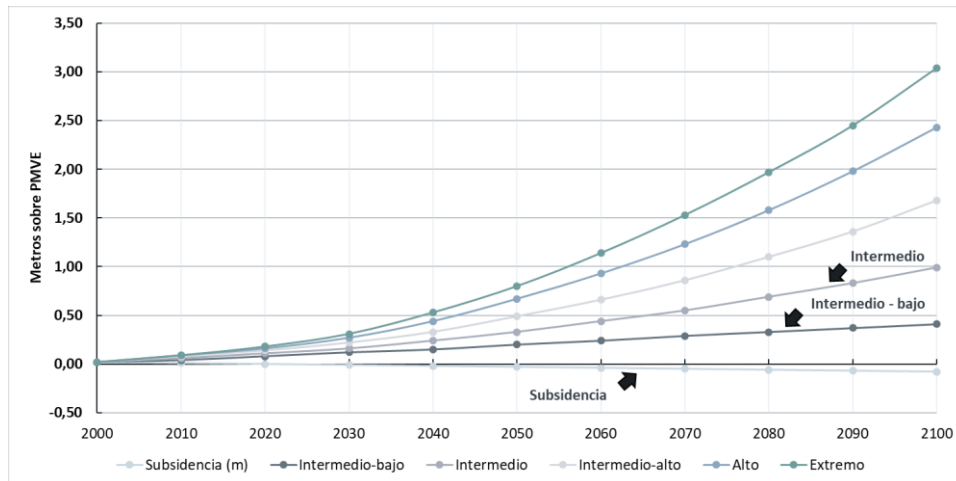


Figura 53 - Proyecciones de la NOAA y USGCRP del incremento del nivel relativo del mar para el ámbito de estudio en metros sobre la PMVE hasta el 2100 (Sweet, Horton, et al., 2017)

PROYECCIÓN DEL INCREMENTO DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO						
Año	Subsidencia (m)	Escenarios (m)				
		Intermedio-bajo	Intermedio	Intermedio-alto	Alto	Extremo
2000	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2010	0,01	0,04	0,06	0,08	0,09	0,09
2020	0	0,08	0,11	0,14	0,16	0,18
2030	-0,01	0,12	0,16	0,22	0,27	0,31
2040	-0,02	0,15	0,24	0,33	0,44	0,53
2050	-0,03	0,20	0,33	0,49	0,67	0,8
2060	-0,04	0,24	0,44	0,66	0,93	1,14
2070	-0,05	0,29	0,55	0,86	1,23	1,53
2080	-0,06	0,33	0,69	1,1	1,58	1,97
2090	-0,07	0,37	0,83	1,36	1,98	2,45
2100	-0,08	0,41	0,99	1,68	2,43	3,04

Tabla 7 - Proyección del incremento del nivel relativo del mar en el ámbito de estudio hasta el 2100, resaltando los valores correspondientes a los escenarios Intermedio-bajo e Intermedio, elaboración propia con datos de (Sweet, Horton, et al., 2017)

III.3 Estudio del clima marítimo

Las obras e instalaciones marítimas y portuarias están condicionadas en mayor medida por la acción del oleaje. Debido al paso de temporales se producen eventos extremos en los cuales se registran parámetros característicos inusuales e intensos del oleaje, tales como elevadas alturas de ola y las mareas meteorológicas asociadas a estos eventos, representando una amenaza importante a la integridad de las infraestructuras que se encuentran en este medio y zonas aledañas. Con el objetivo de reducir en lo posible el riesgo al que estará expuesta la obra o instalación que se está proyectando o evaluando, se hace necesario un análisis de la frecuencia con la que dichas situaciones extremas se presentan y su intensidad asociada expresada en valores de altura de ola significativa y nivel del mar referido a un datum de referencia.

Como hemos visto anteriormente, el incremento del nivel medio global y relativo del mar debido al cambio climático es un tema relevante para el estudio del clima marítimo y principalmente su régimen extremal. Los trabajos de Woth et al. (2006), Cayan et al. (2008), Brown et al. (2010), Menéndez y Woodworth (2010), Nicholls et al. (2011), Chini y Stansby (2012), Hunter (2012), Seneviratne et al. (2012), Tebaldi et al. (2012), Hemer et al. (2013), IPCC (2013) e Isobe (2013), confirman que el mayor desafío que este incremento de nivel representa, se debe a los efectos que se producirían en combinación con el paso de temporales, por lo cual nos centraremos en la caracterización de este régimen en el ámbito de estudio.

Para esto se usará como período de retorno (el intervalo de tiempo medio en años en el que se supera un valor extremal de una variable una sola vez), el valor calculado mediante la siguiente expresión propuesta por la ROM 0.0-01 (Ministerio de Fomento - Puertos del Estado 2001):

$$T_R = \frac{1}{1 - (1 - p_{f,ELU})^{\frac{1}{V_m}}}$$

Donde:

- $p_{f,ELU}$, es la probabilidad de fallo conjunta de los Estados Límite Últimos (ELU). Este valor para áreas portuarias comerciales sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique será según la ROM 1.0-09 igual a 0,20 (Ministerio de Fomento - Puertos del Estado 2009).
- V_m , es la vida media útil de la instalación portuaria. Este valor para áreas portuarias comerciales abiertas a todo tipo de tráfico será según la ROM 1.0-09 igual a 50 años (Ministerio de Fomento - Puertos del Estado 2009).

Sustituyendo estos valores en la expresión anterior tenemos:

$$T_R = \frac{1}{1 - (1 - 0,20)^{\frac{1}{50}}} = 224,57 \approx 225$$

Dicho período de retorno de 225 años será utilizado en el cálculo del régimen extremal de oleajes y mareas para la zona de estudio en el apartado siguiente.

En el ámbito de estudio existen tres boyas que registran datos de altura significativa, dirección y período del oleaje con una frecuencia de 30 minutos. Dichas boyas tienen dos numeraciones, la primera es una serie de cinco dígitos asignada por la NOAA y la segunda es una serie de tres dígitos asignada por el Instituto Scripps de Oceanografía (ISO o SIO, por sus siglas en español e inglés respectivamente) entidad administradora de estos instrumentos. Estas boyas son:

- **Boya 46222-NOAA (092-SIO):** localizada en las coordenadas 33°37'4" N 118°19'0" W (33.618 N 118.317 W), fondeada a una profundidad de 457 metros con registros que datan de 1998.
- **Boya 46253-NOAA (213-SIO):** fondeada a una profundidad de 66 metros y localizada en las coordenadas 33°42'1" N 118°12'2" W (33.576 N 118.181 W) con registros de datos desde 2014.
- **Boya 46256-NOAA (215-SIO):** se encuentra en las coordenadas 33°34'33" N 118°10'53" W (33.700 N 118.201 W) fondeada a una profundidad de 23,25 metros y con registros de datos desde 2015.

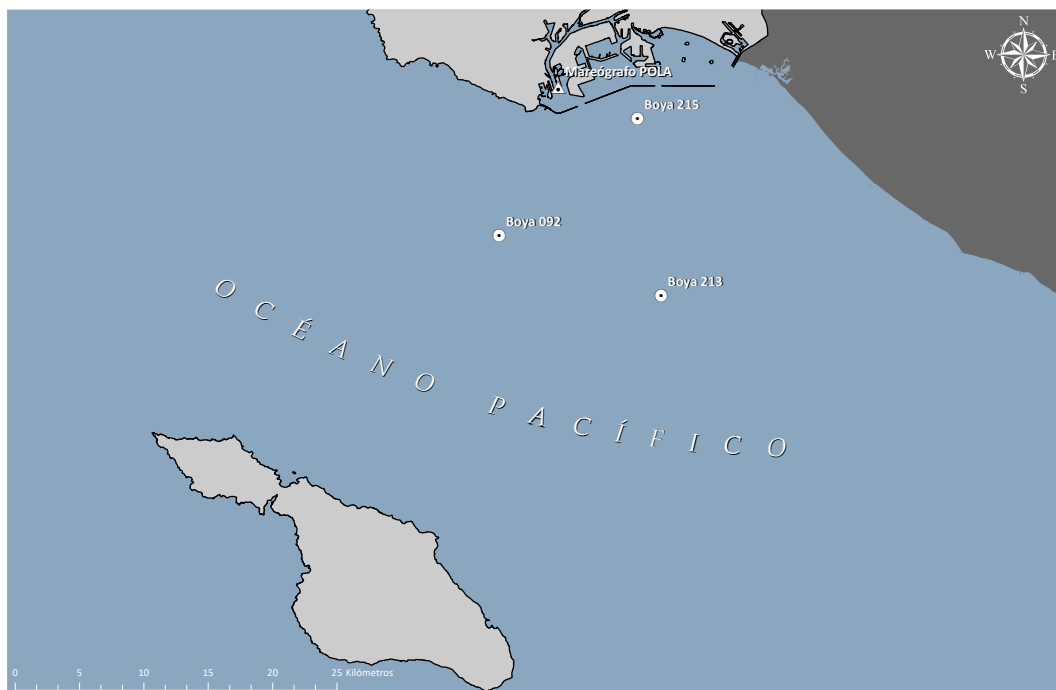


Figura 54 - Ubicación de las boyas y mareógrafo en el ámbito de estudio (Plano III.3 en la sección de Anejos)

En lo adelante, para referirnos a cualquiera de estas boyas utilizaremos la denominación del SIO.

El proceso de análisis de régimen extremal de oleajes se aplicará a los registros de la boya 215 fondeada a 23,25 metros de profundidad por encima de la boya 092, fondeada a 457 metros

de profundidad, debido a la poca variación que se observa en las magnitudes de las olas de diseño o análisis proyectadas en el horizonte de estudio para ambos registros.

Esta elección se justifica por las siguientes razones:

- Primero, el clima marítimo de la zona de estudio está afectado por la presencia de varias islas en dirección noroeste (Islas de San Miguel, Santa Rosa, Santa Cruz, Santa Bárbara y Anacapa) y suroeste (Islas de San Nicolás, San Clemente, Santa Bárbara y Santa Catalina), las cuales proveen de abrigo a la Bahía de San Pedro, emplazamiento de los puertos de Los Ángeles y Long Beach en adición a la protección de los diques actuales, transformando esta zona en un espacio complejo donde interactúan los procesos de asomeramiento, reflexión, refracción, difracción y rotura de las olas incidentes que vienen desde aguas más profundas.

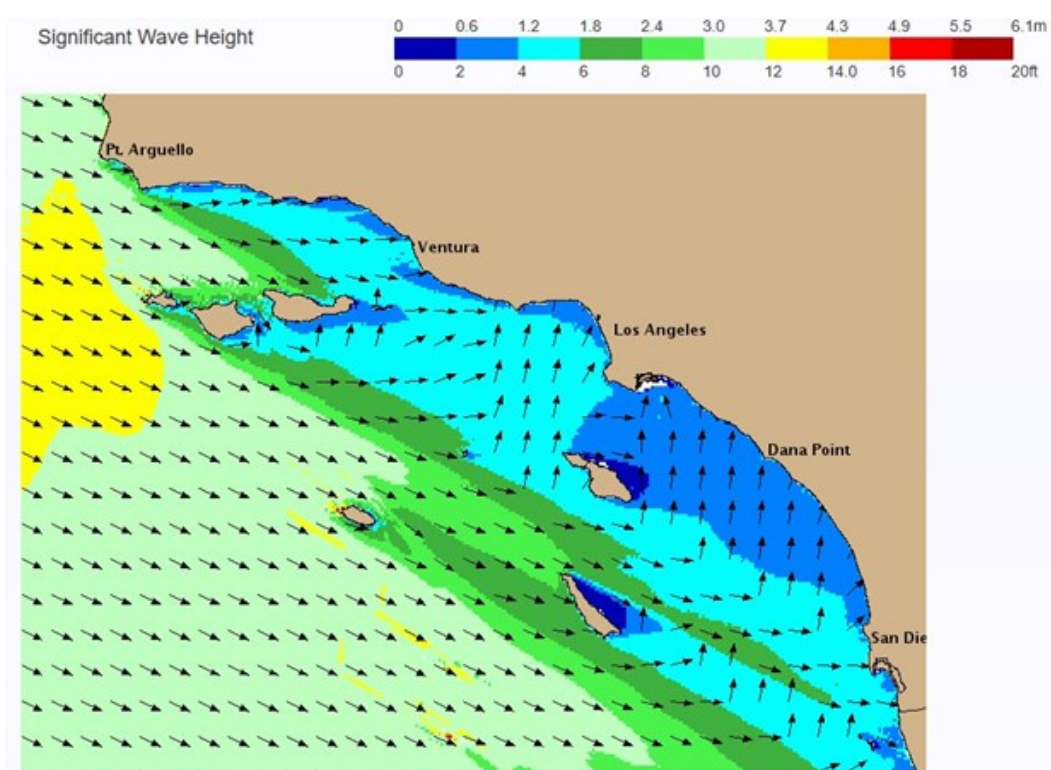


Figura 55 - Modelo del abrigo del ámbito de estudio debido a la presencia de islas en las direcciones noroeste y suroeste (CDIP-SIO, 2019a)

- Segundo, que las olas generadas por fenómenos tropicales y extratropicales que llegan a la zona de estudio desde los sectores oeste, suroeste, sur y sureste, tienden a ser abatidas por los procesos de transformación que sufren durante su trayecto a través de la Plataforma de San Pedro (cuyas isóbatas tienen una orientación hacia el sur), propagándose aproximadamente 10,50 kilómetros desde la boya 092 y 2,60 kilómetros desde la boya 215 hasta llegar a las obras de abrigo del ámbito de estudio. Por lo cual se entiende que las olas registradas por esta última boya son las que presentan una magnitud más aproximada a las que impactarán contra las obras de abrigo del ámbito de estudio.

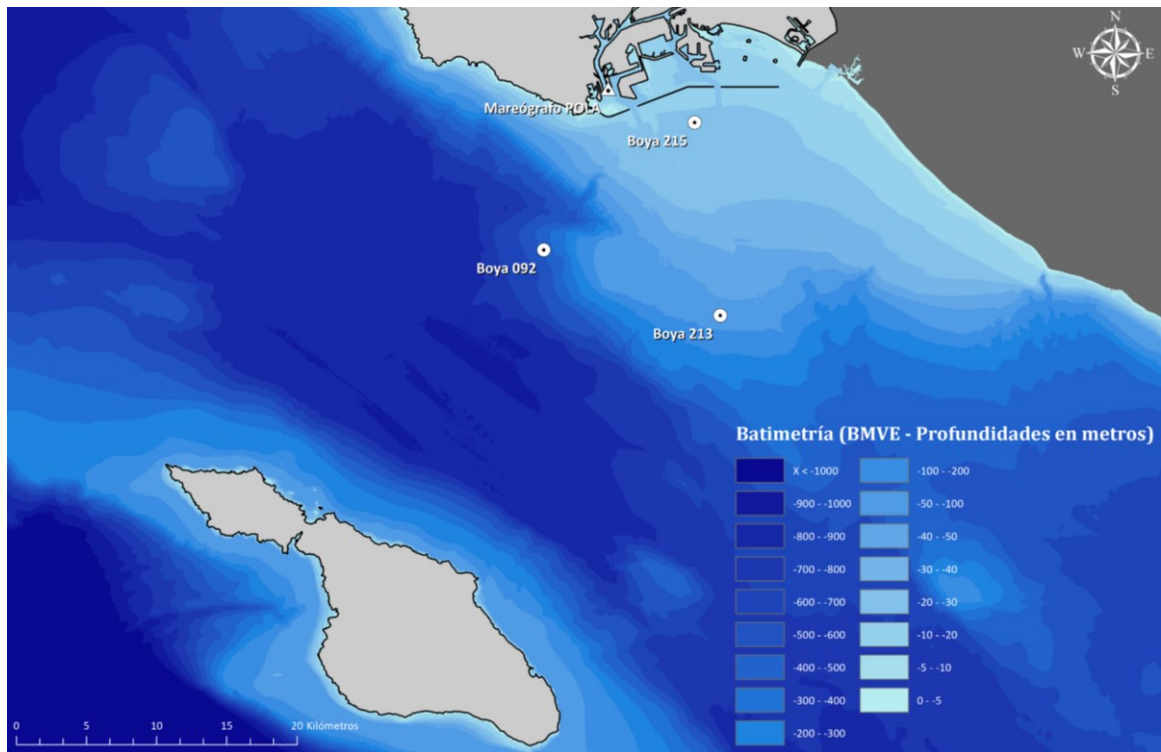


Figura 56 - Profundidad de fondeo de las boyas localizadas en el ámbito de estudio (Plano III.4 en la sección de Anejos)

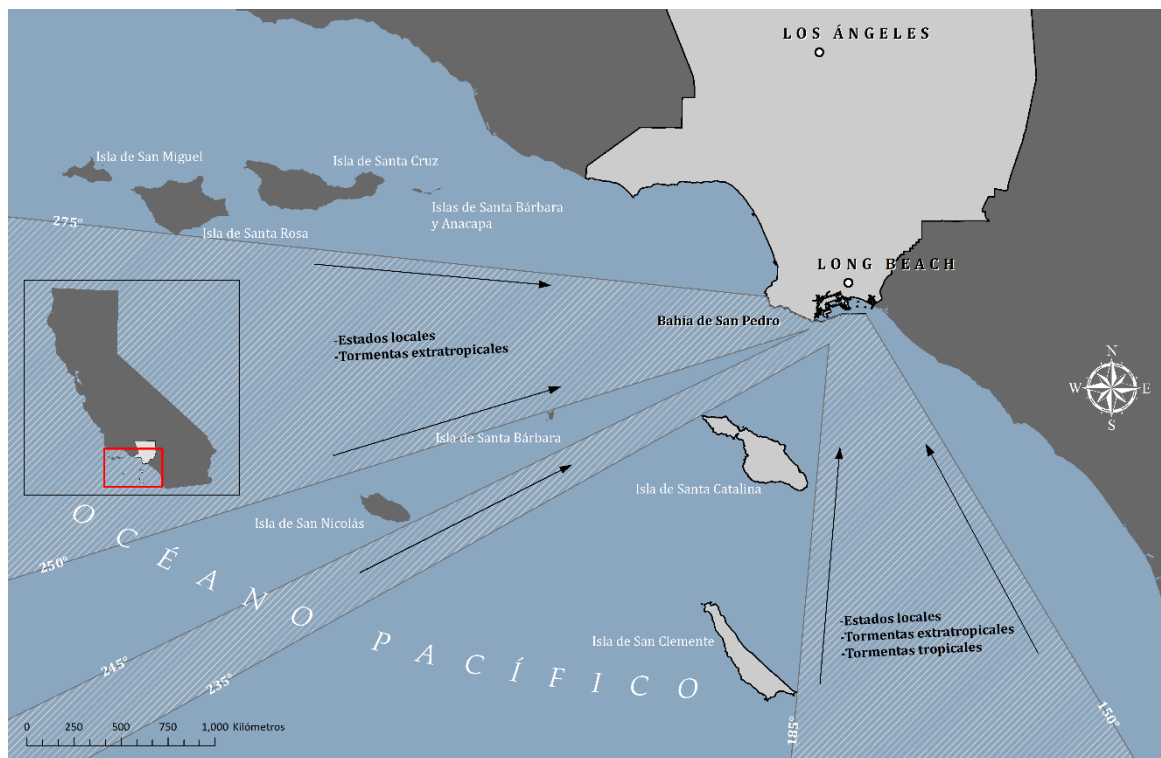


Figura 57 - Exposición y fuentes generadoras de oleajes en el ámbito de estudio (Plano III.5 en la sección de Anejos)

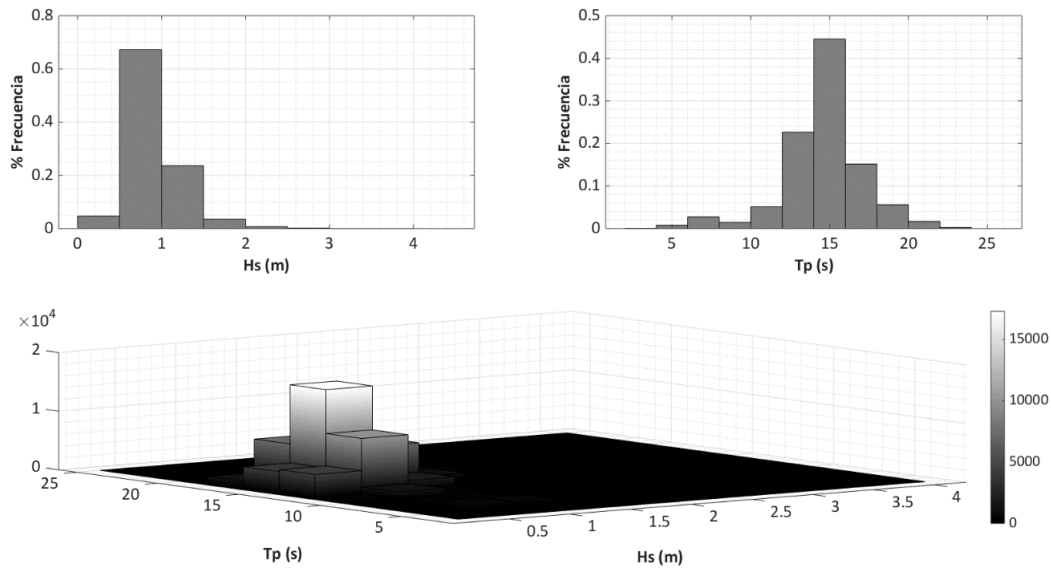


Figura 58 - Histogramas de altura de ola significativa (H_s) y período pico (T_p) para la boya 215, elaboración propia con datos de (CDIP-SIO, 2019b)

En los histogramas anteriores se puede observar que los valores más comunes de altura de ola significativa y período pico están entre 0 y 1 metro y 12 y 18 segundos respectivamente. Del mismo modo presentamos a continuación, histogramas de altura de ola significativa y la dirección del oleaje asociada a su probabilidad de ocurrencia.

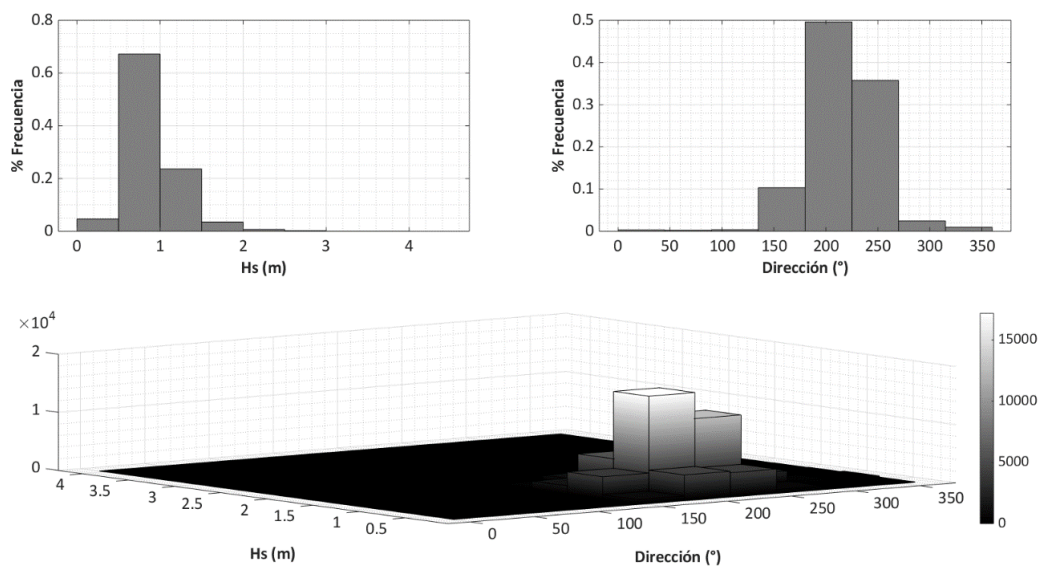


Figura 59 - Histogramas de altura de ola significativa (H_s) y dirección pico (D°) para la boya 215, elaboración propia con datos de (CDIP-SIO, 2019b)

Posteriormente presentamos la rosa de oleaje para el punto seleccionado, en la cual podemos observar nuevamente que los oleajes más frecuentes son los de altura de ola entre 0 y 1 metro. En cuanto a la distribución sectorial del oleaje, las solicitudes provenientes de los sectores oeste, suroeste, sur y sureste caracterizan el oleaje del ámbito de estudio y presentan oleajes de mayor altura, llegando a alcanzar los 3,65 metros.

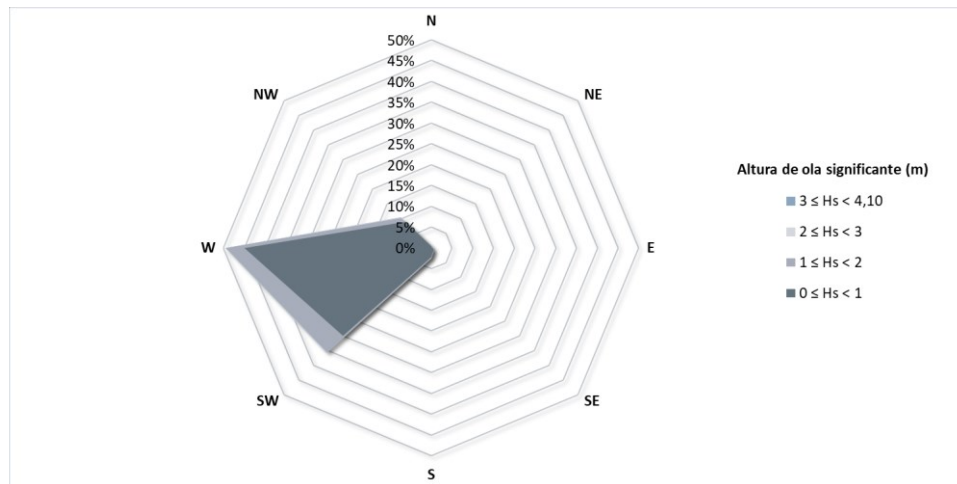


Figura 60 - Rosa de oleaje para la boya 215, elaboración propia con datos de (CDIP-SIO, 2019b)

III.3.1 Régimen extremal

III.3.1.1 Oleajes

Para la evaluación y diseño de obras marítimas se utilizan los estados de mar extremos, estos son, aquellos eventos cuya intensidad presenta una baja probabilidad de excedencia durante la vida útil de la obra en cuestión.

Existen diversos métodos de análisis de valores extremos (EVA, por sus siglas en inglés) para evaluar este régimen cuantitativo, los cuales permiten manipular la muestra estadística de datos de oleajes de varias maneras y ajustarlos a funciones de distribución probabilística que permitan realizar extrapolaciones de valores de retorno del parámetro analizado. Dentro de estos métodos podemos encontrar el de los Picos Sobre el Umbral o Peak Over Threshold (PSU o POT, por sus siglas en español e inglés respectivamente).

Este método consiste en el análisis de las alturas de ola que superan un umbral determinado, el cual de ser muy bajo incrementaría el sesgo y de ser muy alto se registrarían pocas excedencias con las cuales el modelo puede ser estimado, con lo que aumentaría su varianza. Las condiciones extremas regularmente persisten durante varias observaciones consecutivas, por lo cual es muy probable que después de una excedencia del umbral, ocurra otra de magnitud similar, mayor o menor, y así sucesivamente hasta la extinción del temporal, tendiendo estas excedencias a constituirse en grupos, dificultando la discretización de los picos (Coles, 2001).

Para solucionar esta dependencia, se establece un criterio de discretización temporal entre picos, de forma que, una vez ocurrida una excedencia, la siguiente en seleccionarse deberá estar a una determinada distancia temporal mínima (expresada en horas o días) de modo que se mantenga la independencia entre estos sucesos extremos.

Numerosos estudios se han llevado a cabo sobre la duración de un estado de mar independiente con el fin de su discretización y análisis POT, tales como los de Morton et al.

(1997) que proponen 1,25 días, Guedes y Scotto (2004) proponen 24 días, Alves (2006) propone diversos valores en función de la ubicación de la zona de análisis, etiquetando a la región a la que pertenece el ámbito de estudio como Pacífico Norte extratropical, proponiendo una duración de temporales tropicales de 3,7 días y de temporales extratropicales de 8,3 días. Del mismo modo Caires et al. (2006) proponen no menos de 2 días entre temporales y finalmente Méndez et al. (2006) cifran la ventana temporal en 3 días. Para el caso de la presente investigación utilizaremos una duración de 5 días, para definir un estado de mar independiente.

Posteriormente, estas excedencias se ajustarán a la función de distribución de probabilidad conjunta de dos parámetros Pareto Generalizada por el método de la máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés), permitiendo de esta forma estimar los niveles de retorno de la altura de ola asociada al período de retorno calculado anteriormente con un nivel de confianza del 95%.

$$H(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}}\right)^{-1/\xi}$$

Función de distribución de probabilidad conjunta Pareto Generalizada, donde:

- ξ es el parámetro de forma.
- $\tilde{\sigma}$ es el parámetro de escala.

Este análisis se realizará mediante el módulo “in2extRemes” de la autoría de Gilleland y Katz (2016), escrito en el lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico conocido como R. Luego de esto, se establecerá una relación entre las alturas de ola significantes analizadas y su correspondiente período pico a partir de una función exponencial de la forma $E(T_p) = a * H_s^b$.

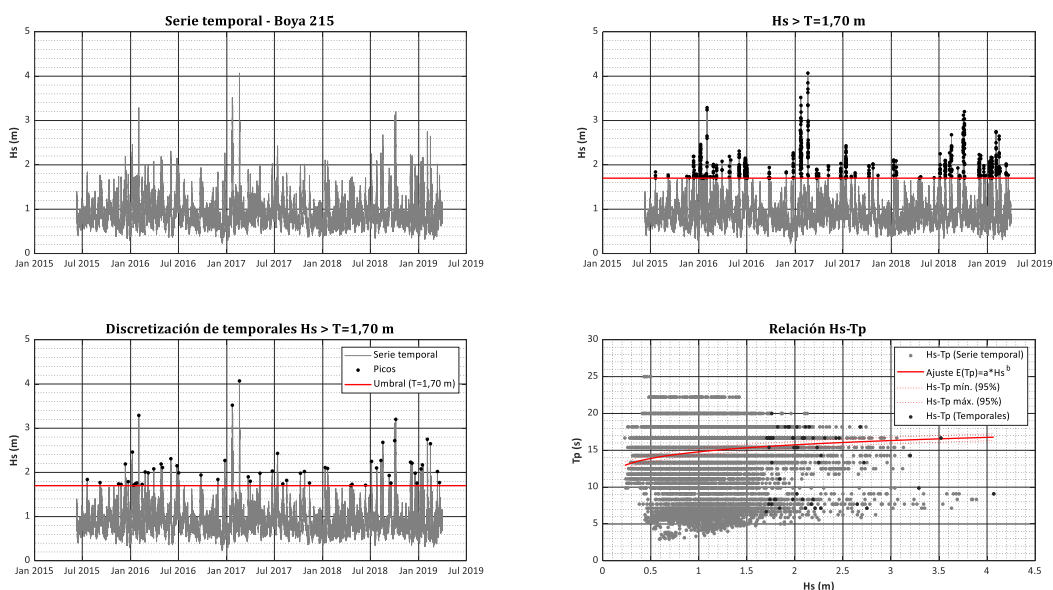


Figura 61 - Pasos ejecutados para llevar a cabo el análisis extremo de la serie de datos de la boya 215 y la relación Hs-Tp

Una vez se ha determinado la fuente de referencia de datos, se seleccionan a continuación las direcciones que caracterizan el oleaje en condiciones extremas en función de su potencial de afección a la zona de los puertos de Los Ángeles y Long Beach, descartando las que no resulten relevantes para la continuación del análisis.

Para esta etapa se toman las direcciones que caracterizan el oleaje del ámbito de estudio y se seleccionan las que tienen la mayor cantidad de temporales en la serie de datos analizada, estas son las direcciones oeste y suroeste, los cuales inciden de forma directa en los diques de los puertos y la serie de datos escalares.

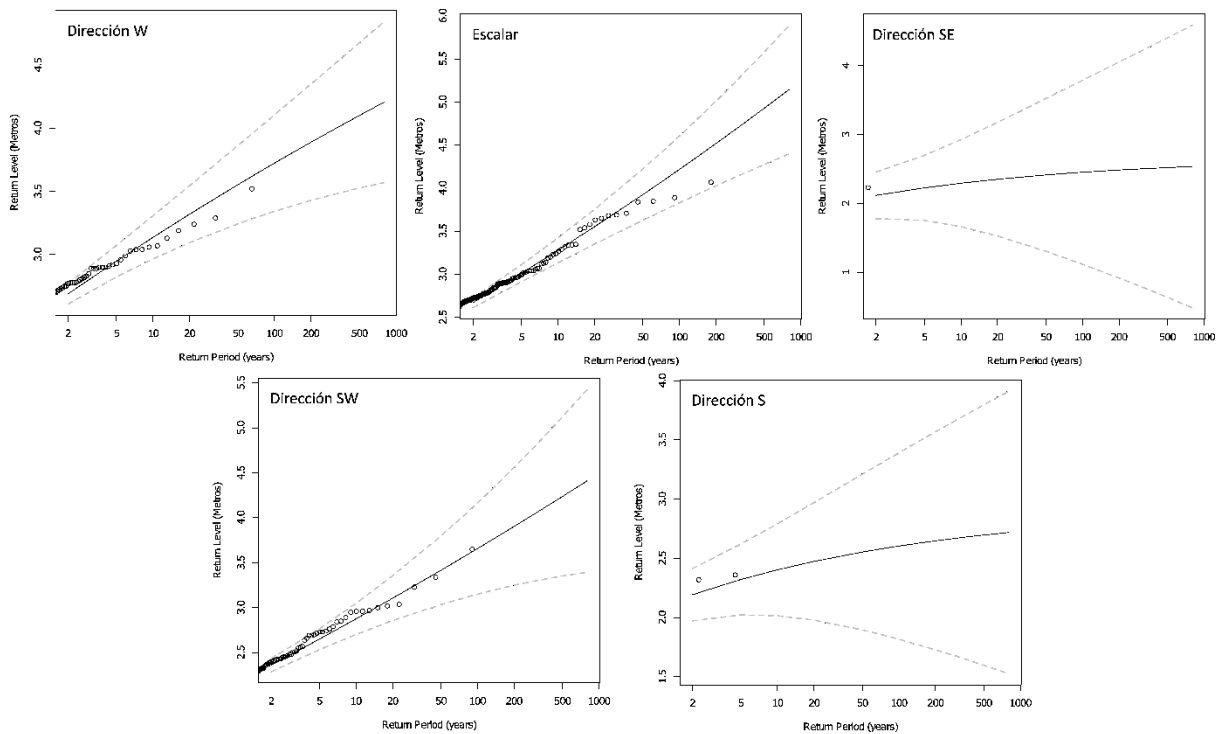


Figura 62 - Períodos y niveles de retorno de Hs en metros para la serie de datos analizada en función de las direcciones características del oleaje en régimen extremal y escalar

A continuación, se presenta un resumen de las características del régimen extremal de oleajes para el ámbito de estudio:

RÉGIMEN EXTREMAL DE OLAJES EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO										
T _R (años)	Dirección									
	Escarlar		W		SW		S		SE	
	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)	H _s (m)	T _p (s)
1	2,46	16,04	2,20	15,88	2,55	16,09	2,27	15,93	2,31	15,95
2	2,73	16,19	2,43	16,02	2,77	16,22	2,41	16,01	2,46	16,04
5	3,11	16,39	2,77	16,22	3,07	16,37	2,62	16,13	2,70	16,18
10	3,42	16,53	3,05	16,36	3,31	16,48	2,79	16,23	2,93	16,30
25	3,87	16,71	3,46	16,54	3,62	16,61	3,03	16,35	3,26	16,46
50	4,23	16,85	3,80	16,69	3,86	16,71	3,21	16,43	3,52	16,57

75	4,43	16,92	4,01	16,77	4,00	16,76	3,32	16,48	3,68	16,64
100	4,61	16,98	4,17	16,83	4,11	16,80	3,39	16,51	3,78	16,68
200	5,01	17,11	4,56	16,96	4,35	16,89	3,57	16,59	4,05	16,78
225	5,10	17,13	4,63	16,99	4,40	16,91	3,60	16,60	4,10	16,80
500	5,58	17,27	5,12	17,14	4,68	17,00	3,80	16,69	4,40	16,91
1000	6,04	17,40	5,58	17,27	4,92	17,08	3,96	16,75	4,67	17,00

Tabla 8 - Altura de ola significativa y período pico asociado al régimen extremal en el ámbito de estudio

III.3.1.2 Mareas

De la misma forma, se utilizarán los registros de niveles del mar del mareógrafo ubicado en el ámbito de estudio con el objetivo de ajustar mediante una función de distribución las excedencias del nivel de la Pleamar Media Viva Equinoccial (PMVE) y así obtener la magnitud asociada al período de retorno calculado anteriormente.

Estos registros, los cuales datan de 1923 hasta la actualidad, serán filtrados con el fin de obtener el valor máximo de marea para cada año registrado. Posteriormente, estas excedencias se ajustarán a la función de distribución de probabilidad conjunta de tres parámetros conocida como Función del Valor Extremo Generalizada (GEV por sus siglas en inglés) por el método de la máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés), permitiendo de esta forma estimar los niveles de retorno de mareas superiores a la PMVE asociados al período de retorno calculado anteriormente, con un nivel de confianza del 95%.

$$G(z) = e^{\left\{-\left[1+\xi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\}}$$

Función del Valor Extremo Generalizada, donde:

- ξ es el parámetro de forma.
- σ es el parámetro de escala.
- μ es el parámetro de localización.

Este análisis se realizará mediante el módulo “in2extRemes” de la autoría de Gilleland y Katz (2016), escrito en el lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico conocido como R.

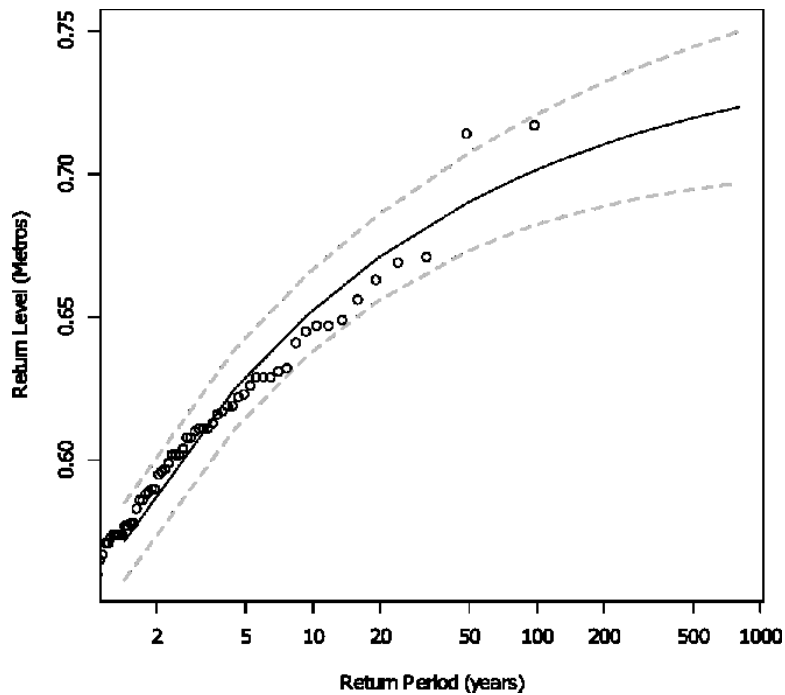


Figura 63 - Períodos y niveles de retorno de niveles superiores a la PMVE en metros para la serie de datos analizada

A continuación, se presenta un resumen de las características del régimen extremal de mareas para el ámbito de estudio:

RÉGIMEN EXTREMAL DE MAREAS EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO			
T _R (años)	Estimación inferior 95%	Estimación central	Estimación superior 95%
	(m)	(m)	(m)
1	0,297	0,346	0,396
2	0,558	0,572	0,585
5	0,611	0,625	0,639
10	0,637	0,651	0,665
25	0,661	0,676	0,691
50	0,673	0,690	0,707
75	0,679	0,697	0,715
100	0,682	0,701	0,721
200	0,689	0,710	0,732
225	0,690	0,712	0,734
500	0,695	0,720	0,744
1000	0,698	0,725	0,752

Tabla 9 - Niveles de marea superior a la PMVE y período de retorno asociado al régimen extremal en el ámbito de estudio

III.3.2 Niveles de referencia

A partir de los registros del mareógrafo mencionado en el apartado II.8.2.1, es posible obtener los niveles correspondientes a la pleamar, bajamar, sus valores medios equinocciales respectivamente y el nivel medio local del mar, así como también la carrera de marea (diferencia entre pleamar y bajamar), estos niveles son:

- **Pleamar Media Viva Equinoccial (PMVE) = +0,81 metros.**
- **Pleamar = +0,59 metros.**
- **Nivel medio local del mar (NMLM) = 0 metros.**
- **Bajamar = -0,57 metros.**
- **Datum Vertical Norteamericano de 1988 (NAVD88) = -0,80 metros.**
- **Bajamar Media Viva Equinoccial (BMVE) = -0,86 metros.**
- **Carrera de marea = 1,162 metros.**

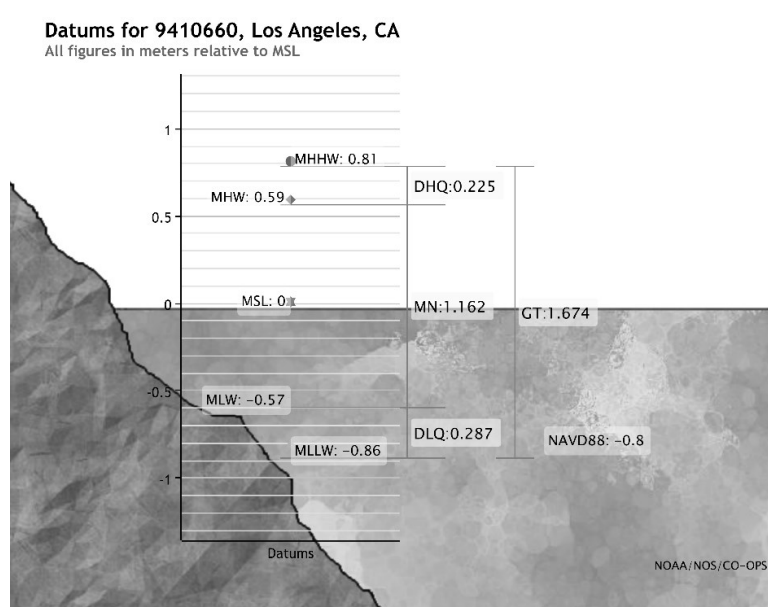


Figura 64 - Datums de referencia característicos del ámbito de estudio referidos al NMLM (NOAA, 2019a)

III.4 Modelado mediante SIG

Para la delimitación de las zonas que serán afectadas por el incremento del nivel relativo del mar en el ámbito de estudio se implementará una metodología similar a la utilizada por Poulter y Halpin (2008), Li et al. (2009), Gesch (2009), Zhang (2011) y Cooper et al. (2013).

En su estudio, Poulter y Halpin (2008) se refieren a tres aproximaciones de modelos de conectividad hidrológica para simular la inundación de dos MDE de distintas resoluciones horizontales derivados a partir de datos LiDAR. Estas aproximaciones son:

- **Regla del lado cero o aproximación «bañera»:** en esta, una celda perteneciente a una malla de datos (como en los MDE) será inundada si su elevación resultara ser inferior

al nivel del mar proyectado, por lo cual no toma en consideración la conexión superficial existente entre celdas de una misma malla.

- **Regla de los cuatro u ocho lados:** posterior a la aplicación de la regla del lado cero, estos datos son filtrados, condicionando la inundación de una celda perteneciente a una malla si su elevación resultara ser inferior al nivel del mar proyectado y si estuviera conectada a una celda adyacente que estuviera inundada o en aguas abiertas. Para llevar a cabo este método se definen dos reglas de conectividad, una de cuatro lados en la cual se evalúan los cuatro puntos cardinales de la celda analizada, conectándola si alguna de las celdas adyacentes ubicadas en estos puntos estuviera inundada y una de ocho lados, en la cual además de la condición de la regla anterior se agregan las diagonales.

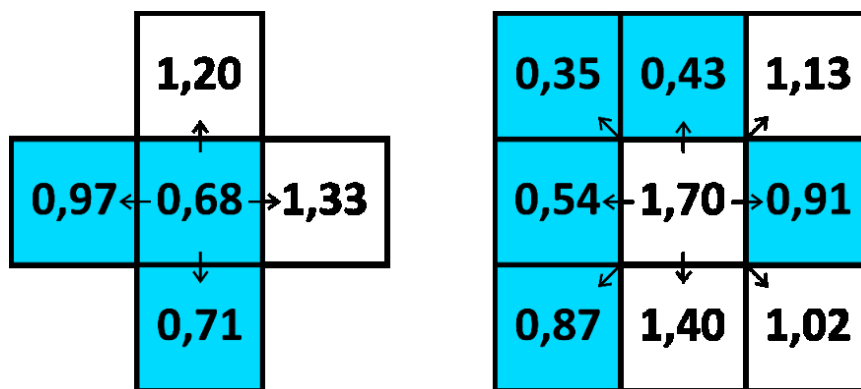


Figura 65 - Reglas de los cuatro u ocho lados a la izquierda y derecha respectivamente para la evaluación de un incremento del nivel del mar de 1 metro

La regla de conectividad elegida y la resolución espacial del MDE usado actúan en conjunto en la precisión de la delimitación de la conectividad para diferentes superficies topográficas a diferentes escalas espaciales.

Estas aproximaciones no toman en consideración los aspectos hidrodinámicos de los mares (tales como los oleajes), los cuales pueden influenciar en la profundidad y extensión de las inundaciones por lo cual se calcula un nivel estático mediante la suma de la influencia de diversas componentes que afectan el nivel del mar, considerando posteriormente todo lo que se situó por debajo de ese nivel como inundado permanentemente.

La metodología que se aplicará para el modelado y delimitación de los incrementos del nivel relativo del mar en función de las proyecciones elegidas será una aproximación del lado cero modificada, similar a la utilizada por la NOAA (2017) con la diferencia de la aplicación de dos parámetros adicionales derivados del estudio de Daniels (1992).

Para llevar a cabo este análisis, se hará uso del software ArcMap® en su versión 10.6.1, propiedad de la empresa Environmental Systems Research Institute (ESRI, por sus siglas en inglés) y sus extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst.

DATOS DE ENTRADA PARA MODELADO SIG					
ESCENARIO	PARÁMETROS				
	ΔSLR_{PMVE} (m)	$\Delta Terreno$ (m)	SS (m)	SLR _p (m)	SLR _t (m)
0. Actualidad	0,00	0,00	0,73	0,00	0,73
1. Intermedio - bajo 2050	0,20	-0,03	0,73	0,23	0,96
2. Intermedio - bajo 2100	0,41	-0,08	0,73	0,49	1,22
3. Intermedio 2050	0,33	-0,03	0,73	0,36	1,09
4. Intermedio 2100	0,99	-0,08	0,73	1,07	1,80

Tabla 10 - Datos de entrada para el modelado del incremento del nivel del mar en el ámbito de estudio, los valores de storm surge (SS (m)), corresponden a los obtenidos a partir de la banda superior de confianza del 95%

Donde:

- **ΔSLR_{PMVE} (m)**, es la variación del nivel del mar en metros con respecto de la PMVE en la actualidad correspondiente a los escenarios Intermedio-bajo e Intermedio para los años 2050 y 2100 respectivamente.
- **$\Delta Terreno$ (m)**, es la variación del nivel del terreno en metros con respecto de la PMVE (ya sea debida a la subsidencia o al rebote isostático) en la actualidad correspondiente a los escenarios Intermedio-bajo e Intermedio para los años 2050 y 2100 respectivamente.
- **SS (m)**, es la componente de la marea meteorológica asociada a la banda de confianza superior del 95% para el período de retorno de análisis ($T_R=225$ años) y cuyo valor es igual a 0,73 metros por encima de la PMVE.
- **SLR_p (m)** es la variación permanente del nivel de PMVE en el ámbito de estudio expresada en metros y es igual a la suma de las componentes **ΔSLR_{PMVE}** y **$\Delta Terreno$** según el estudio de Daniels (1992).
- **SLR_t (m)**, es la variación temporal y asociada a eventos extremos del nivel medio local del mar en el ámbito de estudio expresada en metros y es igual a la suma de las componentes **SLR_p** y **SS** según el estudio de Daniels (1992).

Posteriormente, a esta aproximación se le aplicarán una serie de herramientas de geoprocésamiento espacial, con las cuales se mantendrá la conectividad hidrológica con el mar y se obtendrán las zonas que serán inundadas temporal y permanentemente en función de los incrementos que se le apliquen al modelo.

Haciendo uso de trece puntos de referencia ubicados en la zona de estudio y sus alrededores (incluyendo el mareógrafo del Puerto de Los Ángeles), se procede al modelado de dos capas de mareas (BMVE y PMVE) del tipo ráster mediante la herramienta de interpolación de capas conocida como Distancia Inversa Ponderada (DIP o IDW, por sus siglas en inglés). A estas capas se le aplicarán los incrementos de nivel permanentes y temporales expuestos anteriormente.

PUNTOS UBICADOS EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO PARA CREAR CAPAS DE MAREAS

#	Estación	Longitud	Latitud	PMVE	Pleamar	Bajamar	BMVE	NAVD88
		(°W)	(°N)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	9410384	-117,337	33,143	0,768	0,521	-0,521	-0,771	-
2	9410396	-117,395	33,210	0,798	0,573	-0,558	-0,832	-
3	9410580	-117,883	33,603	0,804	0,579	-0,566	-0,845	0,055
4	9410583	-117,900	33,600	0,790	0,558	-0,555	-0,835	-
5	9410614	-118,005	33,653	0,787	0,561	-0,560	-0,847	-
6	9410650	-118,273	33,707	0,811	0,586	-0,574	-0,860	0,075
7	9410660	-118,272	33,720	0,813	0,588	-0,574	-0,861	0,062
8	9410680	-118,227	33,752	0,815	0,590	-0,579	-0,866	-
9	9410683	-118,268	33,753	0,805	0,586	-0,560	-0,853	-
10	9410738	-118,398	33,847	0,789	0,564	-0,546	-0,833	-
11	9410840	-118,500	34,008	0,804	0,579	-0,566	-0,849	0,057
12	9410842	-118,498	34,007	0,808	0,579	-0,557	-0,844	-
13	9410962	-120,047	34,008	0,753	0,532	-0,519	-0,814	-

Tabla 11 - Puntos utilizados para la creación de las capas de mareas para el ámbito de estudio con cotas referidas al NMLM. Datos de (Z. Yang, Myers, Dhingra, Wong, & White, 2009)

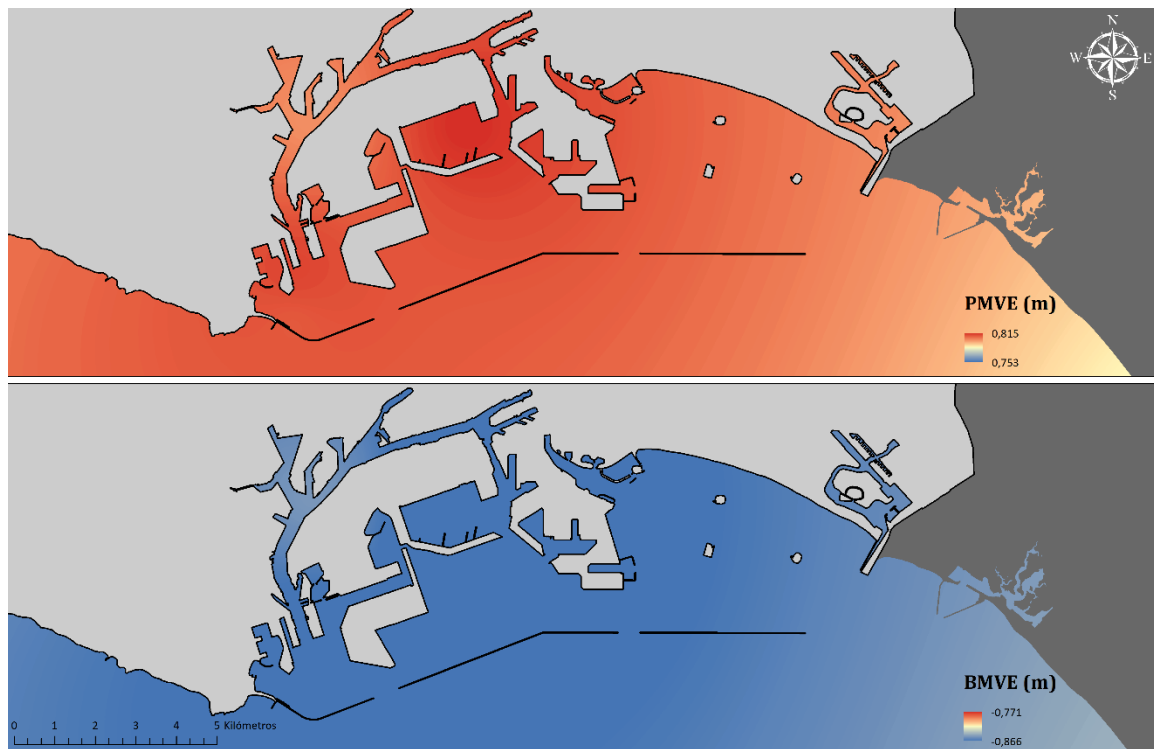


Figura 66 - Capas de mareas para el ámbito de estudio, arriba PMVE y abajo BMVE referidas al NMLM (Plano III.6 en la sección de Anejos)

A continuación, se detallan los procesos de desarrollo de la metodología descrita anteriormente en función de los objetivos planteados al inicio del acápite.

III.4.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

- Se ejecuta la herramienta Suma, con la cual se adiciona un incremento permanente (en este caso) del nivel del mar a la capa de marea de PMVE (p.ej. +0,23 metros, correspondientes al SLR_p asociado al Escenario 1). A esta capa se le llamará Capa_023.
- Seguido de esto, se ejecuta la herramienta Calculadora ráster, con la cual se sustraen los valores de la Capa_023 de la capa que contiene las elevaciones del ámbito de estudio, obteniendo así las celdas que están por debajo del nivel proyectado de 0,23 metros por encima de la PMVE. A esta capa se le llamará Profundidad_023.
- Luego, se vuelve a ejecutar la herramienta Calculadora ráster, con el propósito de obtener la extensión (no los valores) de la capa Profundidad_023. A esta capa se le llamará Extensión_023.
- A continuación, a la capa de Extensión_023, se le aplica la herramienta Grupo de regiones, con la cual se aplica la regla de los ocho lados para evaluar la conectividad de las celdas que están por debajo de la Capa_023. A esta capa se le llamará Agrupación_023.
- A la capa Agrupación_023 se le aplica la herramienta Resumen de estadísticas, con el objetivo de obtener el valor máximo de las celdas de esta capa, este valor es igual en todas las celdas conectadas hidrológicamente.
- Para incorporar este valor en el modelo, se ejecuta la herramienta Obtener valor de campo, la cual permitirá utilizar el valor calculado en el paso anterior como dato de entrada en el proceso siguiente.
- Finalizado el proceso anterior, mediante la herramienta Extraer por consulta de atributos, se extraerán las celdas que representan la inundación conectada con el océano, a partir de la capa Agrupación_023 y el valor de entrada del paso anterior. A esta capa se le llamará Conectada_023.
- Por último, para obtener la profundidad de inundación de las áreas conectadas, se ejecuta la herramienta Extraer por máscara, mediante la cual se extraen las celdas de la capa Profundidad_023 que estén cubiertas por la capa Conectada_023. A esta última capa se le llamará Con_Profundidad_023.

Este proceso se deberá repetir para todos los incrementos permanentes y temporales que se analizarán.

III.4.2 Variación del francobordo de seguridad en obras de atraque de terminales de contenedores

- A partir de las capas de PMVE cuyo nivel se ha incrementado de forma permanente y temporal respectivamente (p.ej. (p.ej. +0,23 metros, correspondientes al SLR_p

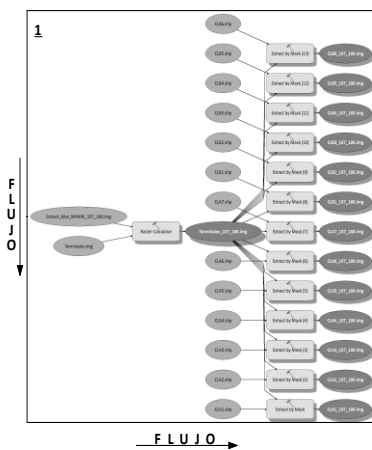
asociado al Escenario 1), se ejecuta la herramienta Calculadora ráster, sustrayendo esta capa de la capa que contiene las elevaciones de las terminales de contenedores del ámbito de estudio. A esta capa se le llamará Terminales_023.

- Posteriormente, mediante la herramienta Extraer por máscara, a partir de los archivos vectoriales tipo polígono que representan cada una de las terminales de contenedores y sus muelles, se extraerán de la capa Terminales_023 las nuevas elevaciones de estas zonas debido al incremento del nivel del mar permanente de 0,23 metros (en este caso). A cada una de estas nuevas capas se les llamará CLA/CLB_023 y MCLA/MCLB_023 si es una terminal o muelle perteneciente al Puerto de Los Ángeles y Long Beach respectivamente.

Delimitación de la superficie en riesgo de inundación



Variación del francobordo de seguridad en terminales de contenedores



Variación del francobordo de seguridad en obras de atraque de terminales de contenedores

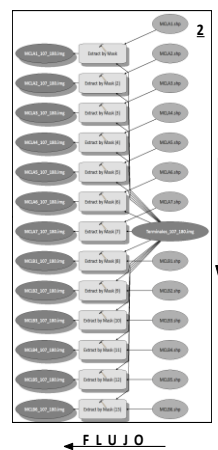


Figura 67 - Modelos utilizados para llevar a cabo los procesos descritos anteriormente (Planos III.7 y III.8 en la sección de Anejos)

III.5 Estimación de los rebases en diques

Con el propósito de evaluar los rebases en los diques de San Pedro, Intermedio y Long Beach, se han considerado diferentes puntos característicos, con el fin de proyectar el valor de altura de ola significativa en condiciones extremas que sea más desfavorable en todas las direcciones que caracterizan el oleaje de la zona y su período pico asociado.

Los rebases máximos para los diques situados en el ámbito de estudio en función de los escenarios y los diversos parámetros mencionados anteriormente, se estimarán mediante la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el diseño y evaluación de obras de abrigo en condiciones donde el oleaje no está limitado por el fondo:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m_0}^3}} = 0,1035 * e^{\left(-\left(1,35 * \frac{R_c}{H_{m_0} * \gamma_f * \gamma_\beta * \gamma_v}\right)^{1,30}\right)}$$

- q es el rebase medio, expresado en l/s/m sobre la estructura.
- g es la aceleración debida a la acción de la gravedad.
- H_{m_0} es la altura de ola significativa a pie de la estructura.
- R_c es el francobordo de la estructura.
- γ_f es un factor adimensional asociado a la rugosidad del manto de la estructura. Según el EurOtop (2018), para diques en talud cuyo manto esté compuesto por 2 capas de escollera, este factor será de 0,40 y 0,55 si su núcleo es permeable o impermeable respectivamente.
- γ_β es un factor adimensional asociado a la oblicuidad del oleaje incidente. Según el EurOtop (2018), este parámetro viene definido por el ángulo de incidencia del oleaje a pie de la estructura con respecto a su normal y se calcula a partir de la expresión $\gamma_\beta = 1 - 0,0033|\beta|$ para $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ y $\gamma_\beta = 0,736$ para $\beta > 80^\circ$. Para la estimación de los rebases se asumirá un ángulo de ataque perpendicular a cada punto analizado, por lo que este parámetro tendrá un valor de 1.
- γ_v es un factor adimensional que toma en consideración la existencia de una superestructura sobre la obra de abrigo. Según el EurOtop (2018), en los casos donde la relación $h_{sup}/R_c > 1$, donde h_{sup} es la altura de la superestructura y el oleaje no esté limitado por el fondo, el factor γ_v será igual a 1 si la fundación de la superestructura se encuentra sumergida, tal y como es el caso del único dique que cuenta con una superestructura en el ámbito de estudio.

Para verificar si el oleaje en el ámbito de estudio está o no limitado por el fondo, se aplicará el criterio de McCowan, en el cual el oleaje no rompe si $H_b < 0,78 * h_b$, donde H_b es la altura de ola y h_b es la profundidad, ambas a pie de dique (J. P. Sierra & Lo Presti Blanco, 1998).

LIMITACIÓN DEL OLEAJE POR FONDO

Condición				$H_b < 0,78 * h_b$
Dique	h_b (m)	$0,78 * h_b$ (m)	H_b (m)	Resultado
San Pedro	15,19	11,85	5,10	Oleaje no limitado por el fondo
Intermedio	16,10	12,56	5,10	Oleaje no limitado por el fondo
Long Beach	16,10	12,56	5,10	Oleaje no limitado por el fondo

El valor de H_b se corresponde con la altura de ola asociada a un período de retorno de 225 años para el régimen extremal escalar

Tabla 12 - Comprobación de que el oleaje no está limitado por el fondo en el ámbito de estudio mediante la aplicación del criterio de McCowan

En función de la seguridad estructural de las obras de abrigo, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés), clasifica los rebases de la manera siguiente (U.S. Army Corps of Engineers, 2002):

- $q \leq 2,00$ l/s por metro: sin daños a la estructura.
- $2,00 < q \leq 20,00$ l/s por metro: daños en la cresta si está desprotegida.
- $20,00 < q \leq 50,00$ l/s por metro: daños en el trasdós si está desprotegido.
- $50,00 < q$ l/s por metro: daños en toda su sección.

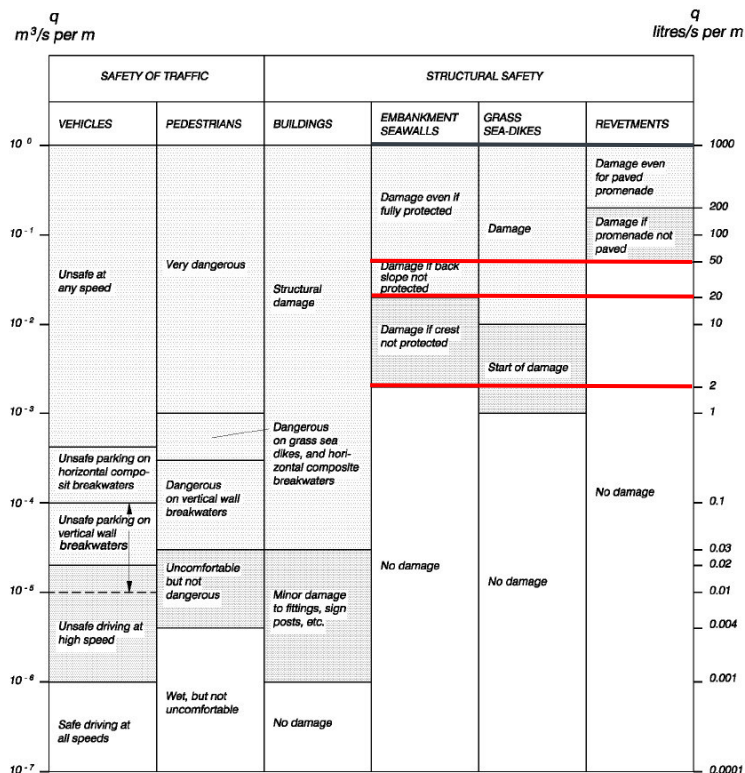


Figura 68 - Clasificación de los rebases y sus consecuencias para la seguridad tanto del tránsito de peatones y vehículos como de la integridad estructural de edificios y obras de abrigo y protección costera (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

Con el objetivo de evaluar los rebases en los diques de San Pedro, Intermedio y Long Beach, se han considerado diferentes puntos característicos con el fin de proyectar el valor de altura de ola significativa a pie de dique en condiciones extremas más desfavorable en todas las direcciones que caracterizan el oleaje de la zona y su período pico asociado.

Para todos los puntos seleccionados se ha considerado que el trazado en planta de las obras de abrigo impide que el oleaje de las direcciones E-NE-N incida de forma directa.

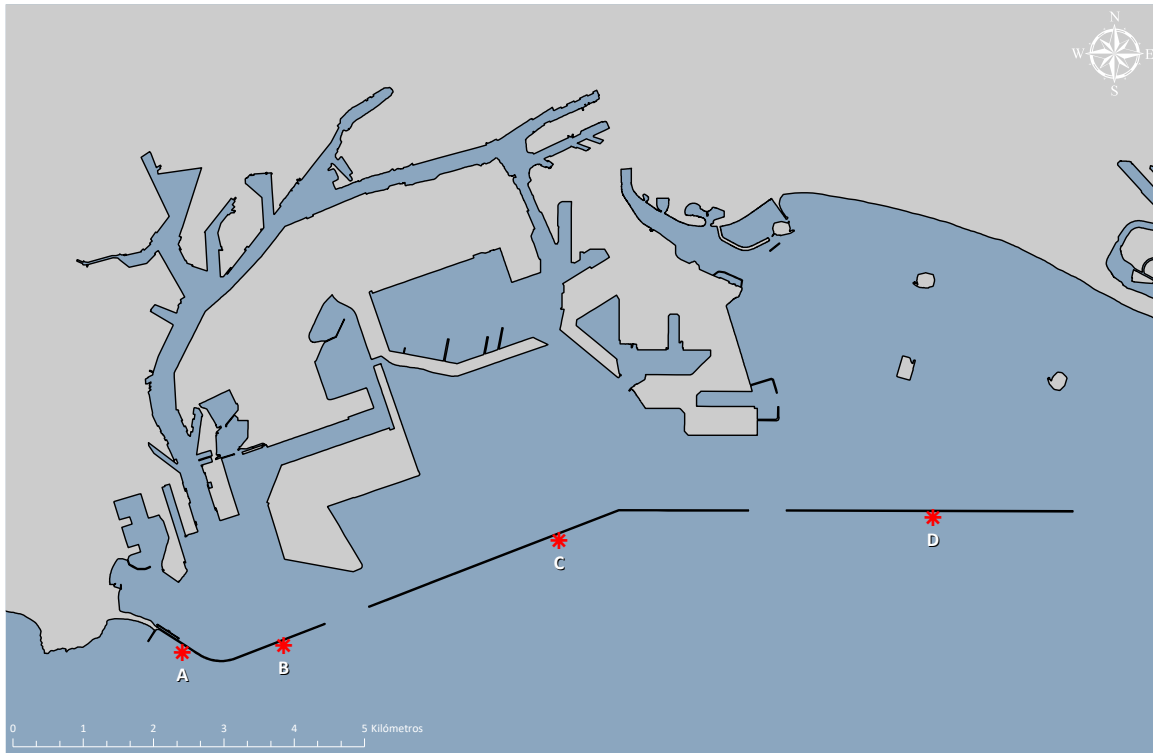


Figura 69 - Puntos característicos para la evaluación de los rebases en las obras de abrigo del ámbito de estudio (Plano III.9 en la sección de Anejos)

CAPÍTULO IV

IV. Resultados

IV.1 Escenario 0 (PMVE|SLR = 0 m|SS = 0 – 0,73 m)

IV.1.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

Para el escenario 0, correspondiente a la actualidad, se procede con un modelado de un incremento del nivel del mar permanente (SLR_p (m)) de 0 metros sobre la PMVE (simulando las condiciones actuales en el ámbito de estudio). Posteriormente se modela un incremento del nivel del mar temporal (SLR_t (m)) de 0,73 metros sobre la PMVE (correspondiente a la marea meteorológica asociada a un período de retorno de 225 años).

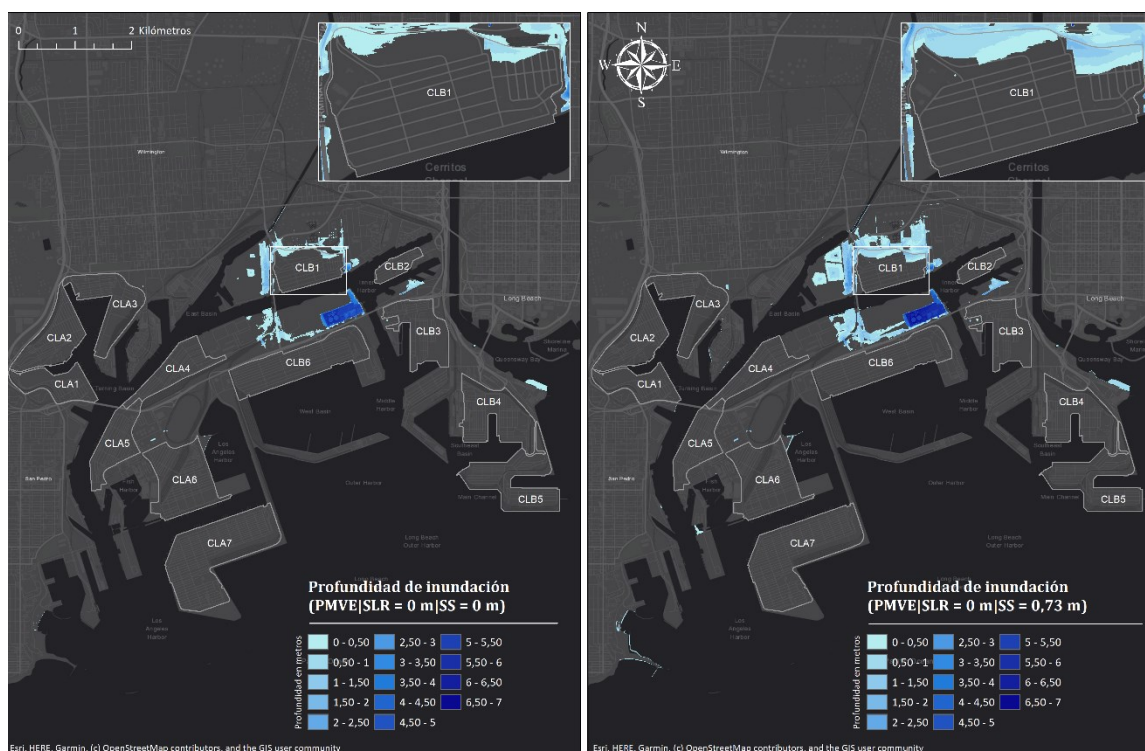


Figura 70 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 0 (Plano IV.1 en la sección de Anejos)

En lo que respecta a la superficie en riesgo de inundación, dígame, la superficie que se encuentra por debajo de los niveles modelados de PMVE (de forma permanente) y de la marea meteorológica proyectada (de forma temporal), esta será:

SUPERFICIE EN RIESGO DE INUNDACIÓN					
ESCENARIO	SLR _p (m)	Permanente (m ²)	SLR _t (m)	Temporal (m ²)	Media (m ²)
0	0,00	855.755,18	0,73	1.622.372,69	1.239.063,94

Tabla 13 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 0

IV.1.2 Variación del francobordo de seguridad

A continuación, se presentan los valores máximos, medios y mínimos del francobordo de seguridad permanente y temporal de las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos correspondientes al escenario 0:

FRANCOBORDO DE SEGURIDAD - ESCENARIO 0							
Permanente - PMVE SLR = 0 m SS = 0 m				Temporal - PMVE SLR = 0 m SS = 0,73 m			
COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES (m)				COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES (m)			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLA1	2,78	3,69	4,96	CLA1	2,05	2,96	4,23
CLA2	2,49	4,55	6,69	CLA2	1,76	3,82	5,96
CLA3	2,26	3,42	10,83	CLA3	1,53	2,69	10,10
CLA4	2,14	3,01	3,98	CLA4	1,41	2,27	3,25
CLA5	2,27	3,26	4,27	CLA5	1,54	2,53	3,54
CLA6	2,18	4,44	14,83	CLA6	1,45	3,71	14,10
CLA7	2,72	4,07	10,76	CLA7	1,99	3,34	10,03
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLA1	3,23	3,42	3,79	MCLA1	2,50	2,69	3,06
MCLA2	3,21	3,54	3,86	MCLA2	2,48	2,81	3,13
MCLA3	3,43	3,60	3,97	MCLA3	2,70	2,87	3,24
MCLA4	3,49	3,61	3,92	MCLA4	2,76	2,88	3,19
MCLA5	3,03	3,43	4,24	MCLA5	2,30	2,70	3,51
MCLA6	3,48	3,54	3,73	MCLA6	2,75	2,81	3,00
MCLA7	3,26	3,49	3,81	MCLA7	2,53	2,76	3,08
COTAS PUERTO DE LONG BEACH (m)				COTAS PUERTO DE LONG BEACH (m)			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLB1	-1,16	2,00	4,00	CLB1	-1,89	1,27	3,27
CLB2	2,41	3,21	4,99	CLB2	1,68	2,48	4,26
CLB3	2,08	4,51	13,86	CLB3	1,35	3,78	13,13
CLB4	3,17	3,78	10,45	CLB4	2,44	3,05	9,72
CLB5	2,85	3,99	5,59	CLB5	2,12	3,26	4,86
CLB6	2,74	3,26	9,80	CLB6	2,01	2,53	9,07

IV. Resultados

Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLB1	2,68	2,99	3,51	MCLB1	1,95	2,26	2,78
MCLB2	3,30	3,45	4,30	MCLB2	2,57	2,72	3,57
MCLB3	3,82	4,01	4,33	MCLB3	3,09	3,28	3,60
MCLB4	3,12	3,52	4,19	MCLB4	2,39	2,79	3,46
MCLB5	3,49	3,69	4,17	MCLB5	2,76	2,96	3,44
MCLB6	3,25	3,39	3,73	MCLB6	2,52	2,66	3,00

Tabla 14 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 0

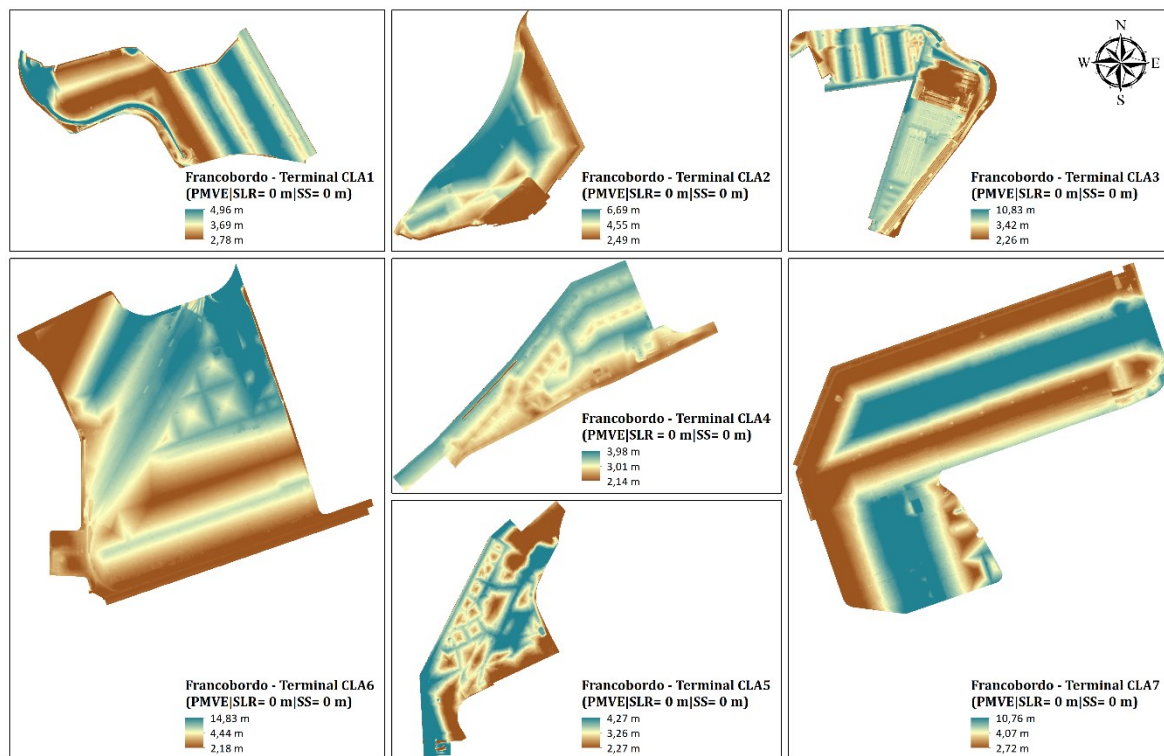


Figura 71 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.1 en la sección de Anejos)

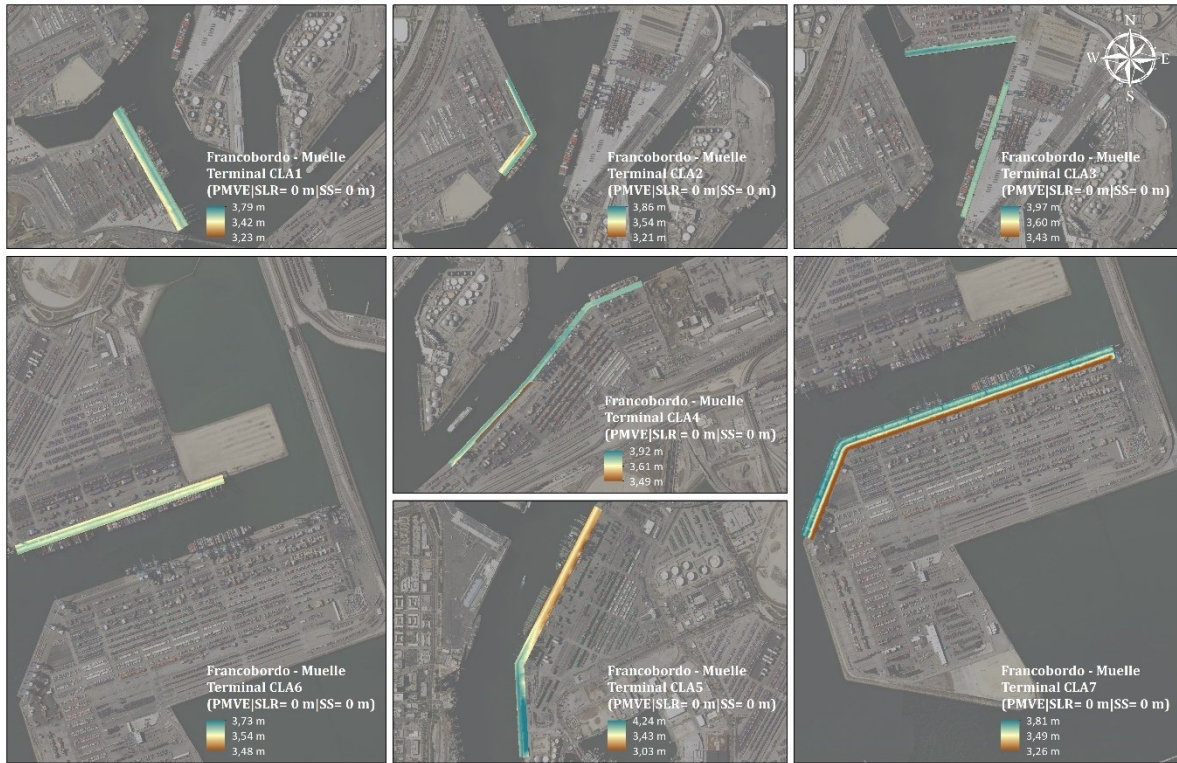


Figura 72 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.1.1 en la sección de Anejos)

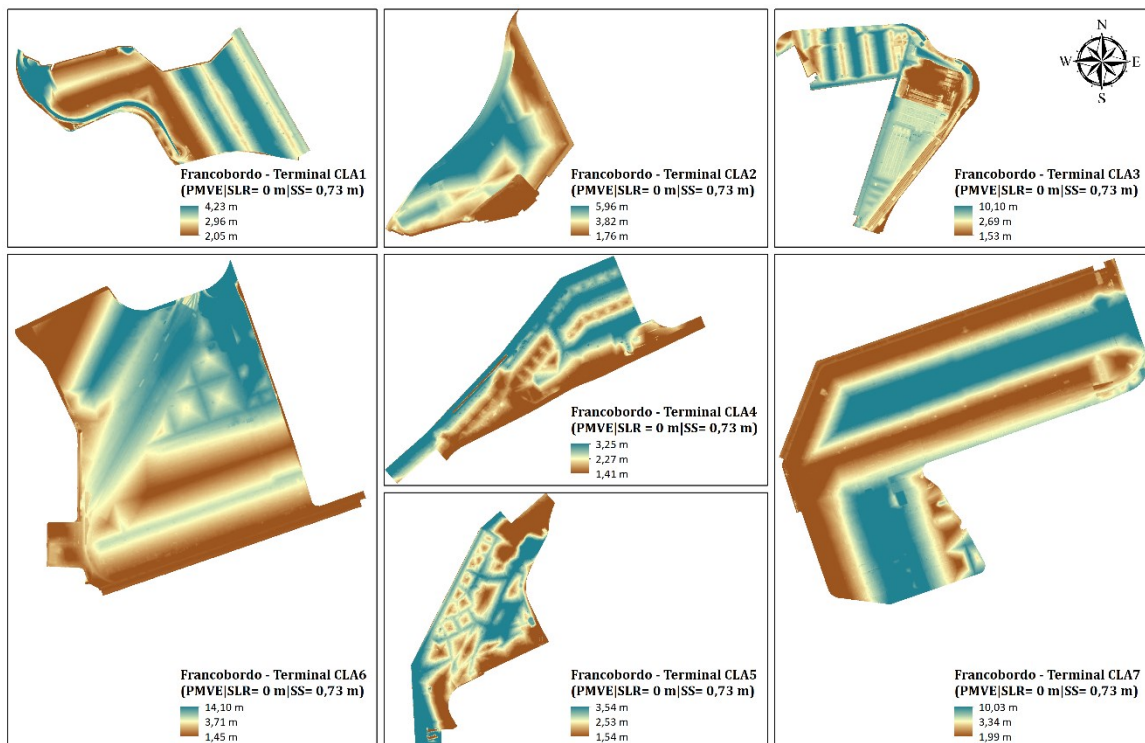


Figura 73 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.2 en la sección de Anejos)

IV. Resultados

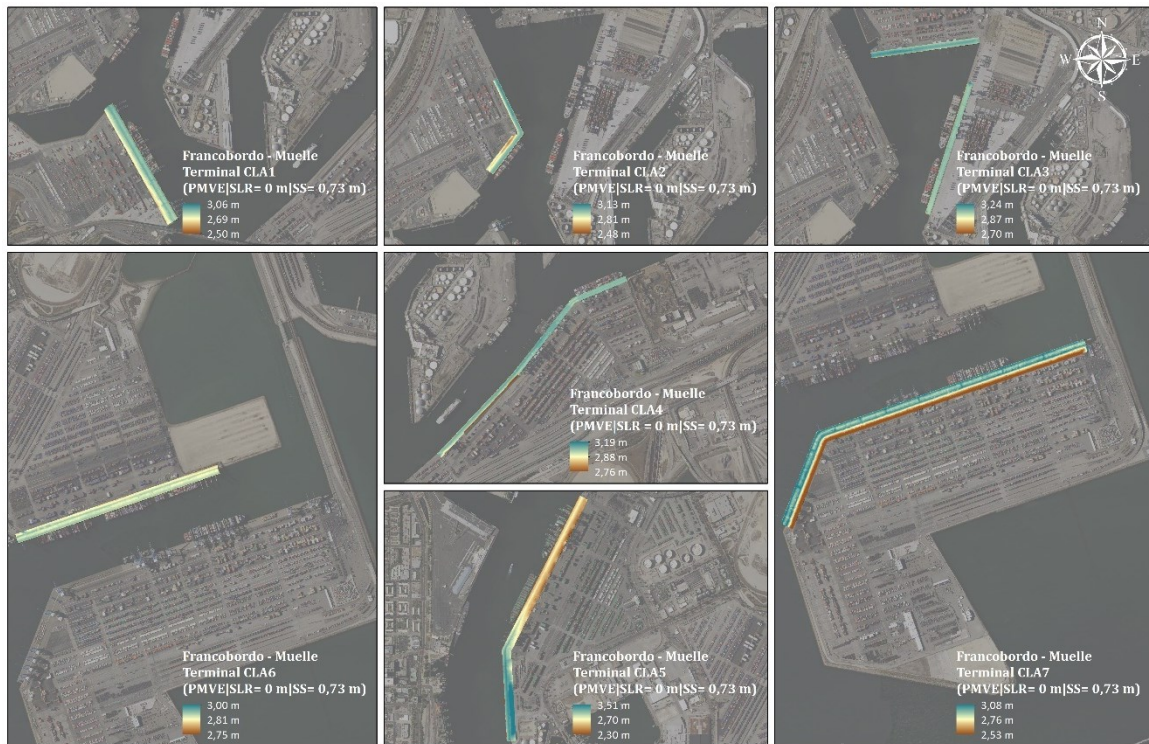


Figura 74 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.1.2.1 en la sección de Anejos)

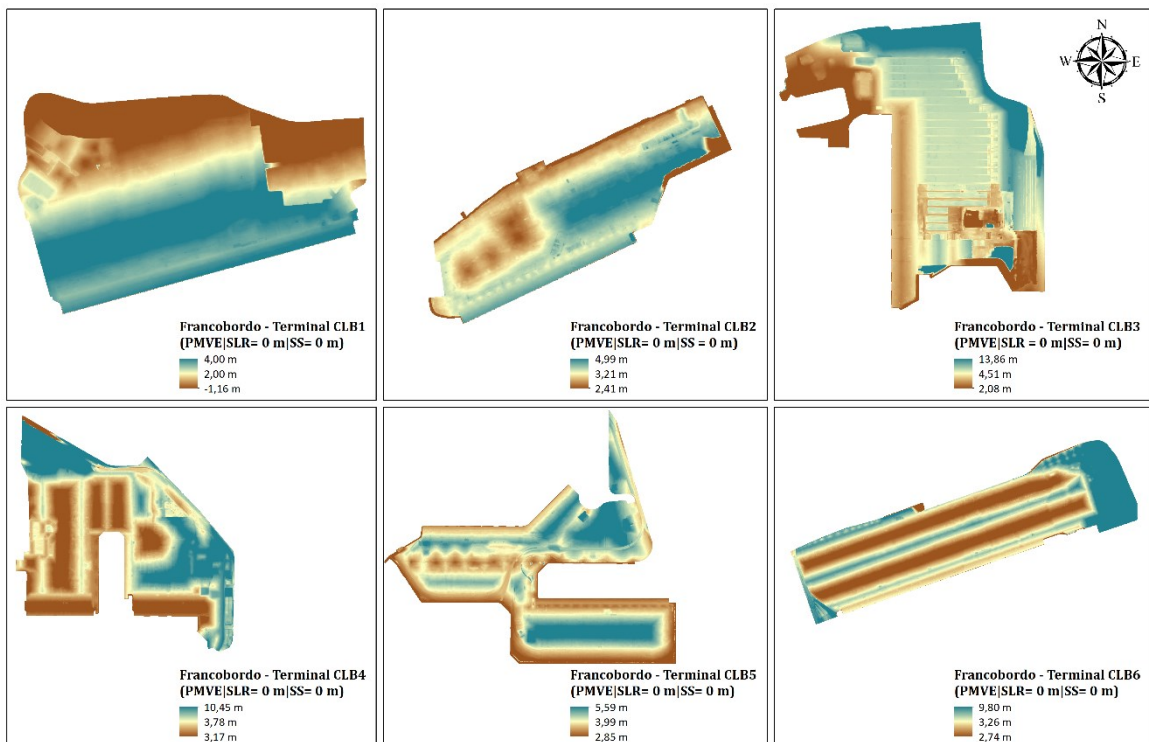


Figura 75 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.3 en la sección de Anejos)



Figura 76 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 0 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.3.1 en la sección de Anejos)

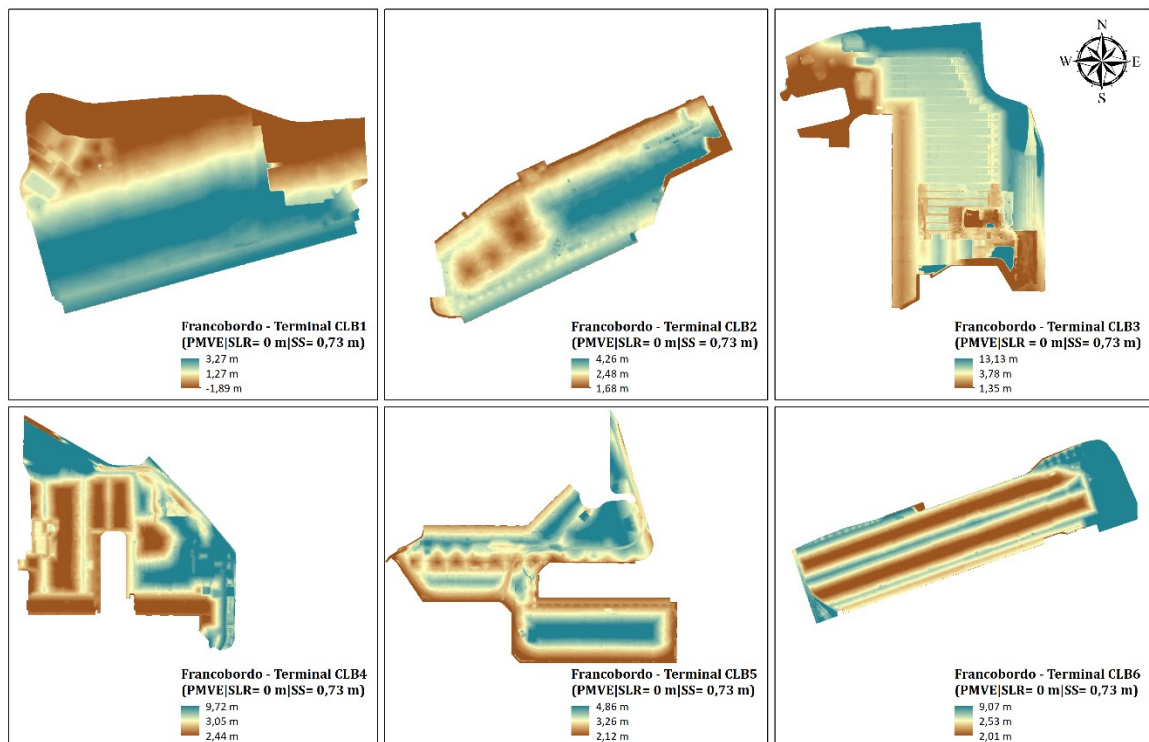
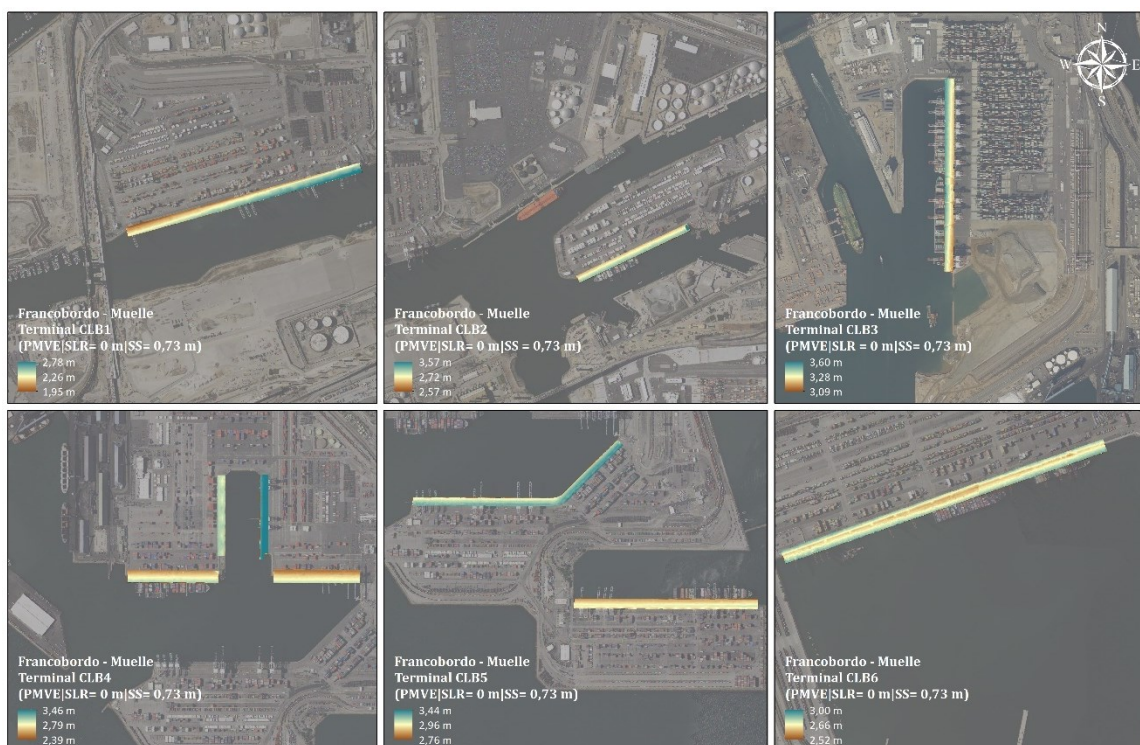


Figura 77 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 0 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.1.4 en la sección de Anejos)



IV.1.3 Estimación de rebases en diques

Los rebases en los diques, estimados mediante la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el presente escenario en función de la altura de ola significativa a pie de dique con un período de retorno de 1, 50, 100 y 225 años son:

ESTIMACIÓN DE REBASES - ESCENARIO 0				
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 1 año		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	2,55	16,00	2,60	9,02
B	2,31	16,00	2,60	3,93
C	2,31	16,91	2,60	26,84
D	2,27	16,91	2,60	23,99
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 50 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	3,86	16,00	2,60	134,14
B	3,52	16,00	2,60	80,65
C	3,52	16,91	2,60	245,10
D	3,21	16,91	2,60	161,97
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 100 años		

PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,11	16,00	2,60	185,09
B	3,78	16,00	2,60	119,96
C	3,78	16,91	2,60	330,40
D	3,39	16,91	2,60	207,79
PERÍODO DE RETORNO			T_r = 225 años	
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,40	16,00	2,60	257,36
B	4,10	16,00	2,60	182,85
C	4,10	16,91	2,60	454,98
D	3,60	16,91	2,60	269,82

Tabla 15 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 0

IV.2 Escenario 1 (PMVE|SLR = 0,23 m|SS = 0 – 0,73 m)

IV.2.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

Para el escenario 1, se procede con un modelado de un incremento del nivel del mar permanente (SLR_p (m)) de 0,23 metros sobre la PMVE. Posteriormente se modela un incremento del nivel del mar temporal (SLR_t (m)) de 0,73 metros sobre el incremento modelado anteriormente (correspondiente a la marea meteorológica asociada a un período de retorno de 225 años).

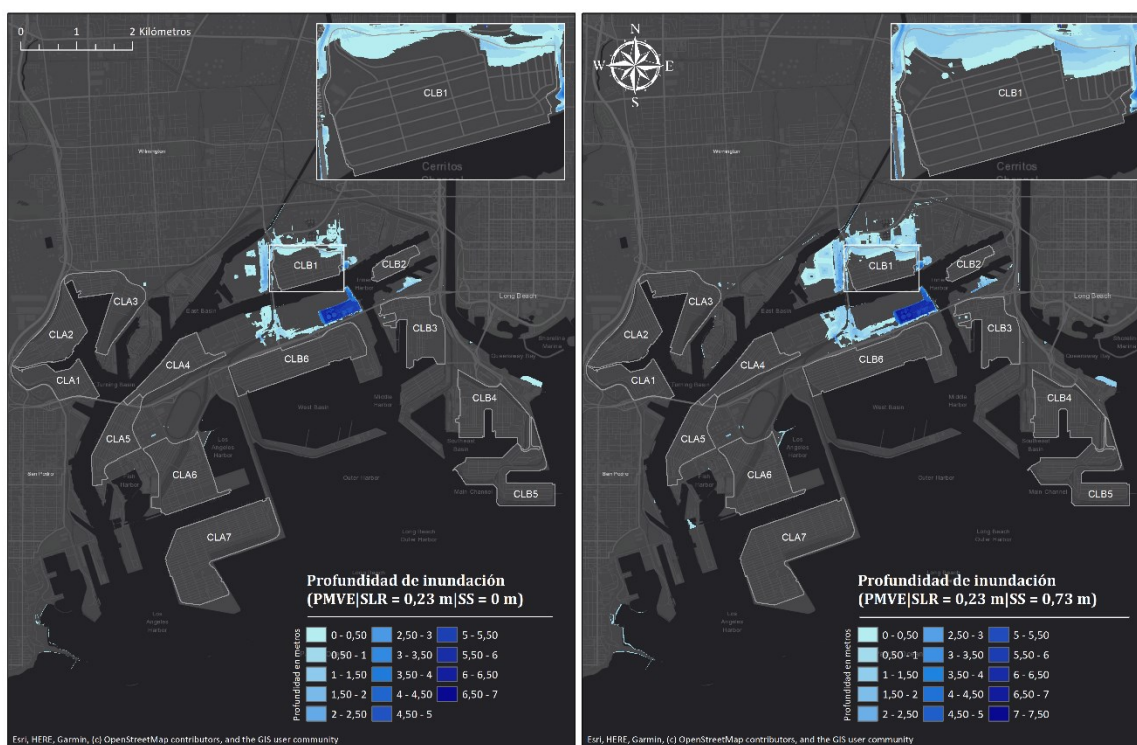


Figura 79 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 1 (Plano IV.2 en la sección de Anejos)

En lo que respecta a la superficie en riesgo de inundación, dígame, la superficie que se encuentra por debajo de los niveles modelados de PMVE en adición al incremento del nivel del mar correspondiente al escenario 1 (de forma permanente) y de la marea meteorológica proyectada (de forma temporal), esta será:

SUPERFICIE EN RIESGO DE INUNDACIÓN					
ESCENARIO	SLR _p (m)	Permanente (m ²)	SLR _t (m)	Temporal (m ²)	Media (m ²)
1	0,23	1.119.123,23	0,96	1.848.255,84	1.483.689,53

Tabla 16 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 1

IV.2.2 Variación del francobordo de seguridad

A continuación, se presentan los valores máximos, medios y mínimos del francobordo de seguridad permanente y temporal de las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos correspondientes al escenario 1:

FRANCOBORDO DE SEGURIDAD - ESCENARIO 1							
Permanente - PMVE SLR = 0,23 m SS = 0 m				Temporal - PMVE SLR = 0,23 m SS = 0,73 m			
COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES				COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLA1	2,55	3,46	4,73	CLA1	1,82	2,73	4,00
CLA2	2,26	4,32	6,46	CLA2	1,53	3,59	5,73
CLA3	2,03	3,19	10,60	CLA3	1,30	2,46	9,87
CLA4	1,91	2,77	3,75	CLA4	1,18	2,04	3,02
CLA5	2,04	3,03	4,04	CLA5	1,31	2,30	3,31
CLA6	1,95	4,21	14,60	CLA6	1,22	3,48	13,87
CLA7	2,49	3,84	10,53	CLA7	1,76	3,11	9,80
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLA1	3,00	3,19	3,56	MCLA1	2,27	2,46	2,83
MCLA2	2,98	3,31	3,63	MCLA2	2,25	2,58	2,90
MCLA3	3,20	3,37	3,74	MCLA3	2,47	2,64	3,01
MCLA4	3,26	3,38	3,69	MCLA4	2,53	2,65	2,96
MCLA5	2,80	3,20	4,01	MCLA5	2,07	2,47	3,28
MCLA6	3,25	3,31	3,50	MCLA6	2,52	2,58	2,77
MCLA7	3,03	3,26	3,58	MCLA7	2,30	2,53	2,85
COTAS PUERTO DE LONG BEACH				COTAS PUERTO DE LONG BEACH			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLB1	-1,39	1,77	3,77	CLB1	-2,12	1,04	3,04
CLB2	2,18	2,98	4,76	CLB2	1,45	2,25	4,03
CLB3	1,85	4,28	13,63	CLB3	1,12	3,55	12,90
CLB4	2,94	3,55	10,22	CLB4	2,21	2,82	9,49
CLB5	2,62	3,76	5,36	CLB5	1,89	3,03	4,63
CLB6	2,51	3,03	9,57	CLB6	1,78	2,30	8,84
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLB1	2,45	2,76	3,28	MCLB1	1,72	2,03	2,55
MCLB2	3,07	3,22	4,07	MCLB2	2,34	2,49	3,34
MCLB3	3,59	3,78	4,10	MCLB3	2,86	3,05	3,37
MCLB4	2,89	3,29	3,96	MCLB4	2,16	2,56	3,23

IV. Resultados

MCLB5	3,26	3,46	3,94	MCLB5	2,53	2,73	3,21
MCLB6	3,02	3,16	3,50	MCLB6	2,29	2,43	2,77

Tabla 17 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 1

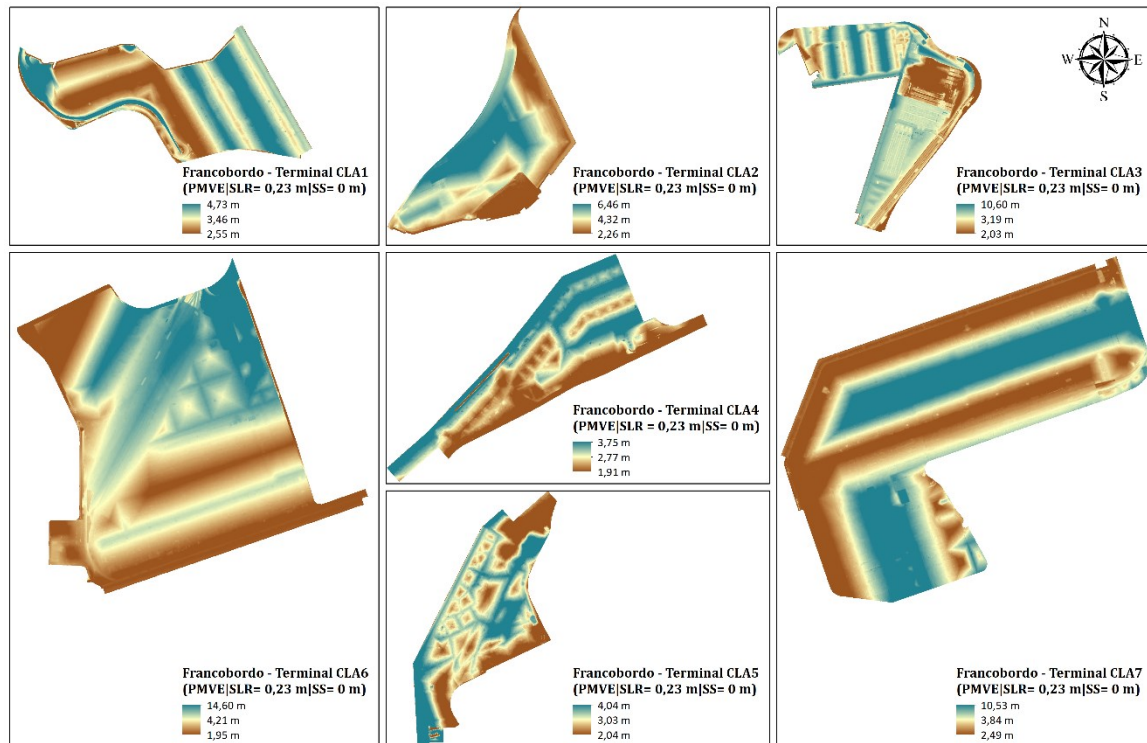


Figura 80 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.1 en la sección de Anejos)



Figura 81 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.1.1 en la sección de Anejos)

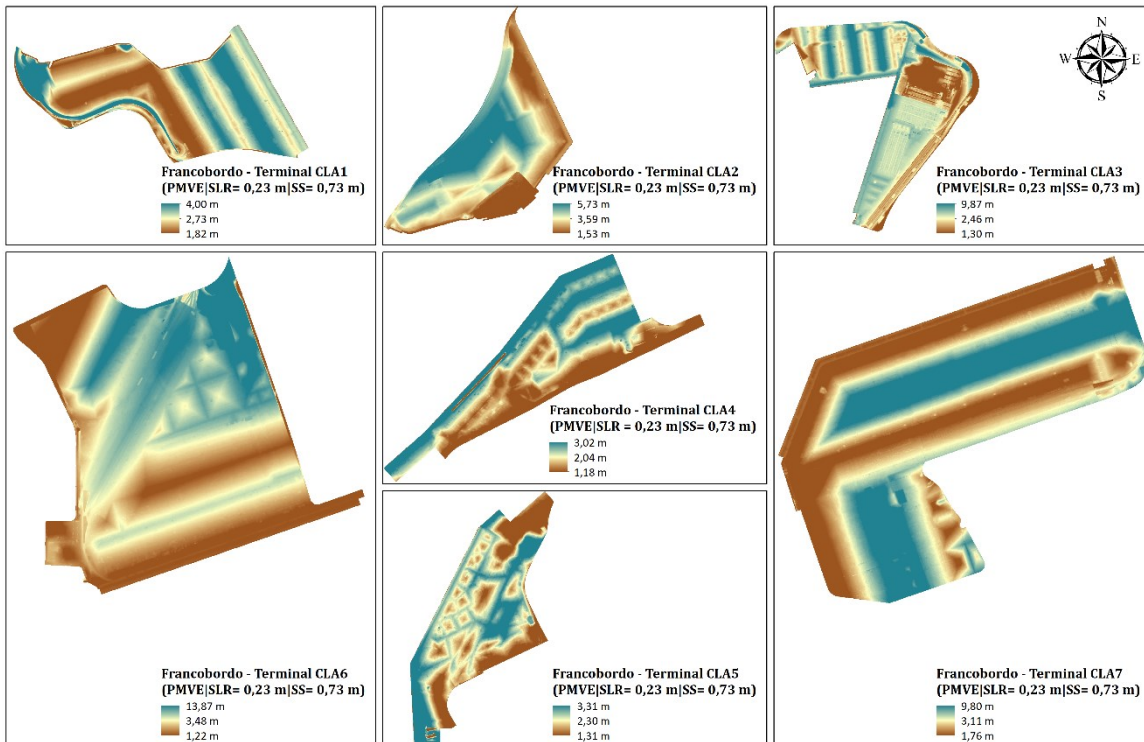


Figura 82 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.2.2 en la sección de Anejos)

IV. Resultados

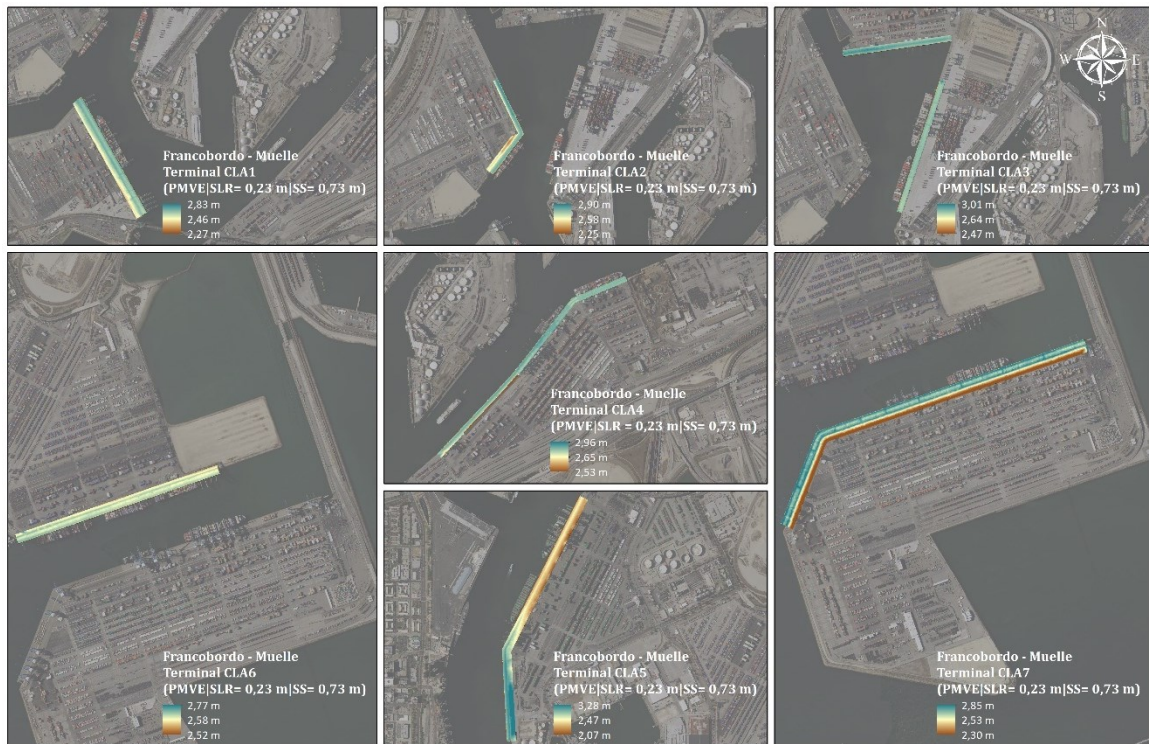


Figura 83 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Angeles (Plano IV.2.2.1 en la sección de Anejos)

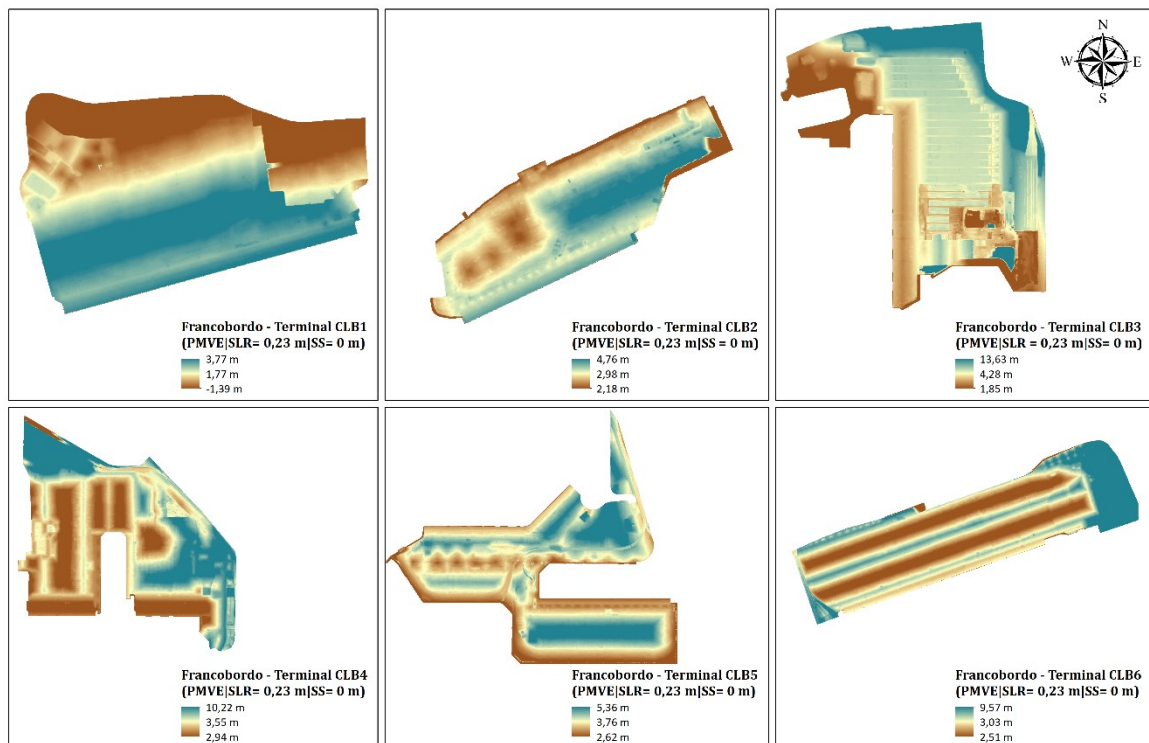


Figura 84 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.3 en la sección de Anejos)



Figura 85 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.3.1 en la sección de Anejos)

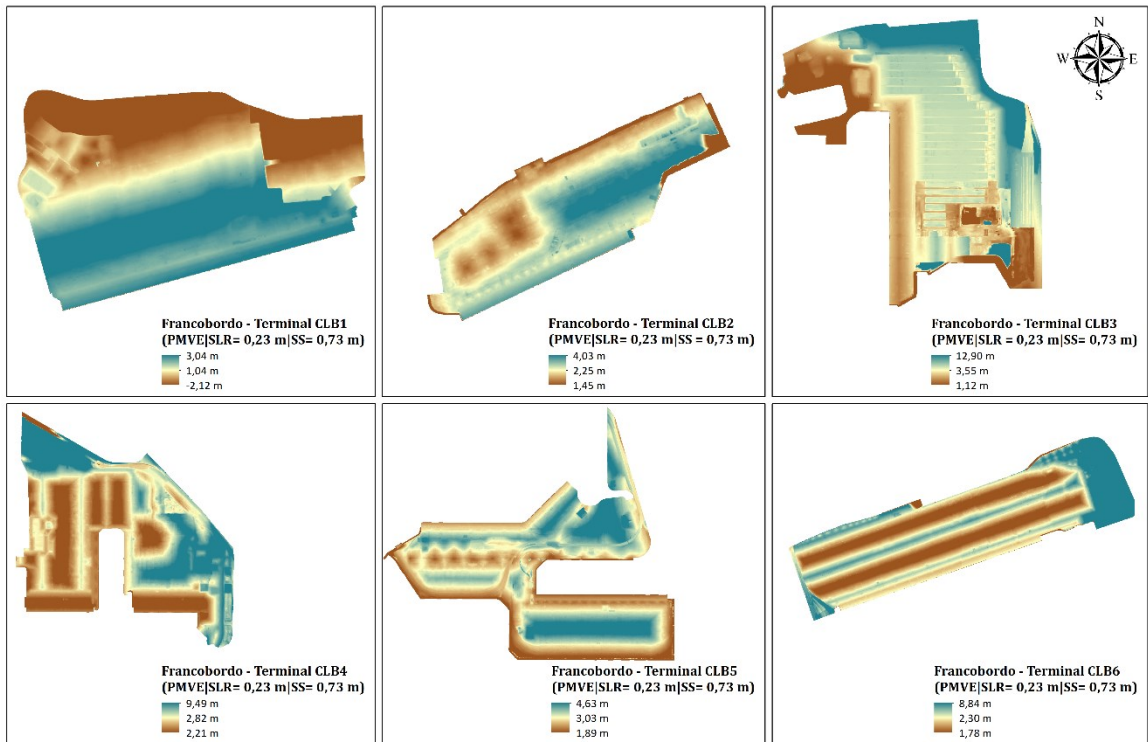


Figura 86 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.4 en la sección de Anejos)

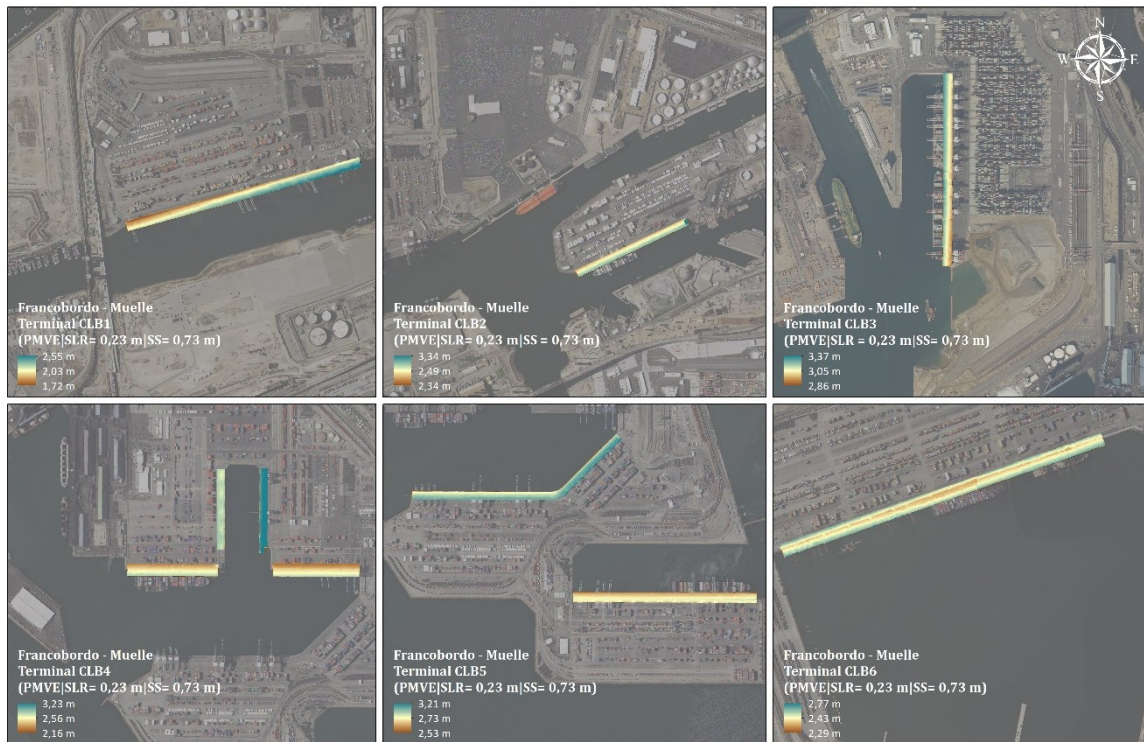


Figura 87 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 1 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.2.4.1 en la sección de Anejos)

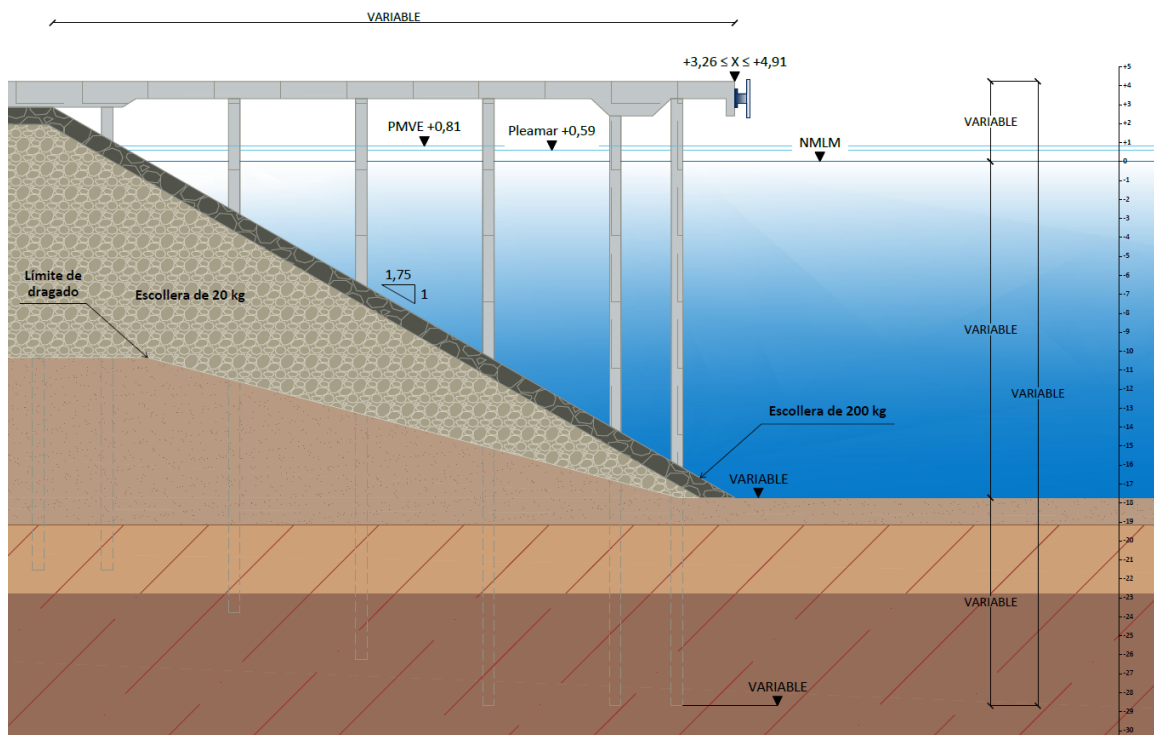


Figura 88 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 1 (Plano IV.2.5 en la sección de Anejos)

IV.2.3 Estimación de rebases en diques

Los rebases en los diques, estimados mediante la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el presente escenario en función de la altura de ola significativa a pie de dique con un período de retorno de 1, 50, 100 y 225 años son:

ESTIMACIÓN DE REBASES - ESCENARIO 1				
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 1 año		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	2,55	16,23	2,37	15,88
B	2,31	16,23	2,37	7,47
C	2,31	17,14	2,37	41,05
D	2,27	17,14	2,37	37,05
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 50 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	3,86	16,23	2,37	186,57
B	3,52	16,23	2,37	116,99
C	3,52	17,14	2,37	313,41
D	3,21	17,14	2,37	213,70
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 100 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,11	16,23	2,37	250,87
B	3,78	16,23	2,37	168,38
C	3,78	17,14	2,37	413,40
D	3,39	17,14	2,37	269,00
PERÍODO DE RETORNO		T _r = 225 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,40	16,23	2,37	339,94
B	4,10	16,23	2,37	248,08
C	4,10	17,14	2,37	556,63
D	3,60	17,14	2,37	342,59

Tabla 18 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 1

IV. Resultados

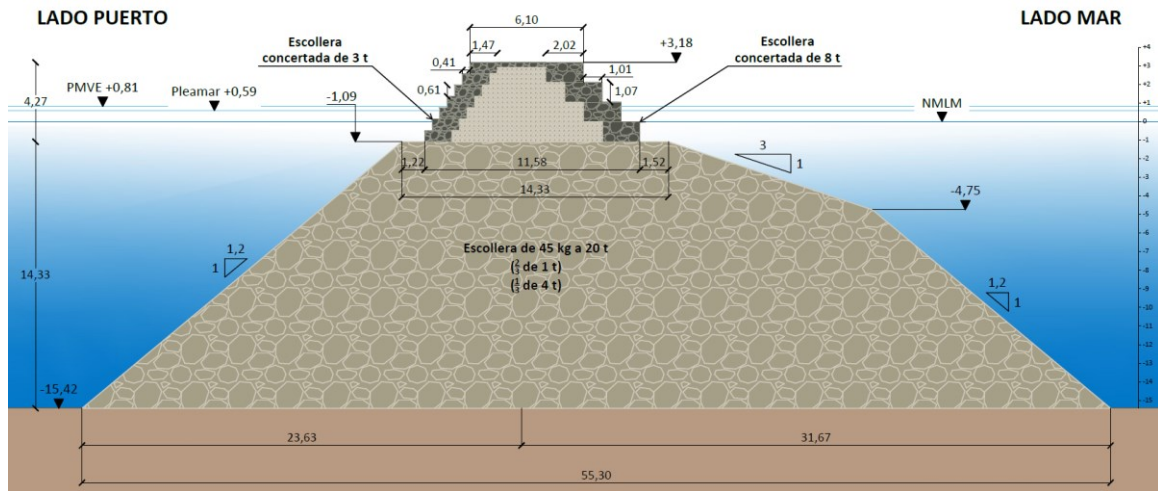


Figura 89 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 1 (Plano IV.2.6 en la sección de Anejos)

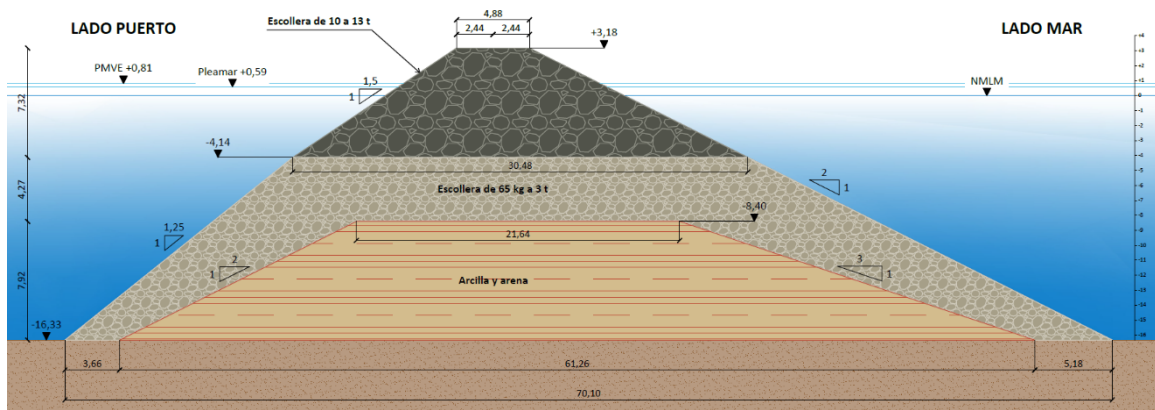


Figura 90 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 1 (Plano IV.2.7 en la sección de Anejos)

IV.3 Escenario 2 (PMVE|SLR = 0,49 m|SS = 0 – 0,73 m)

IV.3.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

Para el escenario 2, se procede con un modelado de un incremento del nivel del mar permanente (SLR_p (m)) de 0,49 metros sobre la PMVE. Posteriormente se modela un incremento del nivel del mar temporal (SLR_t (m)) de 0,73 metros sobre el incremento modelado anteriormente (correspondiente a la marea meteorológica asociada a un período de retorno de 225 años).

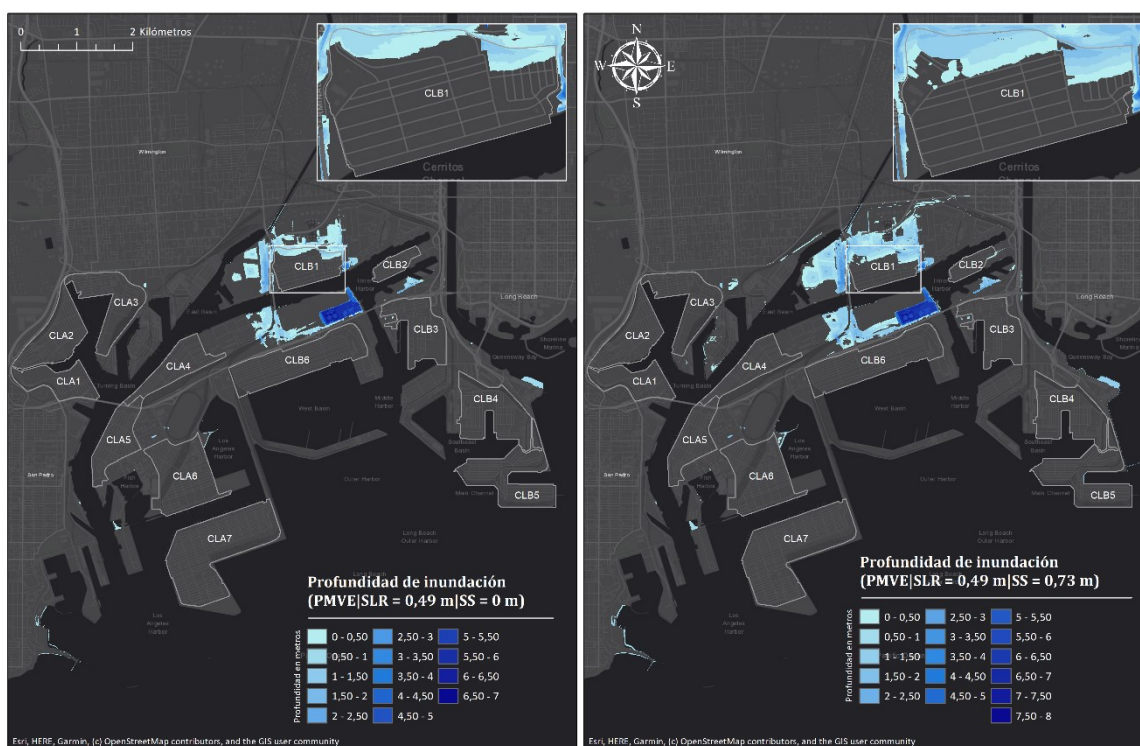


Figura 91 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 2 (Plano IV.3 en la sección de Anejos)

En lo que respecta a la superficie en riesgo de inundación, dígame, la superficie que se encuentra por debajo de los niveles modelados de PMVE en adición al incremento del nivel del mar correspondiente al escenario 2 (de forma permanente) y de la marea meteorológica proyectada (de forma temporal), esta será:

SUPERFICIE EN RIESGO DE INUNDACIÓN					
ESCENARIO	SLR _p (m)	Permanente (m ²)	SLR _t (m)	Temporal (m ²)	Media (m ²)
2	0,49	1.387.775,22	1,22	2.151.367,29	1.769.571,26

Tabla 19 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 2

IV.3.2 Variación del francobordo de seguridad

A continuación, se presentan los valores máximos, medios y mínimos del francobordo de seguridad permanente y temporal de las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos correspondientes al escenario 2:

FRANCOBORDO DE SEGURIDAD - ESCENARIO 2							
Permanente - PMVE SLR = 0,49 m SS = 0 m				Temporal - PMVE SLR = 0,49 m SS = 0,73 m			
COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES				COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLA1	2,29	3,20	4,47	CLA1	1,56	2,47	3,74
CLA2	2,00	4,06	6,20	CLA2	1,27	3,33	5,47
CLA3	1,77	2,93	10,34	CLA3	1,04	2,20	9,61
CLA4	1,65	2,51	3,49	CLA4	0,92	1,78	2,76
CLA5	1,78	2,77	3,78	CLA5	1,05	2,04	3,05
CLA6	1,69	3,95	14,34	CLA6	0,96	3,22	13,61
CLA7	2,23	3,58	10,27	CLA7	1,50	2,85	9,54
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLA1	2,74	2,93	3,30	MCLA1	2,01	2,20	2,57
MCLA2	2,72	3,05	3,37	MCLA2	1,99	2,32	2,64
MCLA3	2,94	3,11	3,48	MCLA3	2,21	2,38	2,75
MCLA4	3,00	3,12	3,43	MCLA4	2,27	2,39	2,70
MCLA5	2,54	2,94	3,75	MCLA5	1,81	2,21	3,02
MCLA6	2,99	3,05	3,24	MCLA6	2,26	2,32	2,51
MCLA7	2,77	3,00	3,32	MCLA7	2,04	2,27	2,59
COTAS PUERTO DE LONG BEACH				COTAS PUERTO DE LONG BEACH			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLB1	-1,65	1,51	3,51	CLB1	-2,38	0,78	2,78
CLB2	1,92	2,72	4,50	CLB2	1,19	1,99	3,77
CLB3	1,59	4,02	13,37	CLB3	0,86	3,29	12,64
CLB4	2,68	3,29	9,96	CLB4	1,95	2,56	9,23
CLB5	2,36	3,50	5,10	CLB5	1,63	2,77	4,37
CLB6	2,25	2,77	9,31	CLB6	1,52	2,04	8,58
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLB1	2,19	2,50	3,02	MCLB1	1,46	1,77	2,29
MCLB2	2,81	2,96	3,81	MCLB2	2,08	2,23	3,08
MCLB3	3,33	3,52	3,84	MCLB3	2,60	2,79	3,11
MCLB4	2,63	3,03	3,70	MCLB4	1,90	2,30	2,97

MCLB5	3,00	3,20	3,68	MCLB5	2,27	2,47	2,95
MCLB6	2,76	2,90	3,24	MCLB6	2,03	2,17	2,51

Tabla 20 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 2

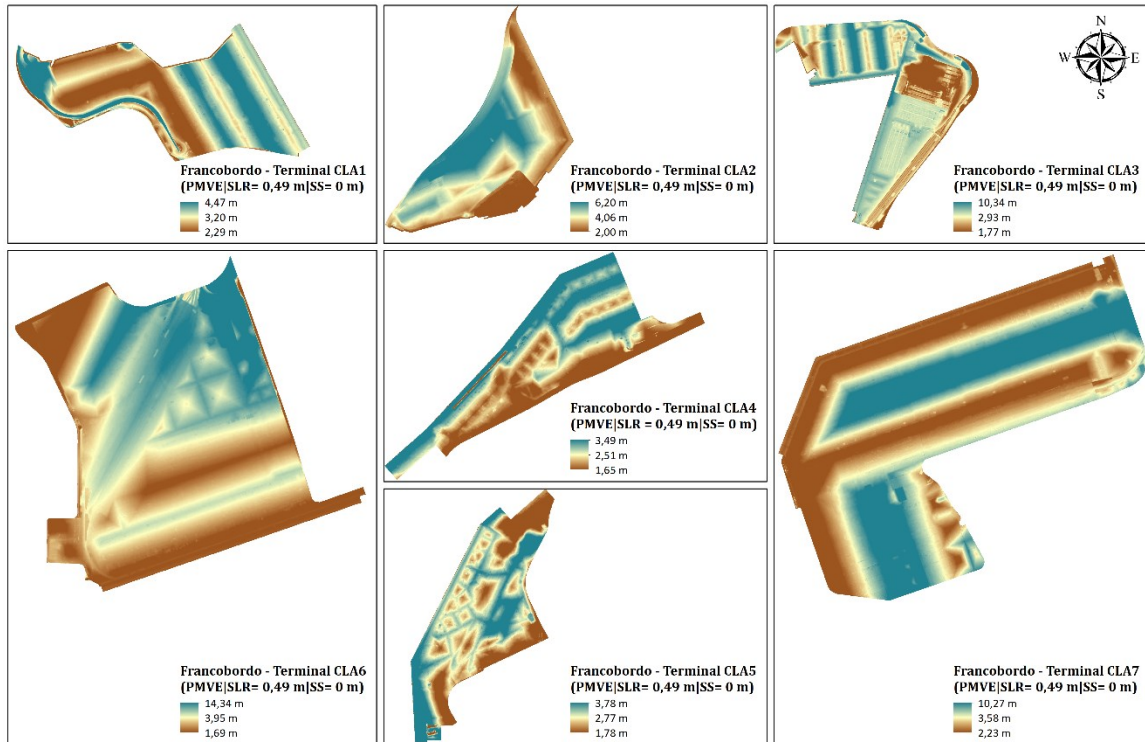


Figura 92 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.1 en la sección de Anejos)

IV. Resultados

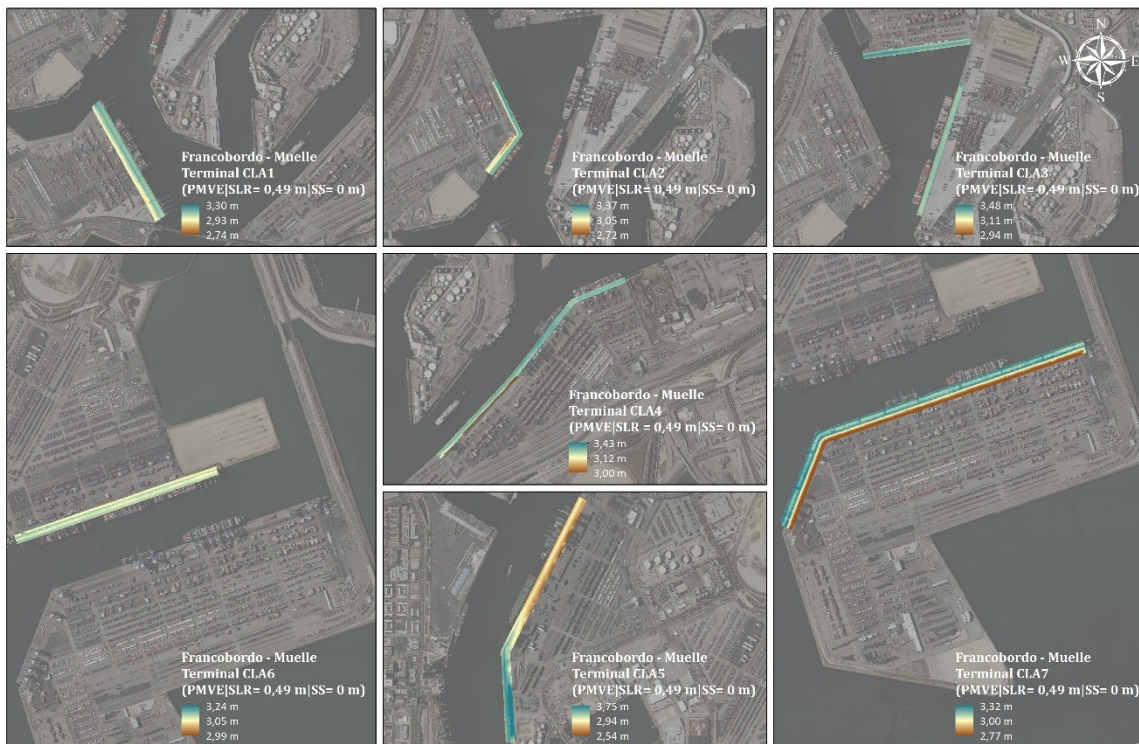


Figura 93 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.1.1 en la sección de Anejos)

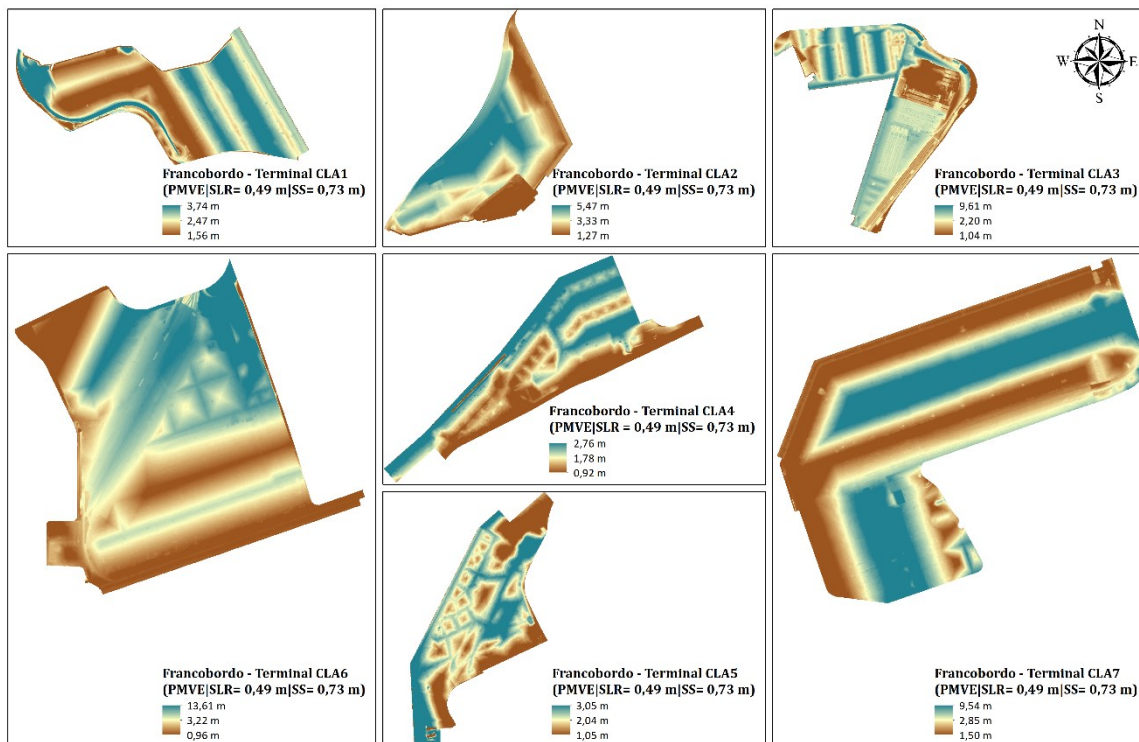


Figura 94 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.2 en la sección de Anejos)

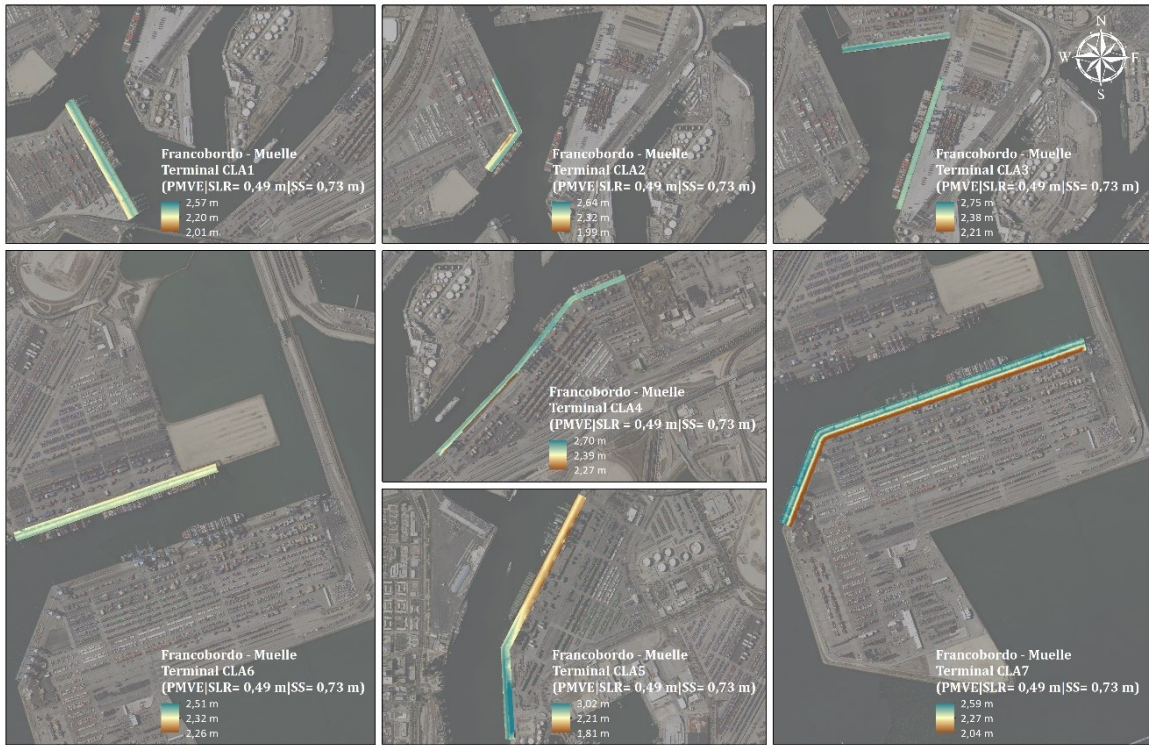


Figura 95 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.3.2.1 en la sección de Anejos)

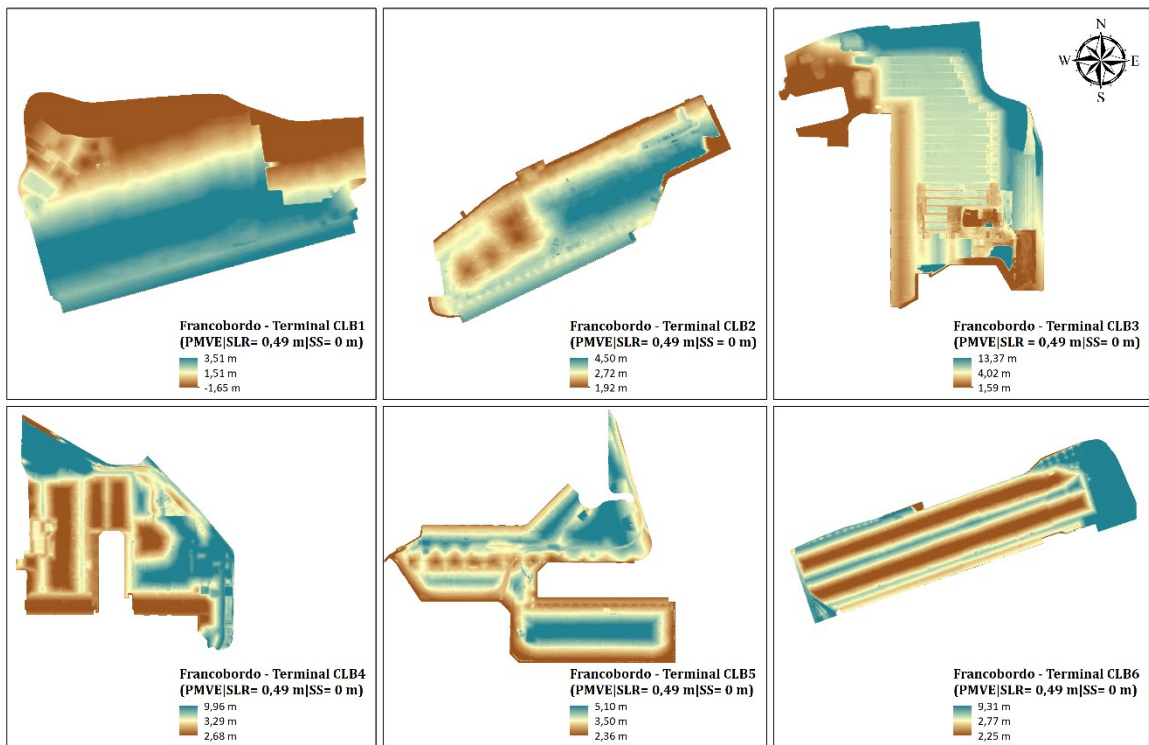


Figura 96 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.3 en la sección de Anejos)

IV. Resultados

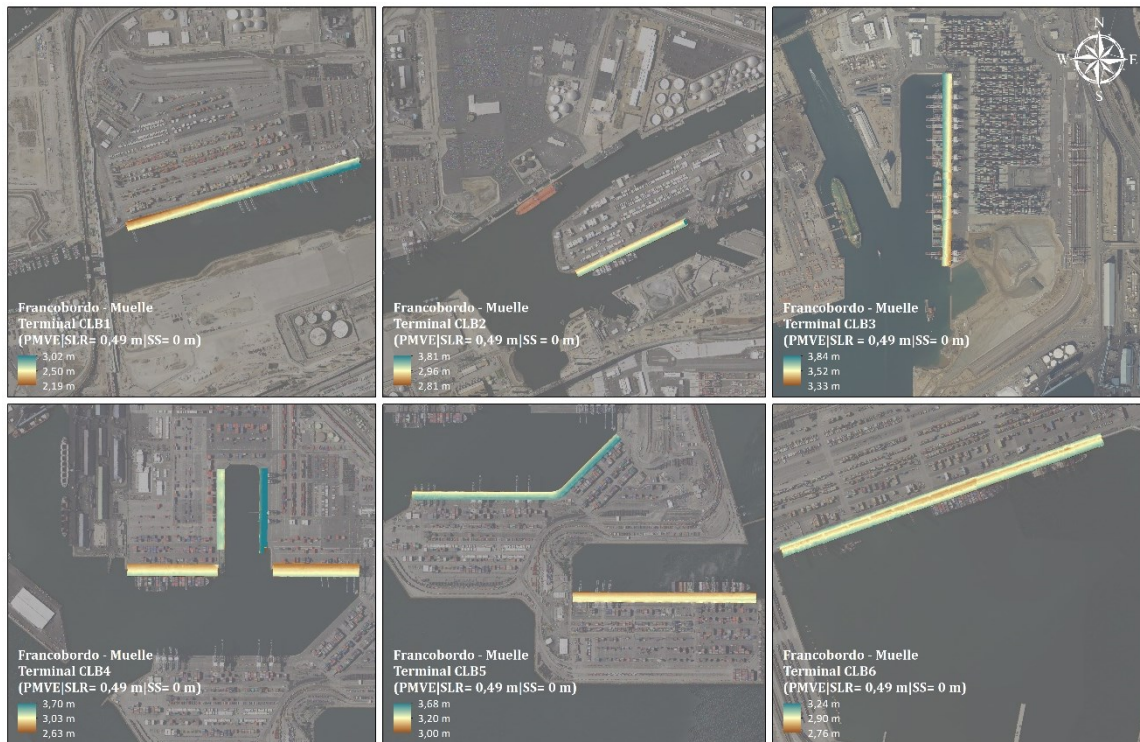


Figura 97 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.3.1 en la sección de Anejos)

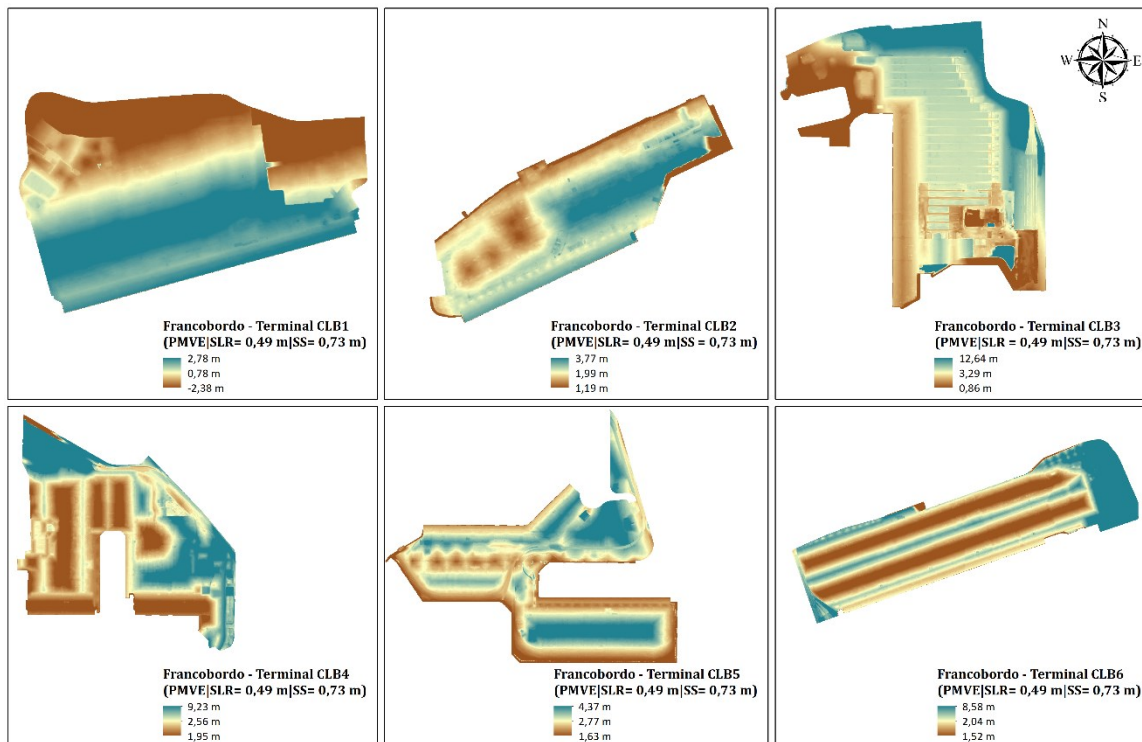


Figura 98 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.4 en la sección de Anejos)

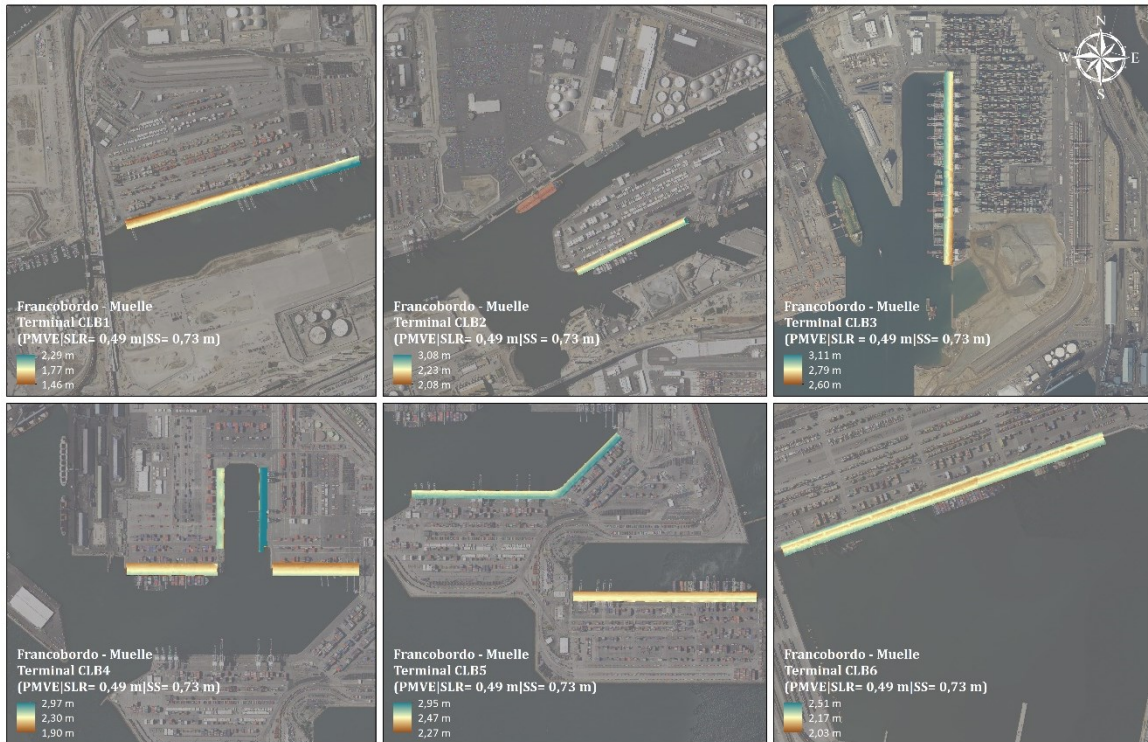


Figura 99 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 2 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.3.4.1 en la sección de Anejos)

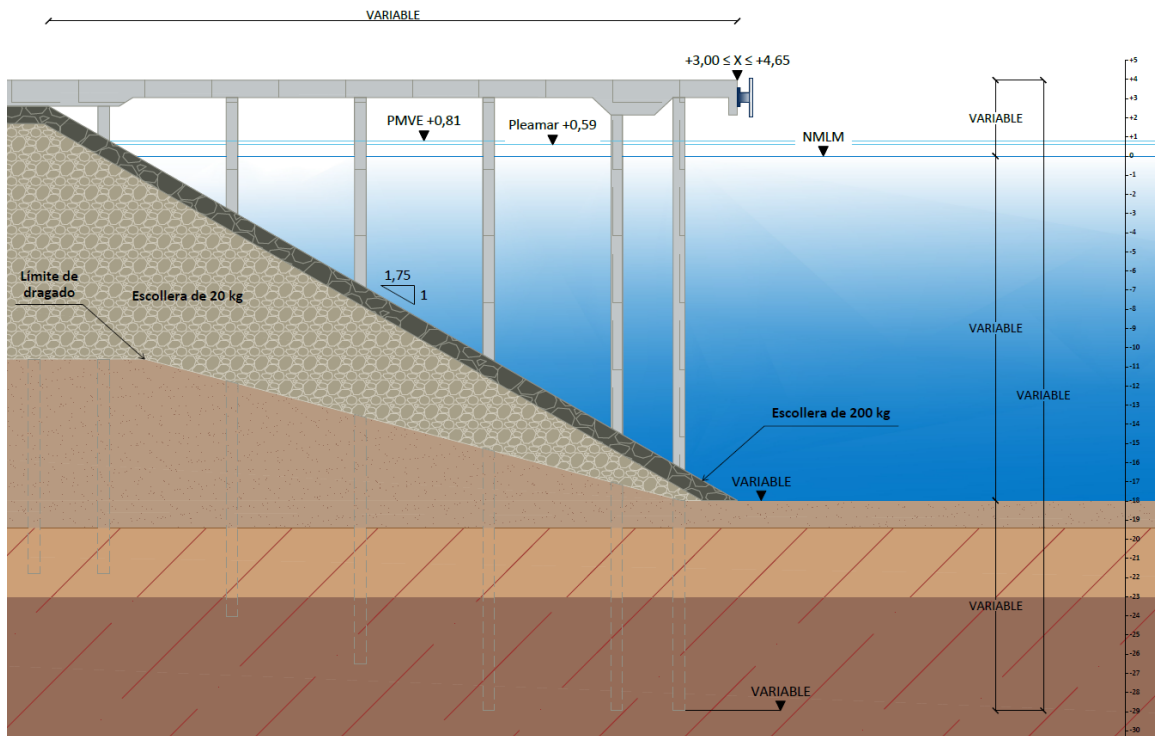


Figura 100 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 2 (Plano IV.3.5 en la sección de Anejos)

IV.3.3 Estimación de rebases en diques

Los rebases en los diques, estimados mediante la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el presente escenario en función de la altura de ola significativa a pie de dique con un período de retorno de 1, 50, 100 y 225 años son:

ESTIMACIÓN DE REBASES - ESCENARIO 2				
PERIODO DE RETORNO		T _r = 1 año		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	2,55	16,49	2,11	29,52
B	2,31	16,49	2,11	15,12
C	2,31	17,40	2,11	65,41
D	2,27	17,40	2,11	59,67
PERIODO DE RETORNO		T _r = 50 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	3,86	16,49	2,11	267,82
B	3,52	16,49	2,11	175,86
C	3,52	17,40	2,11	410,31
D	3,21	17,40	2,11	289,54
PERIODO DE RETORNO		T _r = 100 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,11	16,49	2,11	350,07
B	3,78	16,49	2,11	244,13
C	3,78	17,40	2,11	528,47
D	3,39	17,40	2,11	356,96
PERIODO DE RETORNO		T _r = 225 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,40	16,49	2,11	461,14
B	4,10	16,49	2,11	346,54
C	4,10	17,40	2,11	694,26
D	3,60	17,40	2,11	445,05

Tabla 21 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 2

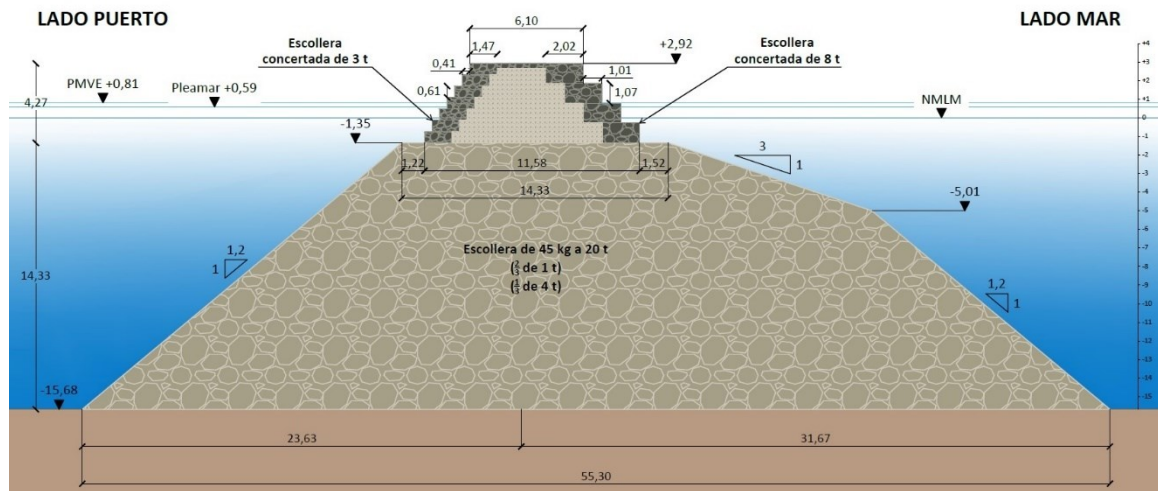


Figura 101 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 2 (Plano IV.3.6 en la sección de Anejos)

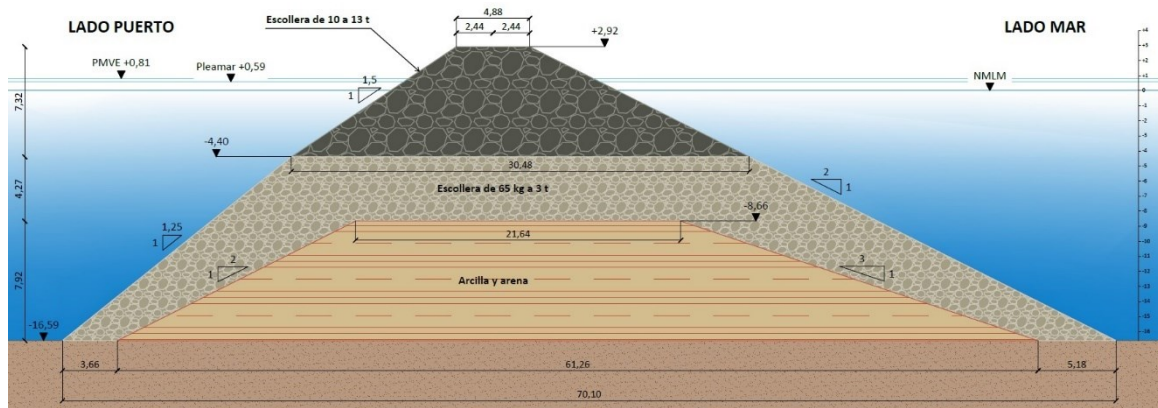


Figura 102 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 2 (Plano IV.3.7 en la sección de Anejos)

IV.4 Escenario 3 (PMVE|SLR = 0,36 m|SS = 0 – 0,73 m)

IV.4.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

Para el escenario 3, se procede con un modelado de un incremento del nivel del mar permanente (SLR_p (m)) de 0,36 metros sobre la PMVE. Posteriormente se modela un incremento del nivel del mar temporal (SLR_t (m)) de 0,73 metros sobre el incremento modelado anteriormente (correspondiente a la marea meteorológica asociada a un período de retorno de 225 años).

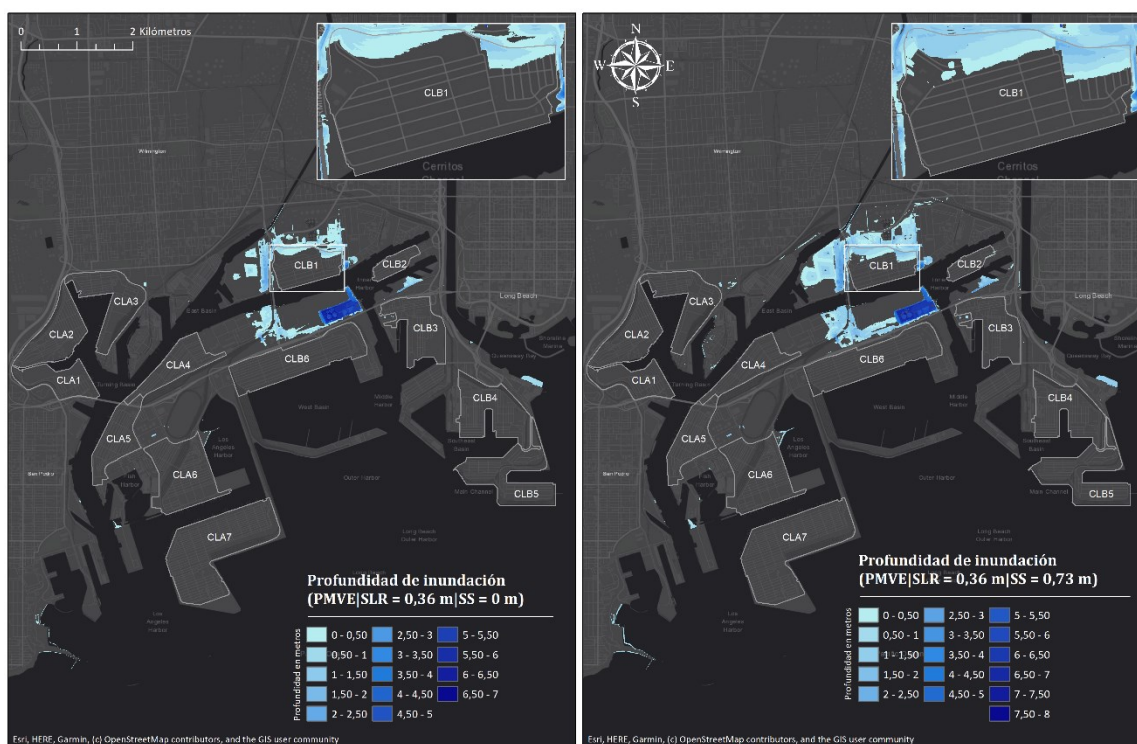


Figura 103 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 3 (Plano IV.4 en la sección de Anejos)

En lo que respecta a la superficie en riesgo de inundación, dígame, la superficie que se encuentra por debajo de los niveles modelados de PMVE en adición al incremento del nivel del mar correspondiente al escenario 3 (de forma permanente) y de la marea meteorológica proyectada (de forma temporal), esta será:

SUPERFICIE EN RIESGO DE INUNDACIÓN					
ESCENARIO	SLR _p (m)	Permanente (m ²)	SLR _t (m)	Temporal (m ²)	Media (m ²)
3	0,36	1.257.476,11	1,09	1.977.102,15	1.617.289,13

Tabla 22 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 3

IV.4.2 Variación del francobordo de seguridad

A continuación, se presentan los valores máximos, medios y mínimos del francobordo de seguridad permanente y temporal de las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos correspondientes al escenario 3:

FRANCOBORDO DE SEGURIDAD - ESCENARIO 3							
Permanente - PMVE SLR = 0,36 m SS = 0 m				Temporal - PMVE SLR = 0,36 m SS = 0,73 m			
COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES				COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLA1	2,42	3,33	4,60	CLA1	1,69	2,60	3,87
CLA2	2,13	4,19	6,33	CLA2	1,40	3,46	5,60
CLA3	1,90	3,06	10,47	CLA3	1,17	2,33	9,74
CLA4	1,78	2,64	3,62	CLA4	1,05	1,91	2,89
CLA5	1,91	2,90	3,91	CLA5	1,18	2,17	3,18
CLA6	1,82	4,08	14,47	CLA6	1,09	3,35	13,74
CLA7	2,36	3,71	10,40	CLA7	1,63	2,98	9,67
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLA1	2,87	3,06	3,43	MCLA1	2,14	2,33	2,70
MCLA2	2,85	3,18	3,50	MCLA2	2,12	2,45	2,77
MCLA3	3,07	3,24	3,61	MCLA3	2,34	2,51	2,88
MCLA4	3,13	3,25	3,56	MCLA4	2,40	2,52	2,83
MCLA5	2,67	3,07	3,88	MCLA5	1,94	2,34	3,15
MCLA6	3,12	3,18	3,37	MCLA6	2,39	2,45	2,64
MCLA7	2,90	3,13	3,45	MCLA7	2,17	2,40	2,72
COTAS PUERTO DE LONG BEACH				COTAS PUERTO DE LONG BEACH			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLB1	-1,52	1,64	3,64	CLB1	-2,25	0,91	2,91
CLB2	2,05	2,85	4,63	CLB2	1,32	2,12	3,90
CLB3	1,72	4,15	13,50	CLB3	0,99	3,42	12,77
CLB4	2,81	3,42	10,09	CLB4	2,08	2,69	9,36
CLB5	2,49	3,63	5,23	CLB5	1,76	2,90	4,50
CLB6	2,38	2,90	9,44	CLB6	1,65	2,17	8,71
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLB1	2,32	2,63	3,15	MCLB1	1,59	1,90	2,42
MCLB2	2,94	3,09	3,94	MCLB2	2,21	2,36	3,21
MCLB3	3,46	3,65	3,97	MCLB3	2,73	2,92	3,24
MCLB4	2,76	3,16	3,83	MCLB4	2,03	2,43	3,10

IV. Resultados

MCLB5	3,13	3,33	3,81	MCLB5	2,40	2,60	3,08
MCLB6	2,89	3,03	3,37	MCLB6	2,16	2,30	2,64

Tabla 23 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 3

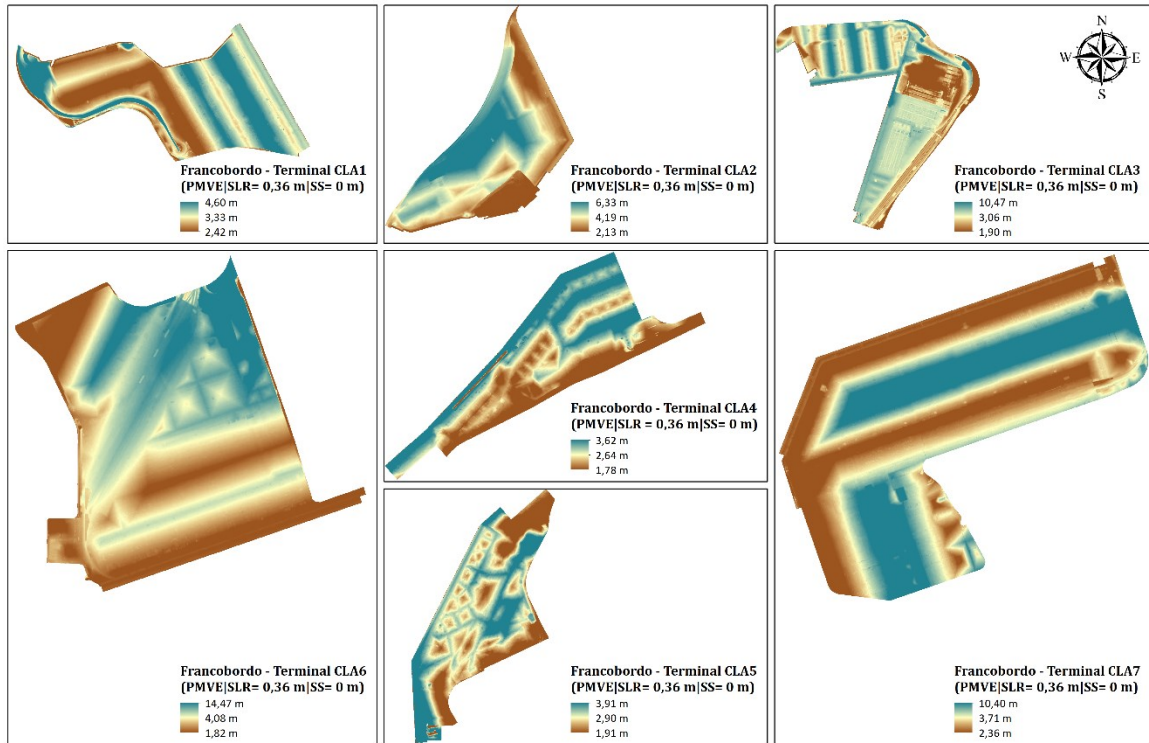


Figura 104 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.4.1 en la sección de Anejos)

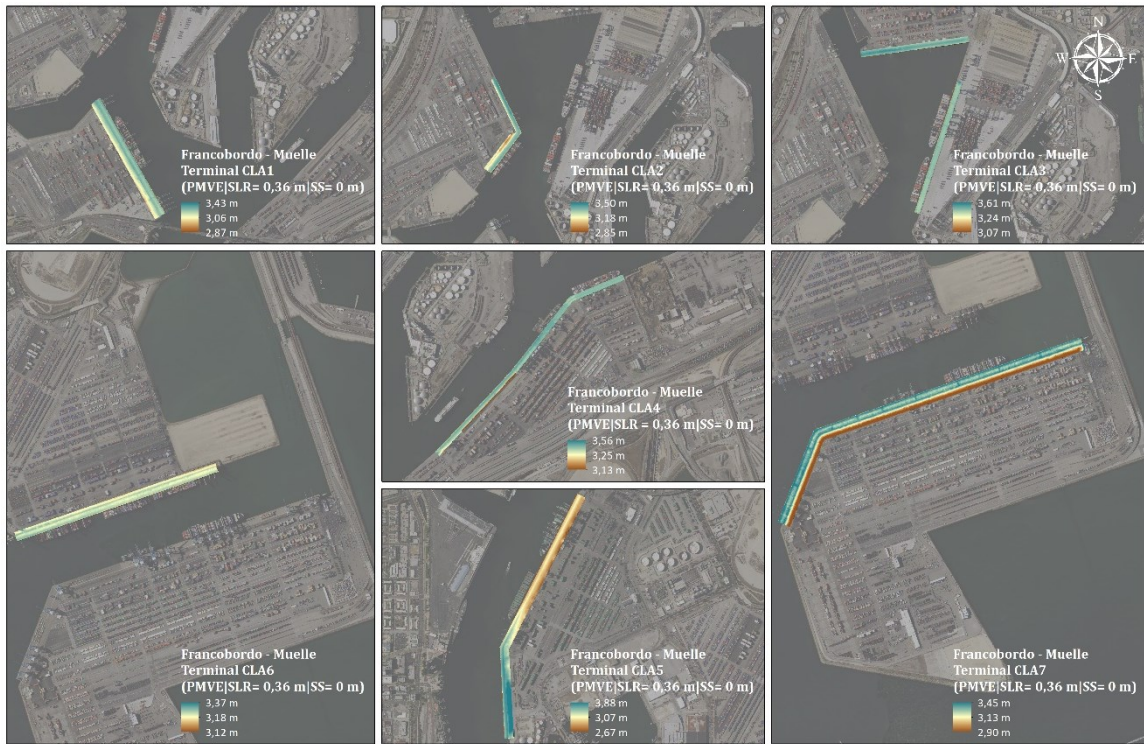


Figura 105 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Angeles (Plano IV.4.1.1 en la sección de Anejos)

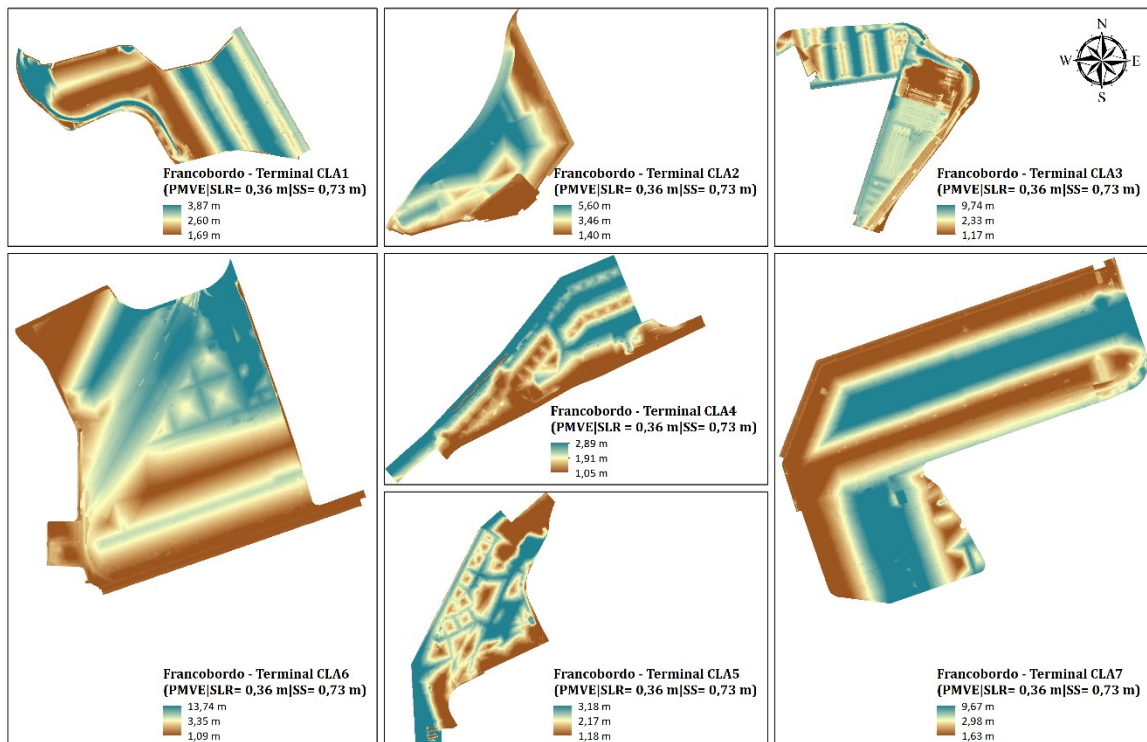


Figura 106 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Angeles (Plano IV.4.2 en la sección de Anejos)

IV. Resultados

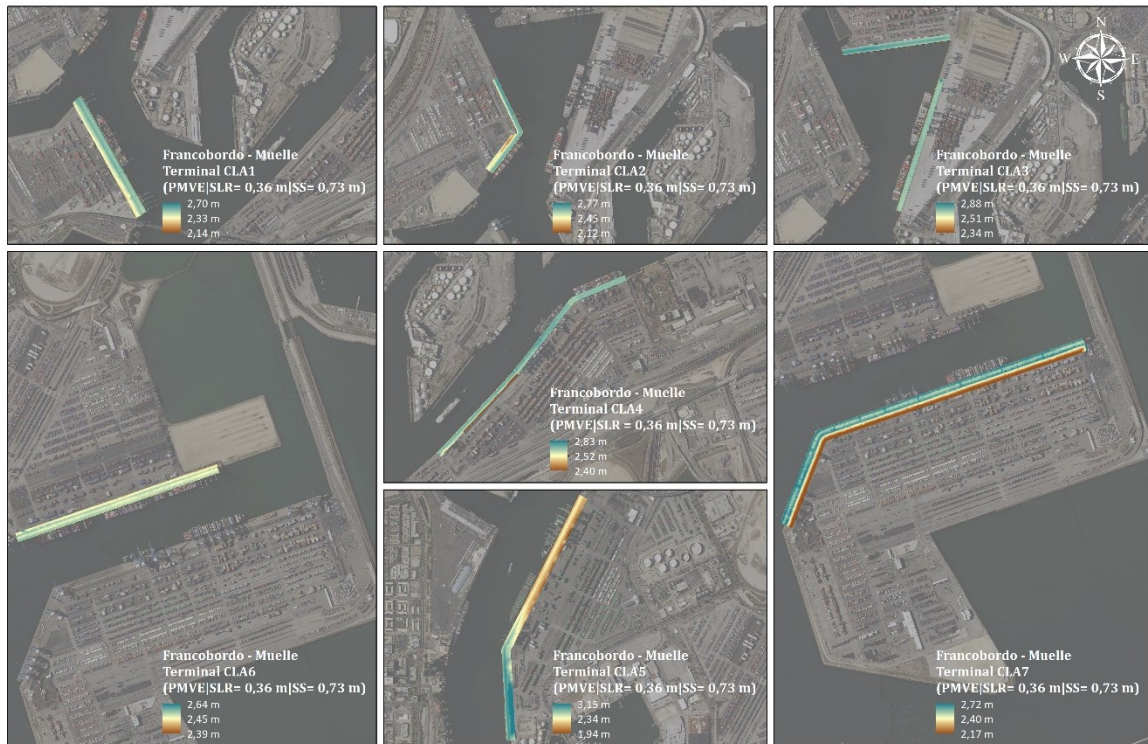


Figura 107 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.4.2.1 en la sección de Anejos)

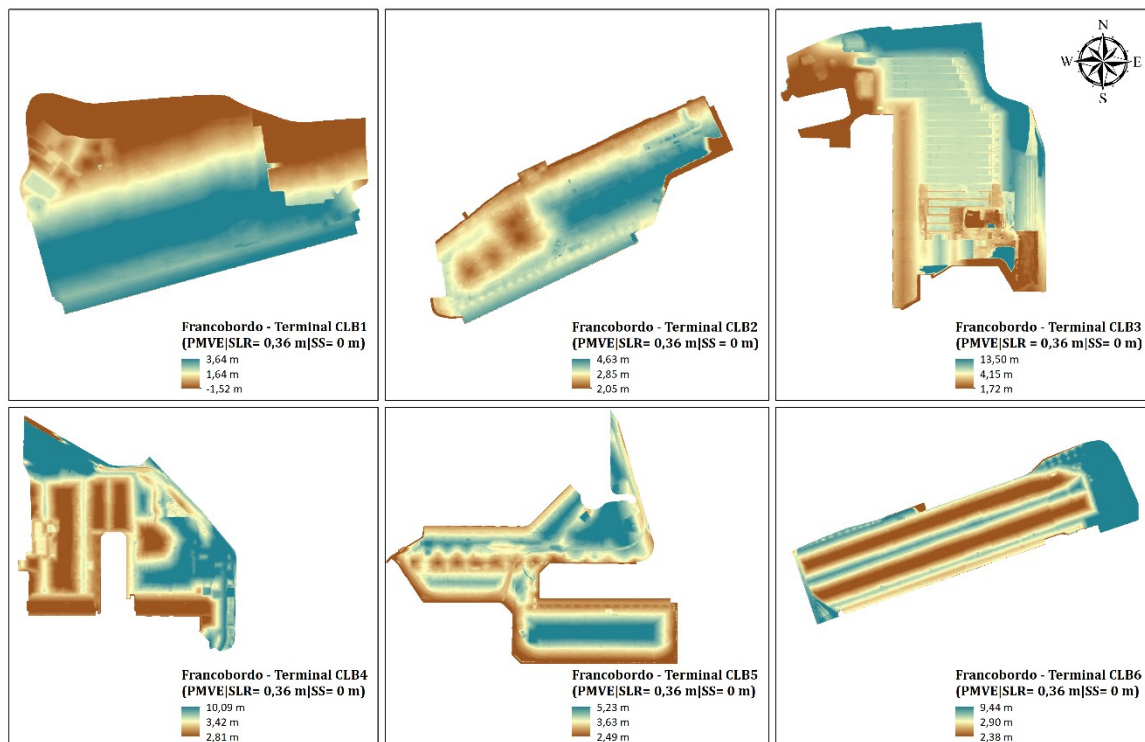


Figura 108 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.3 en la sección de Anejos)

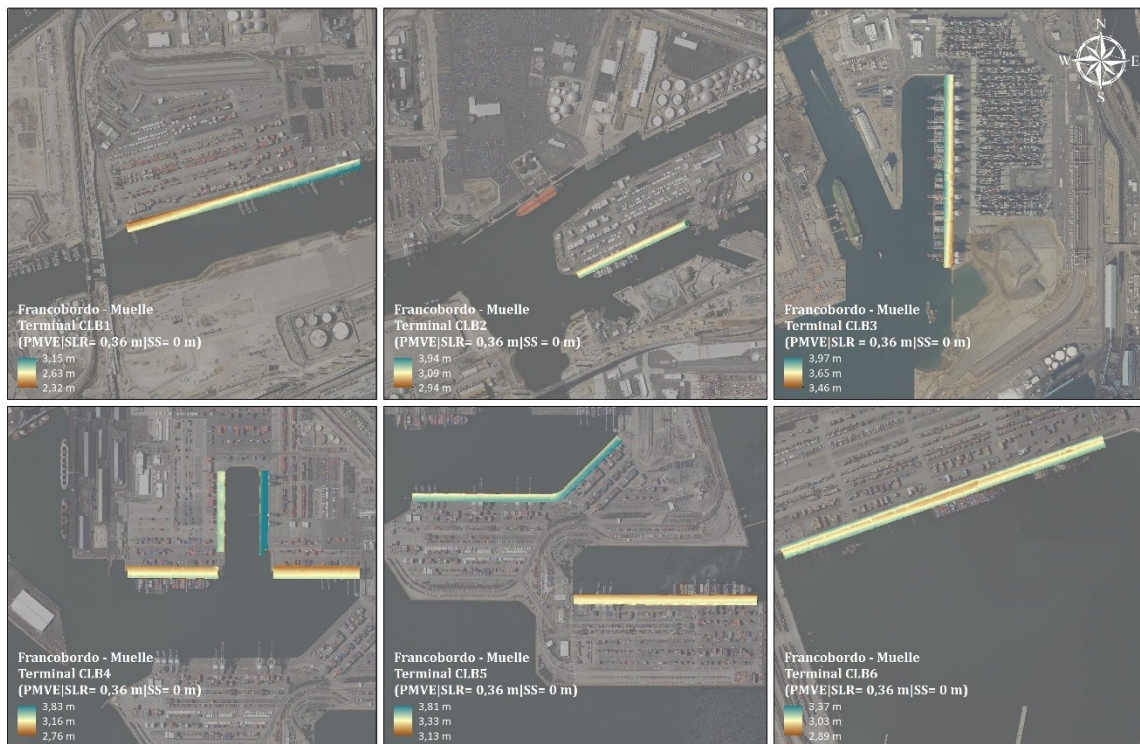


Figura 109 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.3.1 en la sección de Anejos)

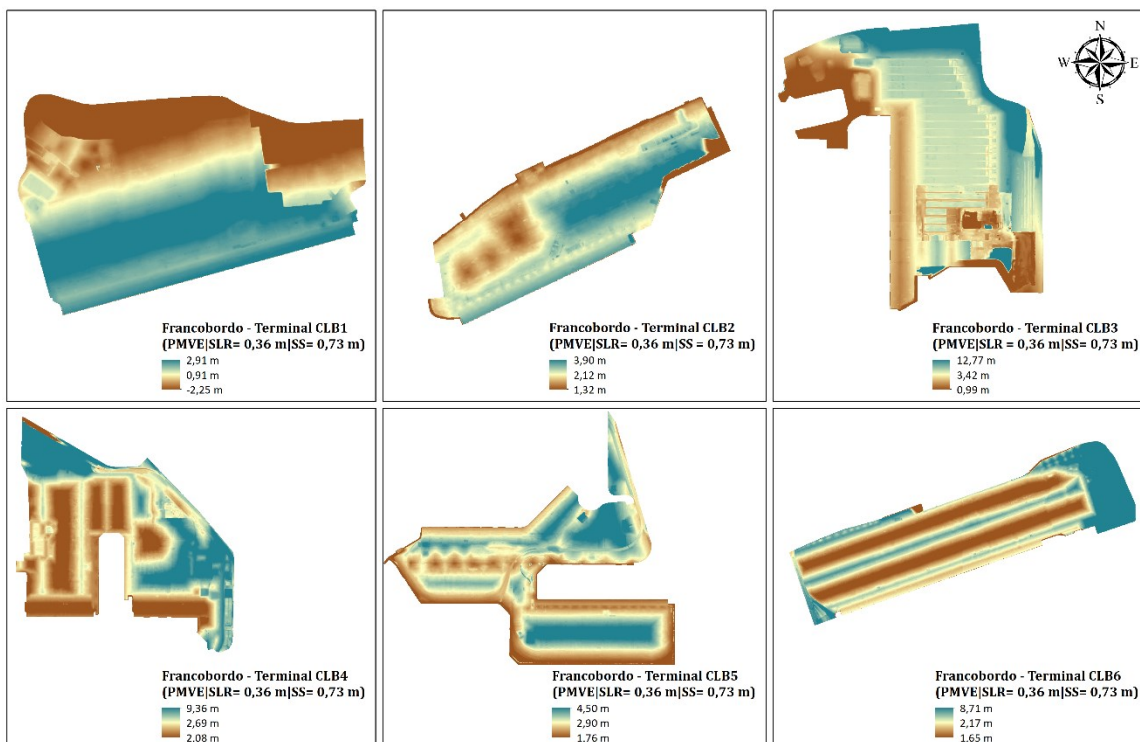


Figura 110 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.4 en la sección de Anejos)

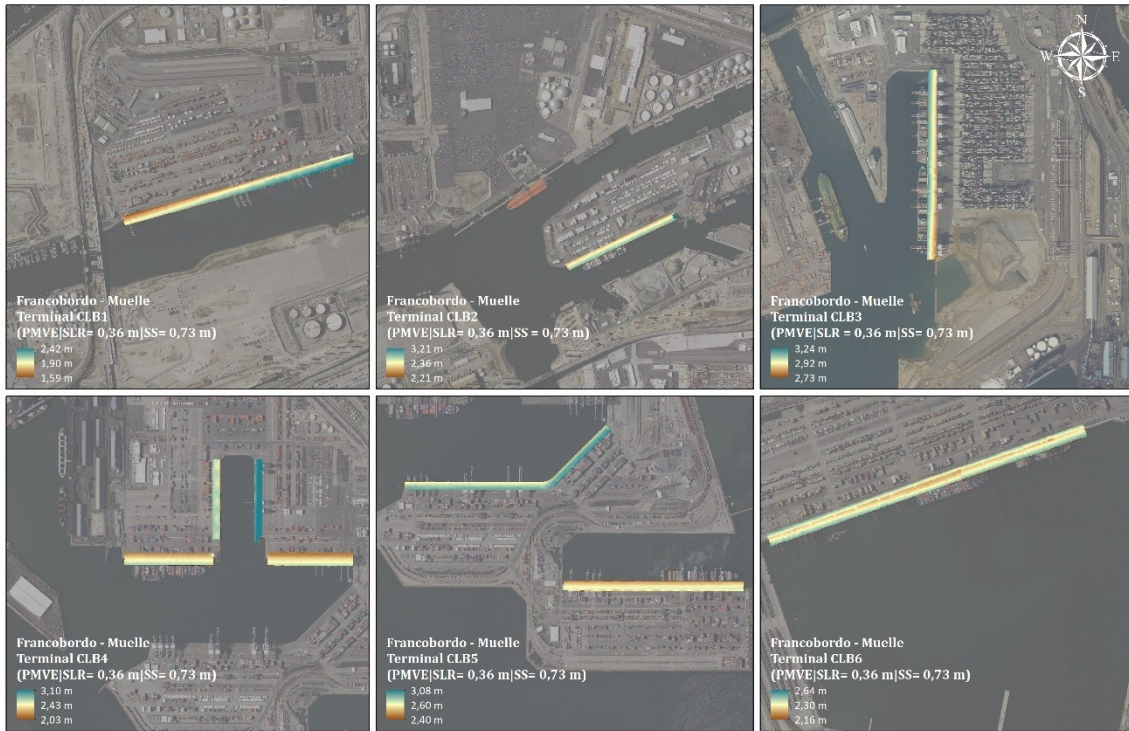


Figura 111 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 3 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.4.4.1 en la sección de Anejos)

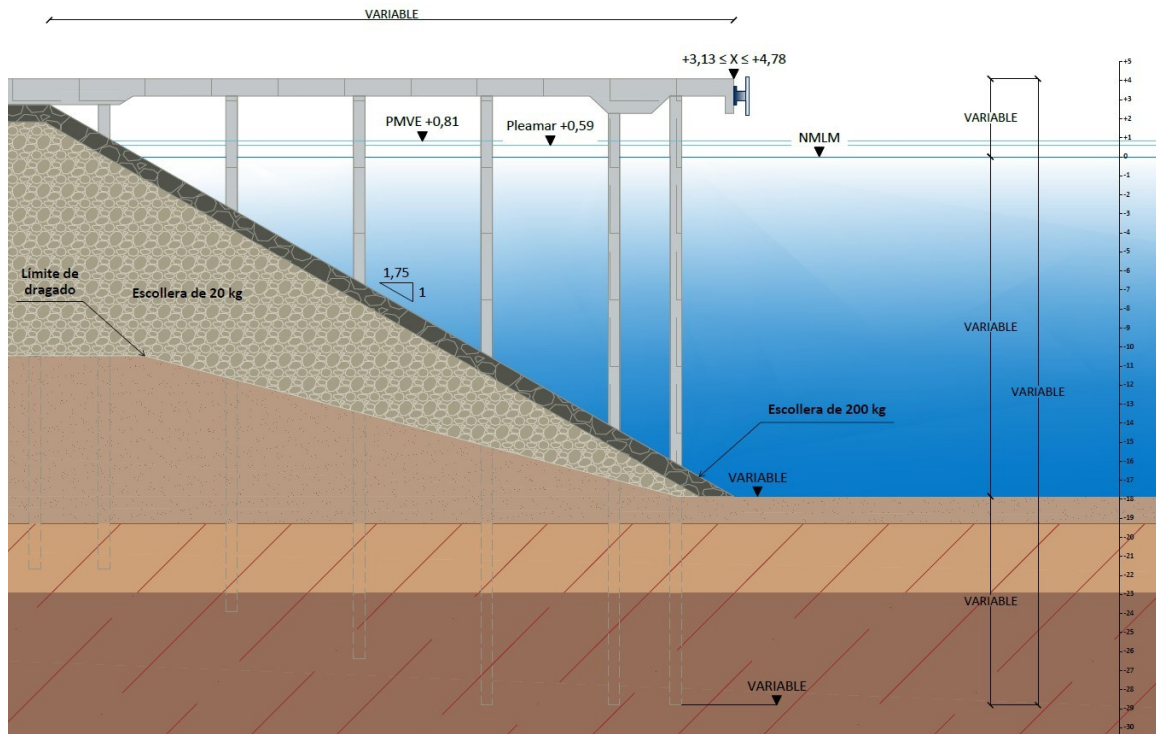


Figura 112 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 3 (Plano IV.4.5 en la sección de Anejos)

IV.4.3 Estimación de rebases en diques

Los rebases en los diques, estimados mediante la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el presente escenario en función de la altura de ola significativa a pie de dique con un período de retorno de 1, 50, 100 y 225 años son:

ESTIMACIÓN DE REBASES - ESCENARIO 3				
PERIODO DE RETORNO		T _r = 1 año		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	2,55	16,36	2,24	21,71
B	2,31	16,36	2,24	10,66
C	2,31	17,27	2,24	51,92
D	2,27	17,27	2,24	47,12
PERIODO DE RETORNO		T _r = 50 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	3,86	16,36	2,24	223,88
B	3,52	16,36	2,24	143,69
C	3,52	17,27	2,24	359,02
D	3,21	17,27	2,24	249,07
PERIODO DE RETORNO		T _r = 100 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,11	16,36	2,24	296,78
B	3,78	16,36	2,24	203,07
C	3,78	17,27	2,24	467,91
D	3,39	17,27	2,24	310,26
PERIODO DE RETORNO		T _r = 225 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,40	16,36	2,24	396,46
B	4,10	16,36	2,24	293,63
C	4,10	17,27	2,24	622,24
D	3,60	17,27	2,24	390,92

Tabla 24 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 3

IV. Resultados

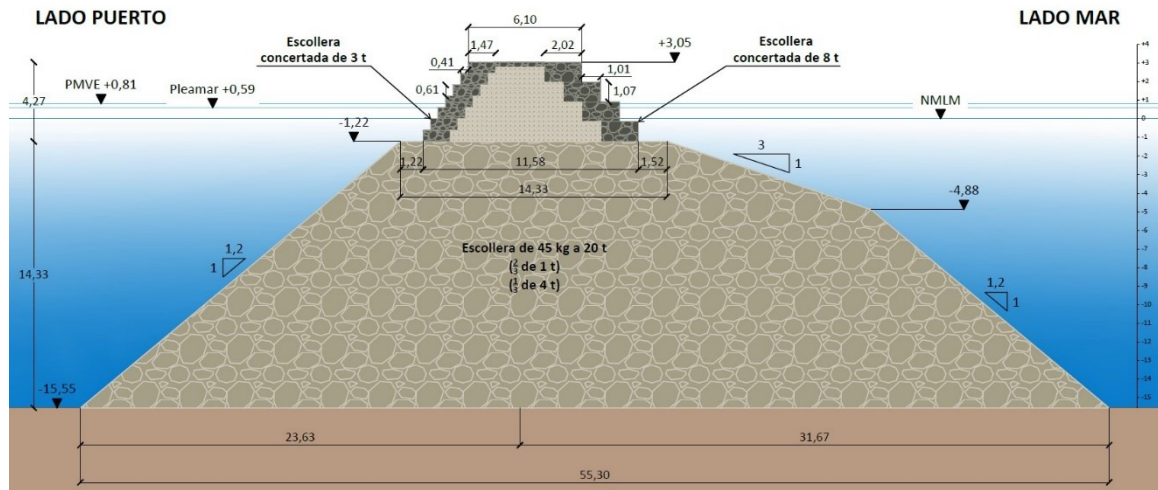


Figura 113 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 3 (Plano IV.4.6 en la sección de Anejos)

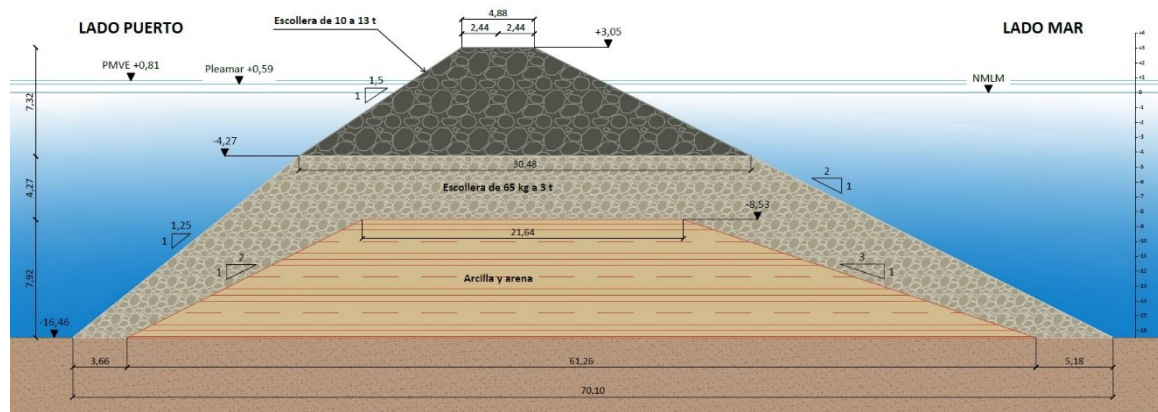


Figura 114 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 3 (Plano IV.4.7 en la sección de Anejos)

IV.5 Escenario 4 (PMVE|SLR = 1,07 m|SS = 0 – 0,73 m)

IV.5.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

Para el escenario 4, se procede con un modelado de un incremento del nivel del mar permanente (SLR_p (m)) de 1,07 metros sobre la PMVE. Posteriormente se modela un incremento del nivel del mar temporal (SLR_t (m)) de 0,73 metros sobre el incremento modelado anteriormente (correspondiente a la marea meteorológica asociada a un período de retorno de 225 años).

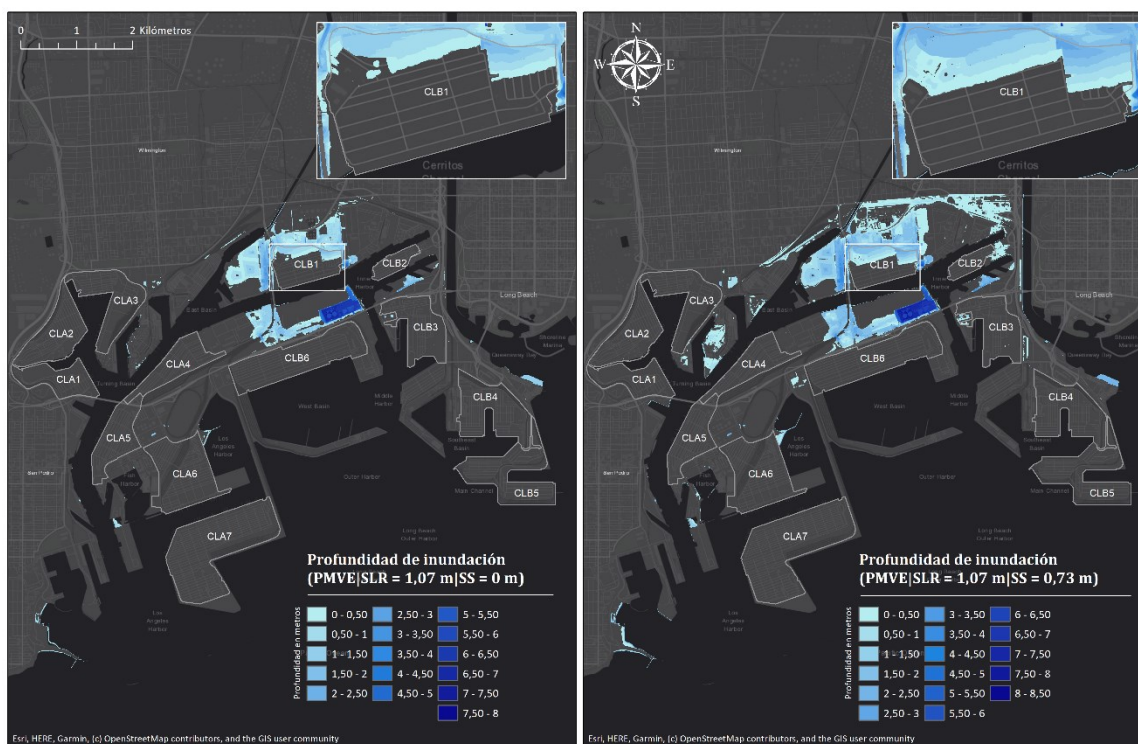


Figura 115 - Delimitación de la superficie en riesgo de inundación y su profundidad en condiciones permanentes a la izquierda y temporales a la derecha, para el escenario 4 (Plano IV.5 en la sección de Anejos)

En lo que respecta a la superficie en riesgo de inundación, dígame, la superficie que se encuentra por debajo de los niveles modelados de PMVE en adición al incremento del nivel del mar correspondiente al escenario 4 (de forma permanente) y de la marea meteorológica proyectada (de forma temporal), esta será:

SUPERFICIE EN RIESGO DE INUNDACIÓN					
ESCENARIO	SLR _p (m)	Permanente (m ²)	SLR _t (m)	Temporal (m ²)	Media (m ²)
4	1,07	1.967.828,97	1,80	3.571.793,60	2.769.811,29

Tabla 25 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para el escenario 4

IV.5.2 Variación del francobordo de seguridad

A continuación, se presentan los valores máximos, medios y mínimos del francobordo de seguridad permanente y temporal de las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos correspondientes al escenario 4:

FRANCOBORDO DE SEGURIDAD - ESCENARIO 4							
Permanente - PMVE SLR = 1,07 m SS = 0 m				Temporal - PMVE SLR = 1,07 m SS = 0,73 m			
COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES				COTAS PUERTO DE LOS ÁNGELES			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLA1	1,71	2,62	3,89	CLA1	0,98	1,89	3,16
CLA2	1,42	3,48	5,62	CLA2	0,69	2,75	4,89
CLA3	1,19	2,35	9,76	CLA3	0,46	1,62	9,03
CLA4	1,07	1,93	2,91	CLA4	0,34	1,20	2,18
CLA5	1,20	2,19	3,20	CLA5	0,47	1,46	2,47
CLA6	1,11	3,37	13,76	CLA6	0,38	2,64	13,03
CLA7	1,65	3,00	9,69	CLA7	0,92	2,27	8,96
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLA1	2,16	2,35	2,72	MCLA1	1,43	1,62	1,99
MCLA2	2,14	2,47	2,79	MCLA2	1,41	1,74	2,06
MCLA3	2,36	2,53	2,90	MCLA3	1,63	1,80	2,17
MCLA4	2,42	2,54	2,85	MCLA4	1,69	1,81	2,12
MCLA5	1,96	2,36	3,17	MCLA5	1,23	1,63	2,44
MCLA6	2,41	2,47	2,66	MCLA6	1,68	1,74	1,93
MCLA7	2,19	2,42	2,74	MCLA7	1,46	1,69	2,01
COTAS PUERTO DE LONG BEACH				COTAS PUERTO DE LONG BEACH			
Terminales	Mínima	Media	Máxima	Terminales	Mínima	Media	Máxima
CLB1	-2,23	0,93	2,93	CLB1	-2,96	0,20	2,20
CLB2	1,34	2,14	3,92	CLB2	0,61	1,41	3,19
CLB3	1,01	3,44	12,79	CLB3	0,28	2,71	12,06
CLB4	2,10	2,71	9,38	CLB4	1,37	1,98	8,65
CLB5	1,78	2,92	4,52	CLB5	1,05	2,19	3,79
CLB6	1,67	2,19	8,73	CLB6	0,94	1,46	8,00
Muelles	Mínima	Media	Máxima	Muelles	Mínima	Media	Máxima
MCLB1	1,61	1,92	2,44	MCLB1	0,88	1,19	1,71
MCLB2	2,23	2,38	3,23	MCLB2	1,50	1,65	2,50
MCLB3	2,75	2,94	3,26	MCLB3	2,02	2,21	2,53
MCLB4	2,05	2,45	3,12	MCLB4	1,32	1,72	2,39

MCLB5	2,42	2,62	3,10	MCLB5	1,69	1,89	2,37
MCLB6	2,18	2,32	2,66	MCLB6	1,45	1,59	1,93

Tabla 26 - Francobordo de seguridad permanente y temporal en las terminales de contenedores y muelles de ambos puertos para el escenario 4

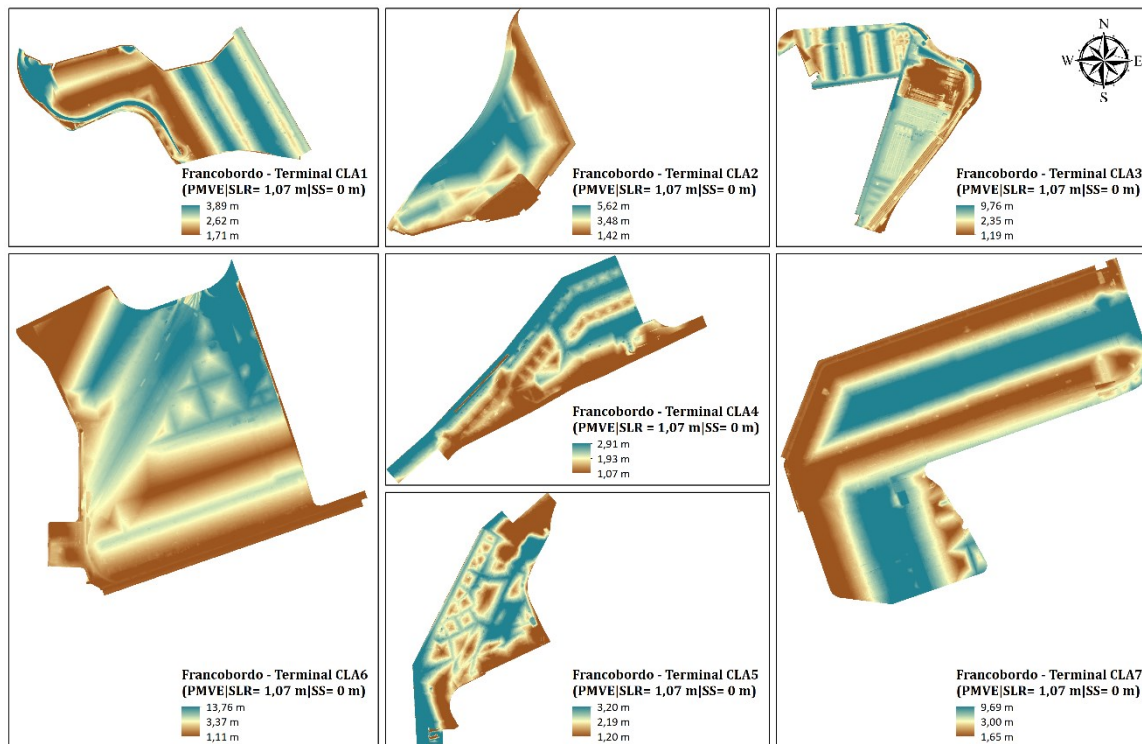


Figura 116 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.1 en la sección de Anejos)

IV. Resultados

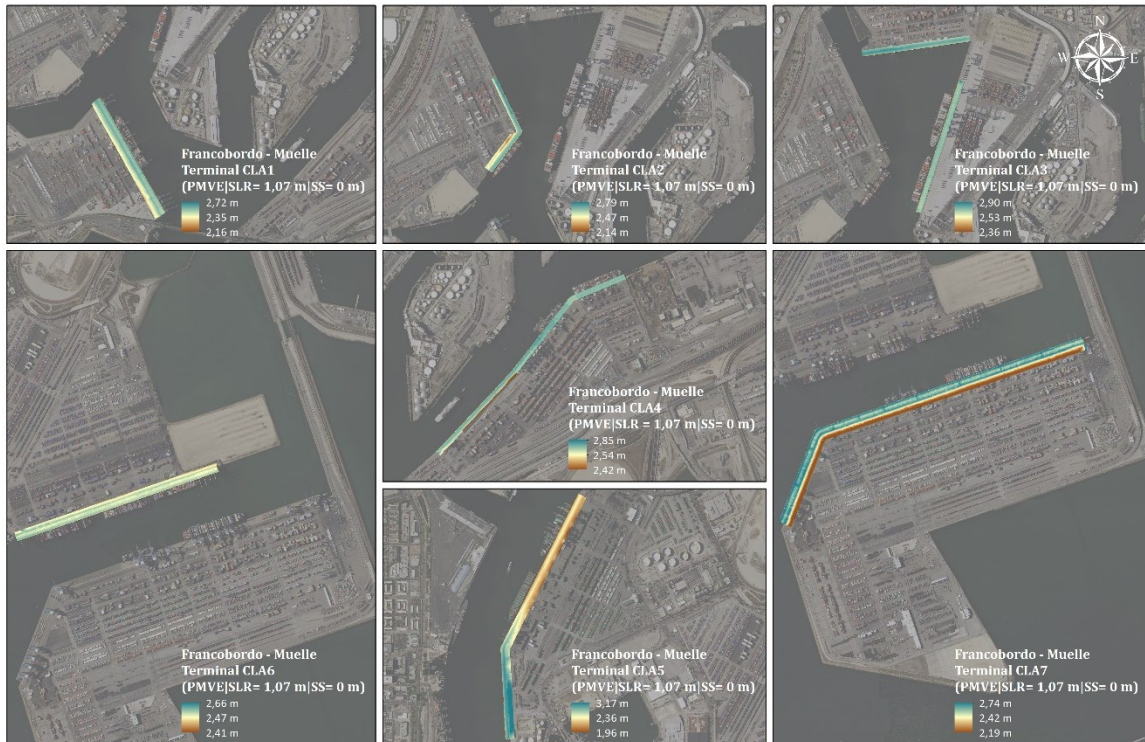


Figura 117 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.1.1 en la sección de Anejos)

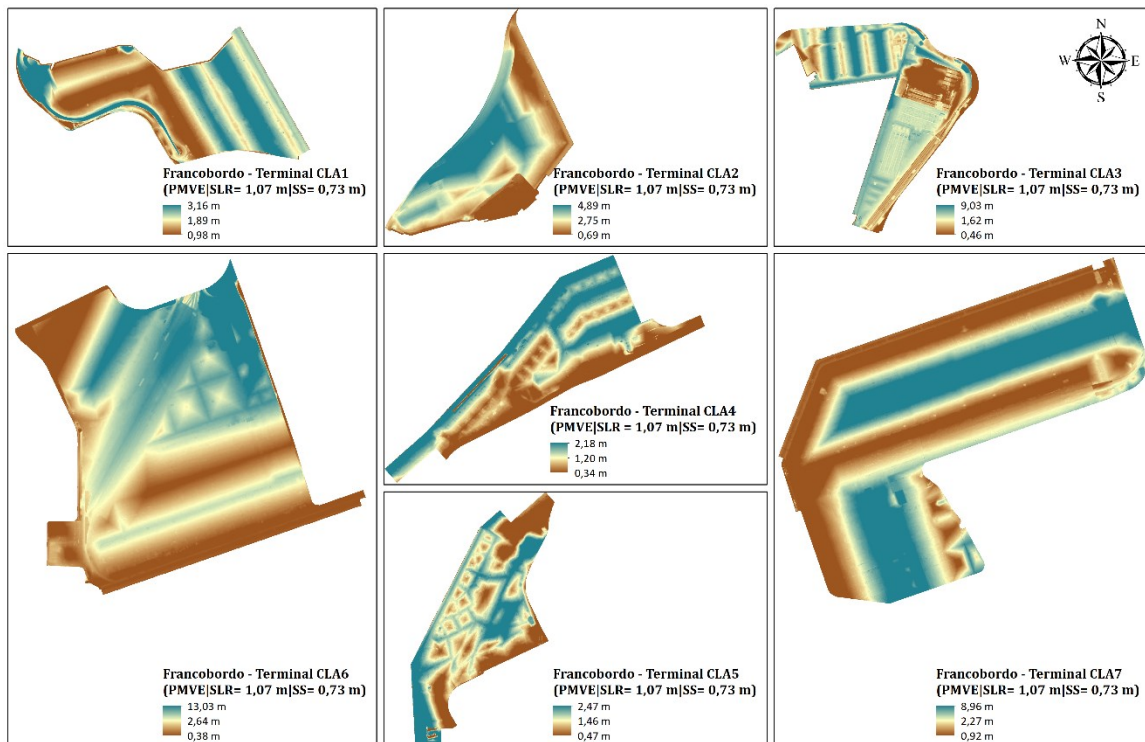


Figura 118 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.2 en la sección de Anejos)

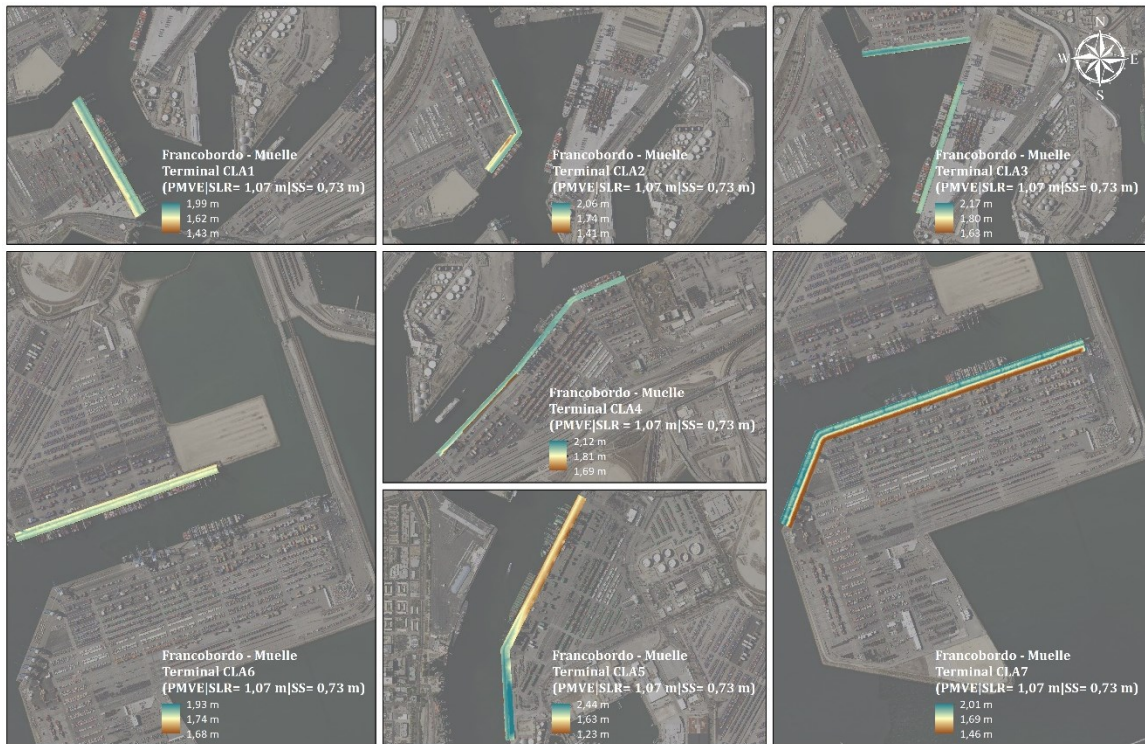


Figura 119 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Los Ángeles (Plano IV.5.2.1 en la sección de Anejos)

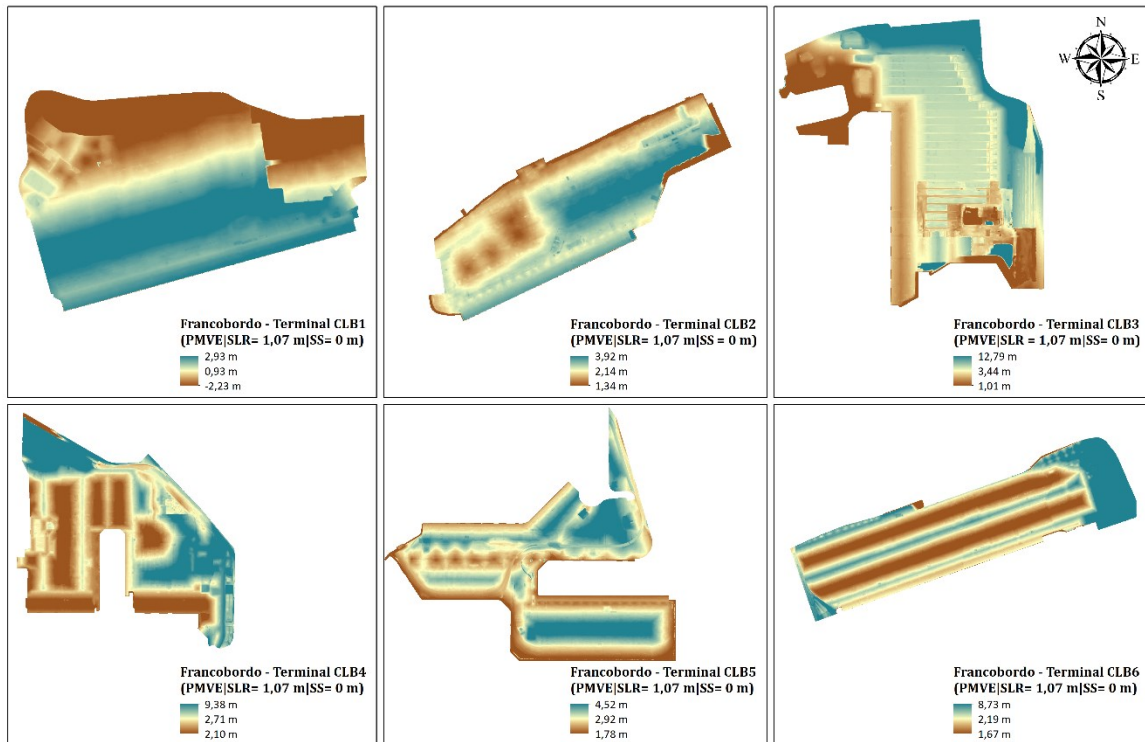


Figura 120 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.3 en la sección de Anejos)

IV. Resultados



Figura 121 - Francobordo de seguridad en condiciones permanentes para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.3.1 en la sección de Anejos)

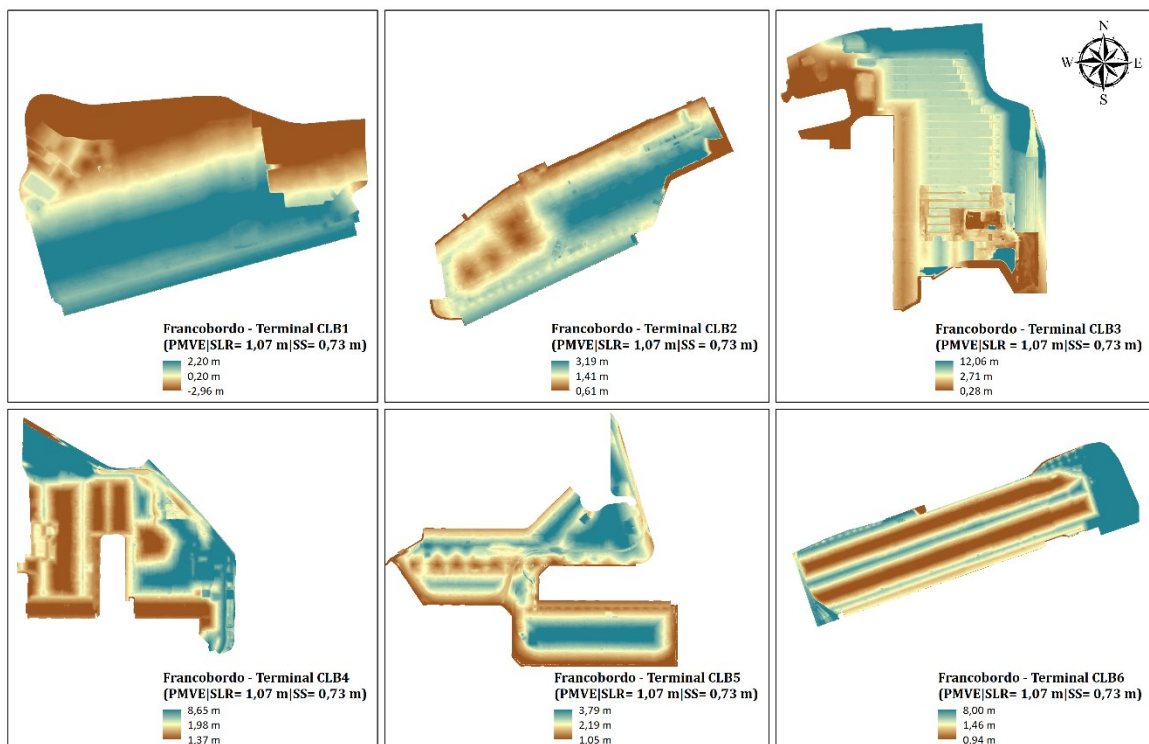


Figura 122 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.4 en la sección de Anejos)

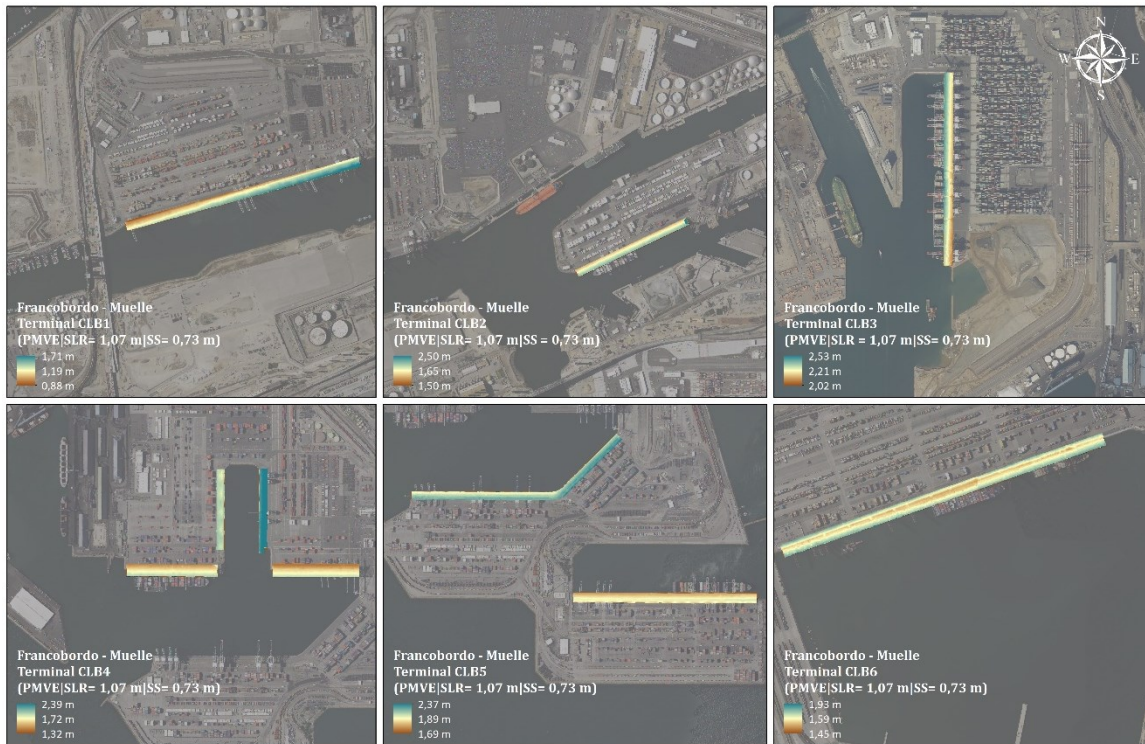


Figura 123 - Francobordo de seguridad en condiciones temporales para el escenario 4 en los muelles de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach (Plano IV.5.4.1 en la sección de Anejos)

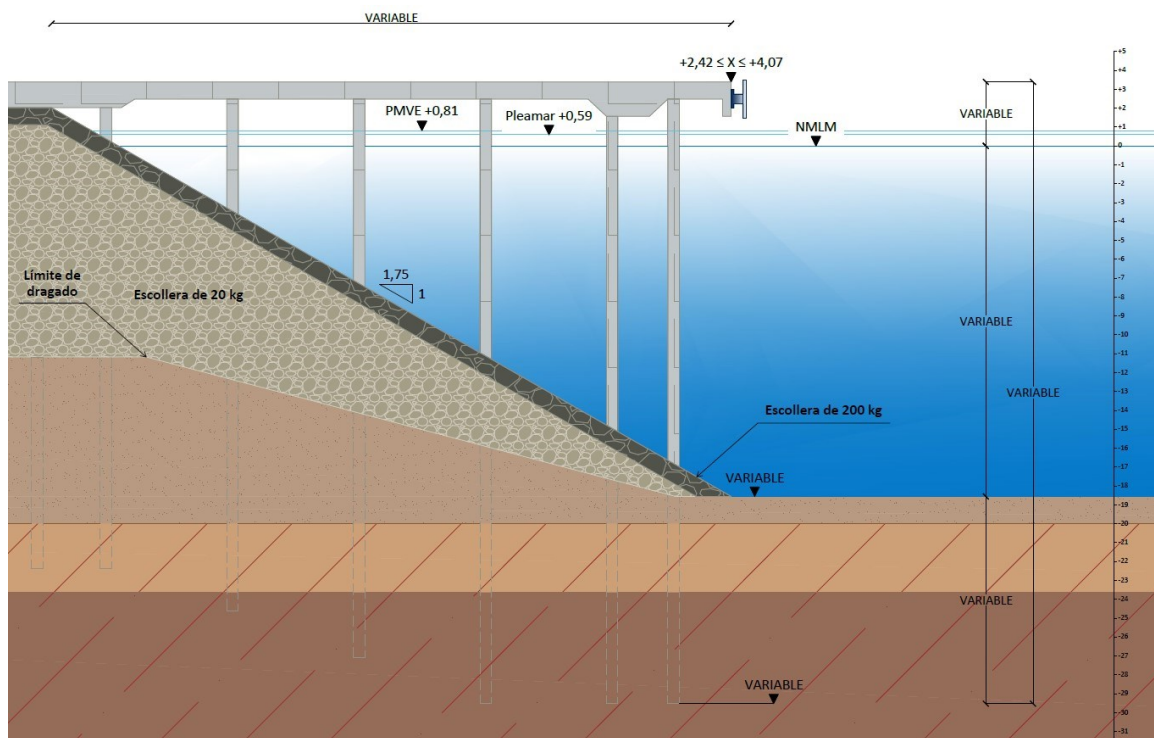


Figura 124 - Sección tipo de los muelles de las terminales de contenedores de ambos puertos para el escenario 4 (Plano IV.5.5 en la sección de Anejos)

IV.5.3 Estimación de rebases en diques

Los rebases en los diques, estimados mediante la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) para el presente escenario en función de la altura de ola significativa a pie de dique con un período de retorno de 1, 50, 100 y 225 años son:

ESTIMACIÓN DE REBASES - ESCENARIO 4				
PERIODO DE RETORNO		T _r = 1 año		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	2,55	17,07	1,53	108,10
B	2,31	17,07	1,53	66,13
C	2,31	17,98	1,53	173,51
D	2,27	17,98	1,53	161,88
PERIODO DE RETORNO		T _r = 50 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	3,86	17,07	1,53	571,05
B	3,52	17,07	1,53	412,93
C	3,52	17,98	1,53	721,37
D	3,21	17,98	1,53	546,95
PERIODO DE RETORNO		T _r = 100 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,11	17,07	1,53	703,44
B	3,78	17,07	1,53	531,54
C	3,78	17,98	1,53	883,85
D	3,39	17,98	1,53	645,59
PERIODO DE RETORNO		T _r = 225 años		
PUNTO	H _{m0} (m)	h _{PMVE} (m)	R _c (m)	q (l/s/m)
A	4,40	17,07	1,53	873,38
B	4,10	17,07	1,53	697,89
C	4,10	17,98	1,53	1102,79
D	3,60	17,98	1,53	769,84

Tabla 27 - Estimación de rebases en los diques del ámbito de estudio para el escenario 4

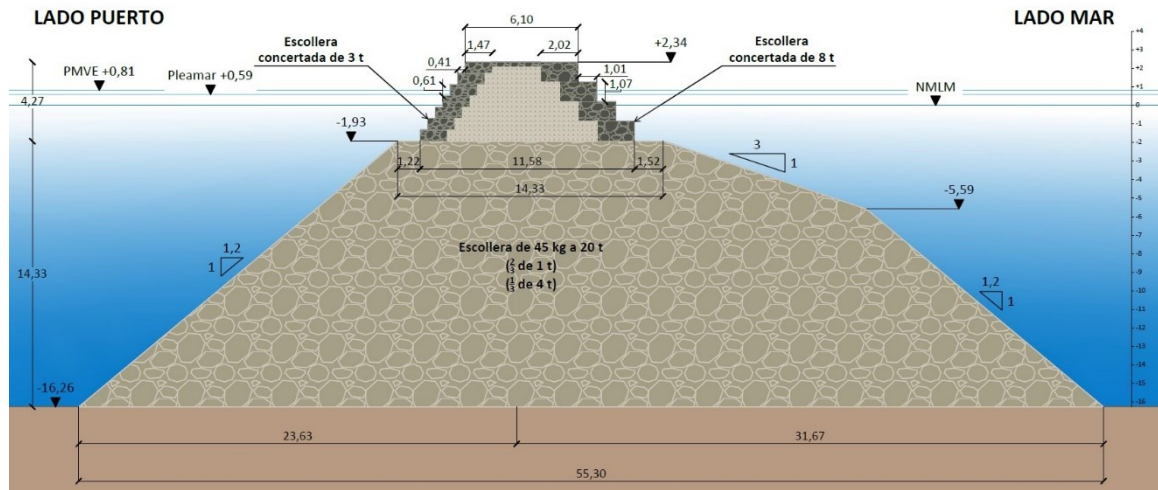


Figura 125 - Sección tipo del Dique de San Pedro para el escenario 4 (Plano IV.5.6 en la sección de Anejos)

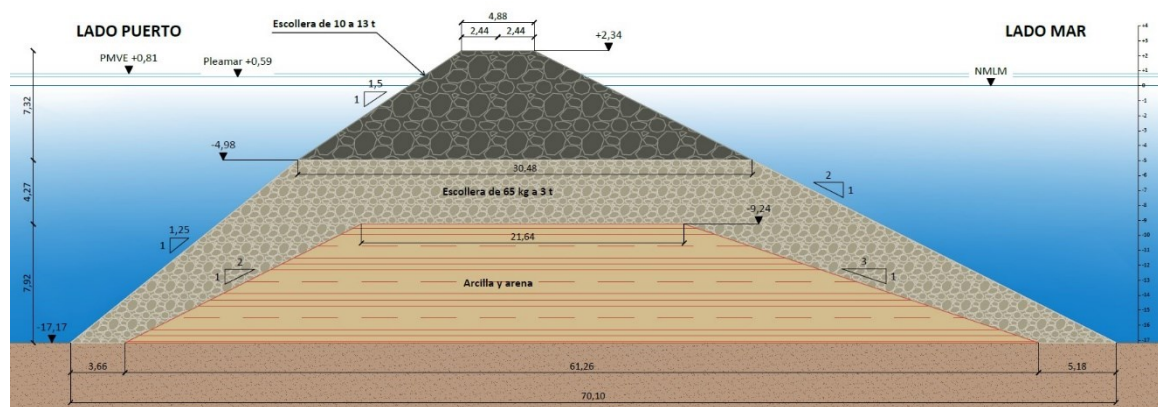


Figura 126 - Sección tipo del Dique Intermedio y Dique de Long Beach para el escenario 4 (Plano IV.5.7 en la sección de Anejos)

IV.6 Análisis de resultados

IV.6.1 Delimitación de la superficie en riesgo de inundación

En lo que respecta a la superficie media en riesgo de inundación en el ámbito de estudio, se obtuvo para el escenario 1 un incremento de 19,74% con respecto de la media del escenario 0. Del mismo modo para los escenarios 2, 3 y 4, se obtuvieron incrementos del orden de 42,82%, 30,53% y 123,54% respectivamente.

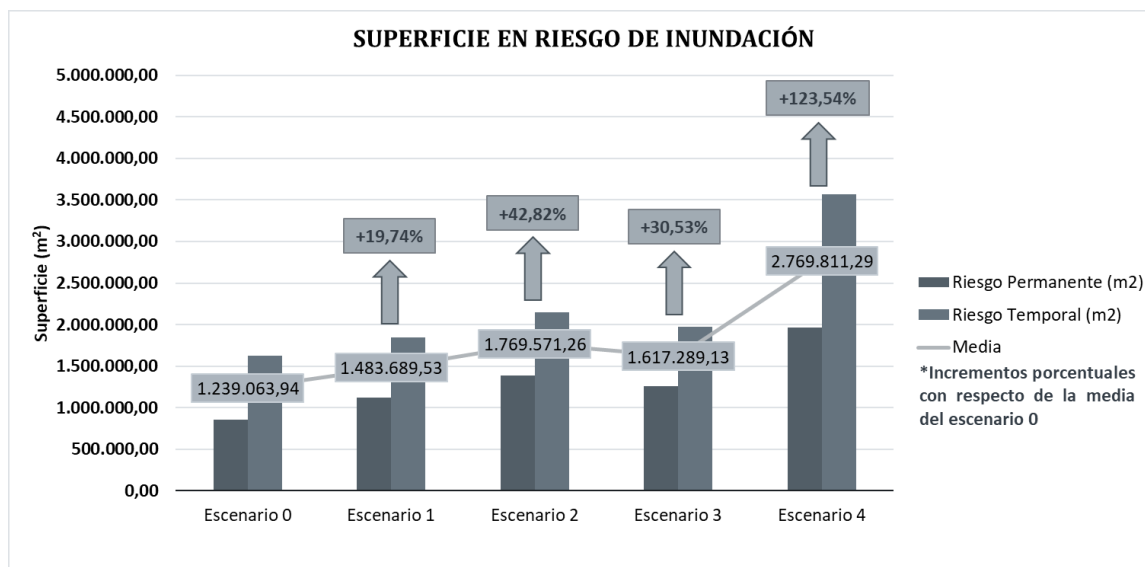


Figura 127 - Superficie en riesgo de inundación permanente y temporal para todos los escenarios analizados

Se destacan dos zonas críticas en el ámbito de estudio, la primera se encuentra al norte de los puertos, en la cual se localizan terrenos desocupados en la actualidad y propiedad del Puerto de Los Ángeles y la terminal de contenedores CLB1 correspondiente al Puerto de Long Beach. Separadas por el Canal Cerritos y cruzando el Puente Schuyler F. Heim en dirección sur, se encuentra la segunda zona mencionada, en cuyas proximidades se encuentra la terminal de contenedores CLB6 del Puerto de Long Beach y las terminales de contenedores CLA4 y CLA5 del Puerto de Los Ángeles.

Según los resultados de la metodología aplicada, la influencia del Canal Domínguez, el cual yace justo al lado de la primera zona crítica, es fundamental en la determinación de la superficie en riesgo de inundación. En adición a esto, cabe destacar que dicha zona forma parte de lo que se llama Zona Especial en Riesgo de Inundación (SFHA, por sus siglas en inglés), catalogada como tal por la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias de EE. UU. (FEMA, por sus siglas en inglés).

Los resultados obtenidos concuerdan con los de un estudio realizado por la División de Planeamiento y Asuntos Medioambientales del Puerto de Long Beach en 2016, en el cual afirman que la presentación de condiciones extremas en el futuro en combinación con

incrementos en el nivel del mar pudieran provocar el desbordamiento del canal y la posterior inundación de las zonas aledañas al mismo (POLB, 2016).



Figura 128 - Fotografía del Canal Domínguez a su paso próximo al Puerto de Long Beach (Google, 2019)

En adición a la terminal de contenedores CLB1, en la zona también se encuentran refinерías de petróleo y gas, plantas procesadoras de químicos y una terminal Ro-Ro.

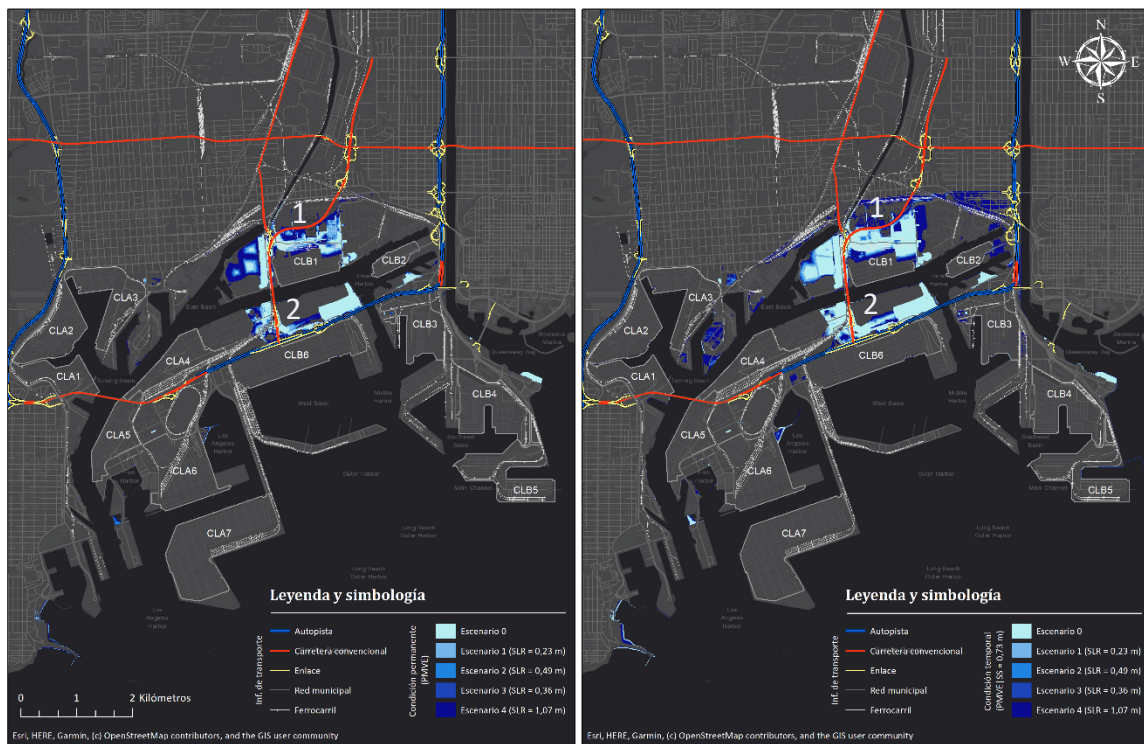


Figura 129 - Superficie total en riesgo de inundación permanente y temporal en el ámbito de estudio para todos los escenarios considerados (Plano IV.6 en la sección de Anejos)

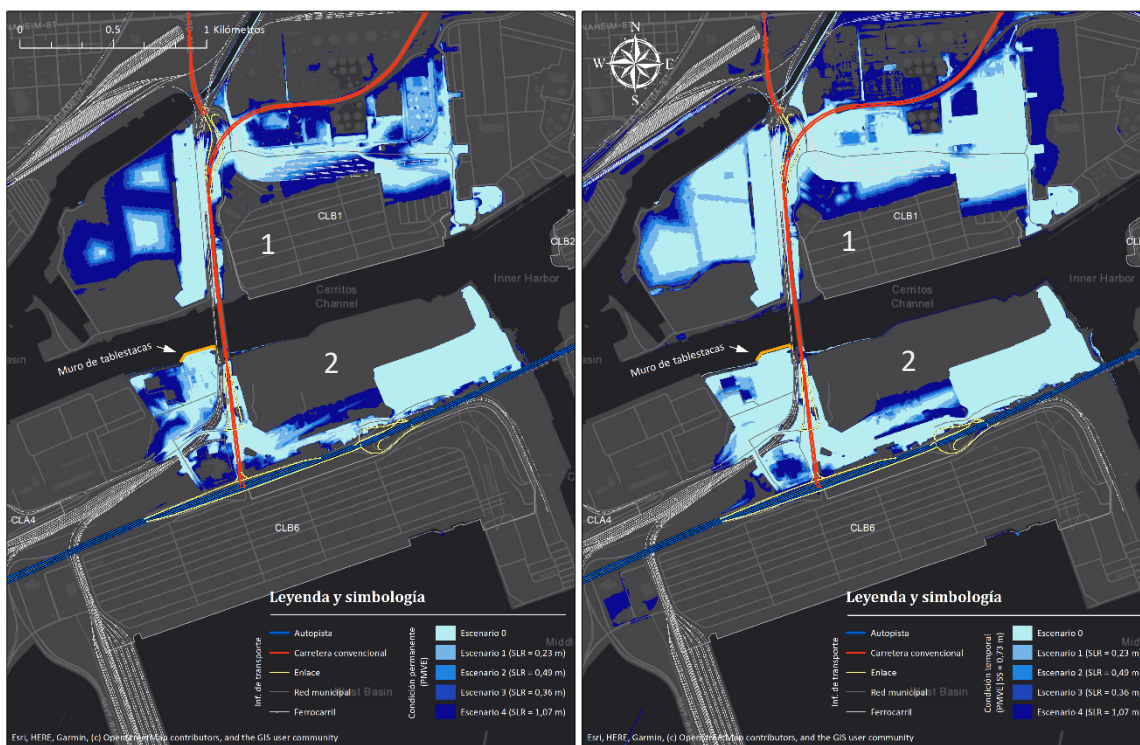


Figura 130 - Zonas críticas en riesgo de inundación permanente y temporal en el ámbito de estudio para todos los escenarios considerados (Plano IV.6.1 en la sección de Anejos)

Continuando con el análisis de estas áreas críticas, nos dirigimos a la segunda zona, al sur del emplazamiento analizado anteriormente. Esta colinda con la terminal de contenedores CLB6 del Puerto de Long Beach y está próxima a las terminales CLA4 y CLA5 del Puerto de los Ángeles. Dentro de la zona podemos encontrar una planta generadora de electricidad a base de gas natural, una subestación de electricidad, almacenes y una terminal de granel líquido.



Figura 131 - Localización del muro de tablestacas en la segunda zona crítica (Google, 2019)

Según se puede observar en la imagen anterior, la misma cuenta con un muro de tablestacas justo al frente de la terminal de granel líquido, el cual tiene una cota de coronación de +3,77 metros sobre el NMLM. Debido al fino espesor de dicho muro, este no pudo ser capturado e

incorporado al MDE utilizado en esta investigación, por lo cual se asume que dicho muro no ofrece protección alguna frente a inundaciones para el presente análisis.

Una vez ejecutado el modelo, este arrojó como resultado que justo donde se encuentra el muro de tablestacas y los terrenos ubicados a su izquierda es que se iniciaría la inundación, debido a la baja elevación que presentan. Según se puede observar, en esta superficie del Puerto de Long Beach, se forma una especie de corredor o canal, a través del cual el agua se desplazaría hasta llegar a la planta generadora de electricidad, acumulándose en sus alrededores debido a que está situada en un emplazamiento cuya cota inferior es de -5,69 metros con respecto del NMLM.



Figura 132 - Localización de la planta generadora de electricidad en la segunda zona crítica (Google, 2019)

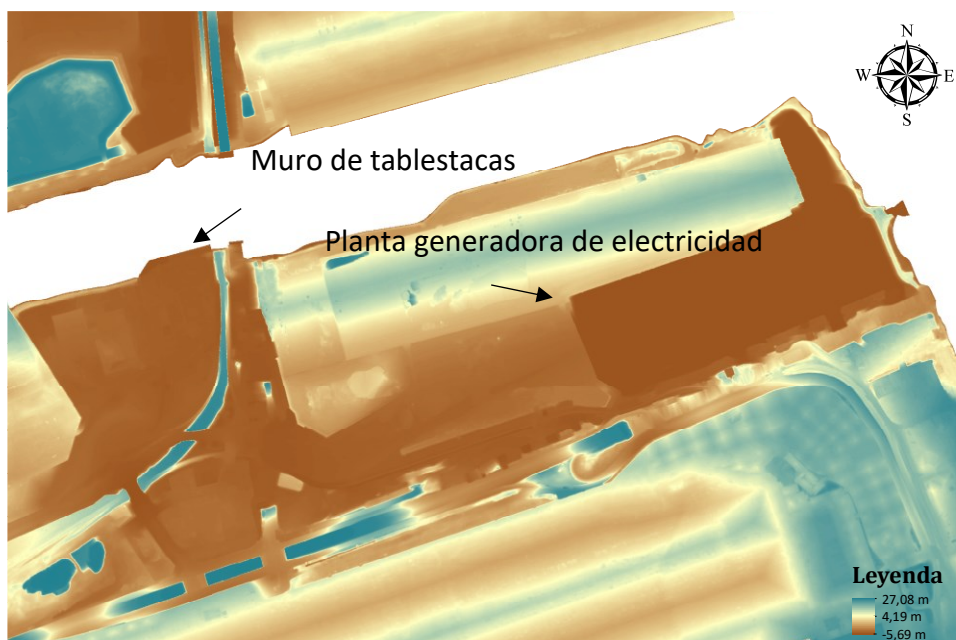


Figura 133 - Topografía de la zona crítica número 2

De todas las terminales de contenedores localizadas en el ámbito de estudio, la única que se vería afectada por los escenarios proyectados es la CLB1, correspondiente al Puerto de Long

Beach y localizada en la primera zona crítica analizada. Dicha terminal cuenta con parte de sus terrenos por debajo del nivel de PMVE, los cuales corresponden específicamente al patio de maniobras de los trenes de mercancías que llegan o salen de dicha terminal y al patio de contenedores.

Como se dijo anteriormente, la zona crítica en la cual se localiza la terminal CLB1 está condicionada más que por el incremento del nivel del mar por la combinación de este en adición a las mareas meteorológicas y precipitaciones extremas que provocarían que el Canal Domínguez se desborde debido al incremento de las descargas producto de la suma de los factores mencionados anteriormente.



Figura 134 - Zonas inundables debido a descargas fluviales asociadas con un período de retorno de 100 años (POLB, 2016)

IV.6.1.1 Efectos en infraestructuras de transporte

Según los resultados de esta investigación, las infraestructuras de transporte terrestre que conectan el ámbito de estudio con sus alrededores y el resto de EE. UU. se verían afectadas de la manera siguiente:

- **En lo que respecta a las infraestructuras ferroviarias:**
 - Las vías de ferrocarril ubicadas en las zonas críticas analizadas anteriormente son las que presentan la mayor exposición a ser inundadas debido a los incrementos modelados, lo cual provocaría que las mercancías que deban circular por estas vías no podrán cumplir su recorrido de producirse alguno de estos supuestos.
 - La terminal de contenedores CLB1 del Puerto de Long Beach quedaría aislada a todo tráfico ferroviario en cualquiera de los escenarios modelados.
 - La terminal de contenedores CLB6 del Puerto de Long Beach y las terminales de contenedores CLA4, CLA5, CLA6 y CLA7 del Puerto de Los Ángeles, aunque no presentan inundación en ninguno de los escenarios modelados, serían afectadas indirectamente por estos, puesto que las mercancías que deseen

llegar y salir de estas terminales por vía férrea se encontrarán con las vías obstaculizadas.

- Bajo los escenarios más extremos, dígame la combinación de incrementos del nivel del mar y mareas meteorológicas con períodos de retorno de 225 años y precipitaciones intensas, las terminales de contenedores CLB3, CLB4 y CLB5 al igual que en el caso anterior, no presentan inundación relevante en ninguno de los escenarios modelados pero serían afectadas indirectamente, debido a que las mercancías que deseen llegar y salir de estas terminales por vía férrea se encontrarán con las vías obstaculizadas.
- Debido a las inundaciones a corto plazo, el movimiento de trenes de mercancías se detendrá, pero esto no supondrá un daño a los materiales de dicha infraestructura.
- **En lo que respecta a las autopistas, carreteras, enlaces y calles:**
 - Actualmente, las vías de transporte terrestre no férreas del ámbito de estudio cuentan con un sistema de bombas, administrado por cada uno de los puertos en su demarcación, encargado de remover las aguas que se posan en las zonas de baja elevación de dichas vías. De producirse un incremento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones, se requerirá de mejoras sustanciales en estos sistemas para minimizar su impacto en las operaciones portuarias.
 - Estas vías, principalmente de hormigón armado y que pueden contar o no con una capa de rodadura de hormigón asfáltico no son muy sensibles al daño por inundaciones temporales que los escenarios modelados podrían producir. Si estos caminos quedaran sumergidos se detendría el movimiento de ciertos vehículos en función de la profundidad de inundación alcanzada por las aguas, pero se reanudaría tan pronto estas sean lo suficientemente evacuadas para tal fin.
 - Inundaciones repetitivas, sin embargo, podrían causar deterioros sustanciales en estas infraestructuras.
 - Las primeras vías en ser inundadas serían las ubicadas en las zonas críticas analizadas anteriormente junto con las que están próximas a las terminales de contenedores CLB2 y CLB3 del Puerto de Long Beach. Para los peores casos de los escenarios modelados el panorama sería el mismo quedando aislada totalmente las terminales de contenedores CLB1 del Puerto de Long Beach debido a inundación en gran parte de su área y de las vías de transporte que salen de la misma. Quedarán aisladas indirectamente debido a que no presentan inundación alguna las terminales CLB2, CLB3, CLB4, CLB5 y CLB6 del Puerto de Long Beach y las terminales CLA4, CLA5, CLA6 y CLA7 del Puerto de Los Ángeles.

IV.6.2 Variación del francobordo de seguridad

Aunque en la exposición de los resultados se abordó la variación en los francobordos de seguridad tanto de las terminales de contenedores del ámbito de estudio como de sus muelles, la primera representó una etapa intermedia en la consecución de los resultados obtenidos en dicha fase de estudio, por lo cual en el presente inciso solo se tratará la variación de este parámetro en los muelles.

En el manual de diseño del Puerto de Long Beach (2014) se especifica una elevación mínima de superficie terminada para todas las terminales operativas de 2 metros y una elevación deseada de 2,90 metros ambas con respecto de la PMVE. Del mismo modo, el manual de diseño de muelles del Puerto de Long Beach (2012) no especifica una elevación mínima de superficie terminada para los muelles de todas las terminales operativas con la única condición de que se garantice el buen funcionamiento de estas bajo todas las fases de la marea astronómica y que, donde aplique, dicha elevación deberá coincidir con la de instalaciones adyacentes salvo se estipule lo contrario en los criterios específicos del proyecto.

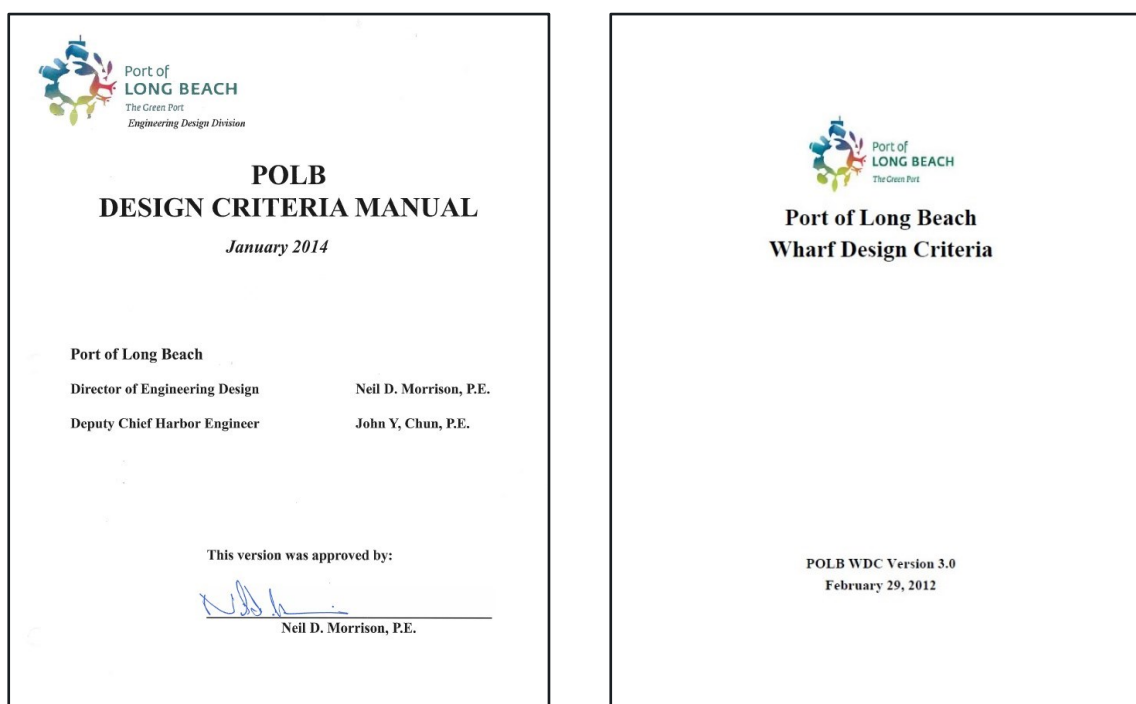


Figura 135 - Manuales de diseño del Puerto de Long Beach (2012; 2014)

En dichos manuales no se hace referencia a un francobordo de seguridad mínimo como tal ni se vincula con condiciones relacionadas al uso del atraque o los buques que harán uso de este como es el caso de otras normativas internacionales, tales como el programa ROM de Recomendaciones para Obras Marítimas de España.

Según las recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre, criterios generales y factores de proyecto especificadas en la ROM2.0-11 (2012), el

francobordo de seguridad de toda obra de atraque se define como «El francobordo mínimo de la línea de atraque con respecto al nivel superior de la ventana extremal de las aguas exteriores...».

Para continuar con esta comparación, la ROM va más allá y establece unos criterios para la determinación de niveles mínimos de coronación de las obras de atraque fijas, los cuales se recogen en la tabla 3.2.2.1, la cual se muestra en la siguiente figura:

Tabla 3.2.2.1. Criterios para la determinación de niveles mínimos de coronación de las obras de atraque fijas

	NIVEL DE REFERENCIA DE LAS AGUAS EXTERIORES	USO DE LA OBRA DE ATRAQUE	FRANCOBORDO (EN M)
POR CONDICIONES DE EXPLOTACIÓN	Nivel superior de la ventana de marea operativa ¹⁾	Uso comercial, industrial y militar	+ 1,50 – + 2,50 ³⁾
		Uso pesquero	+ 0,50 – + 1,00 ⁴⁾
		Uso náutico-deportivo	+ 0,15 – + 1,00 ⁵⁾
POR CONDICIONES DE NO REBASABILIDAD DE LAS AGUAS EXTERIORES	Nivel superior de la ventana extremal de las aguas exteriores ²⁾	Todos los usos	+ 0,50
POR CONDICIONES DE NO INUNDACIÓN POR LOS NIVELES FREÁTICOS EN EL TRASDÓS	Nivel superior de la ventana extremal de los niveles freáticos en el trasdós	Todos los usos	+ 0,50

Figura 136 - Criterios para la determinación de niveles mínimos de coronación de las obras de atraque fijas según la ROM2.0-11 (2012)

En la figura anterior, la ROM2.0-11 clasifica para condiciones de explotación, de no rebasabilidad y de no inundación por niveles freáticos en el trasdós, los criterios para la determinación de niveles mínimos de coronación de las obras de atraque fijas.

Así es como, por ejemplo, si entramos en la clasificación por condiciones de explotación, se nos indica un nivel de referencia de las aguas exteriores igual al nivel superior de la ventana de marea operativa, la cual según la ROM2.0-11 se entiende por esta a «la formada por los niveles superior e inferior de los niveles de las aguas exteriores debidas a mareas y corrientes fluviales establecidos como umbrales de operatividad para la permanencia de la flota de buques esperable en el atraque» y, de no disponer de los regímenes medios de los niveles de aguas exteriores correspondientes a mareas en el emplazamiento, esta ROM indica que dicha ventana de marea operativa será igual a:

- La PMVE y la BMVE en mares con marea astronómica significativa.
- ± 0,50 m respecto al nivel medio del mar en mares sin marea astronómica significativa.

Para tales fines, se tomará como ventana de marea operativa a la formada por la PMVE y la BMVE en el ámbito de estudio, esto es -0,86 y +0,81 metros respectivamente respecto del NMLM. Una vez se ha determinado este nivel de referencia, la ROM2.0-11 propone un rango de valores para el francobordo de seguridad en función del uso de la obra de atraque. Para la presente investigación se tiene un uso comercial, por lo cual esta guía recomienda un valor mínimo de 1,50 metros y un máximo de 2,50 metros por encima de la ventana de marea operativa en el ámbito de estudio.

IV. Resultados

El valor de 1,50 metros se tomará cuando el desplazamiento del mayor buque de la flota esperable en el atraque sea menor o igual a 10.000 toneladas. Sin embargo, cuando dicho buque tenga un desplazamiento mayor, se adoptará un francobordo de hasta 2,50 metros.

De esta forma se obtiene un rango de valores para el francobordo de seguridad de los muelles en el ámbito de estudio de 2,31 metros como mínimo y 3,31 metros como máximo, ambos por encima de la PMVE según la ROM2.0-11 y en función del desplazamiento de los buques que en estos muelles atracarán.

Si en el ámbito de estudio aplicamos la normativa expuesta anteriormente, dígase la estadounidense del Puerto de Long Beach, a los francobordos obtenidos a partir de la metodología de investigación que se llevó a cabo, se obtiene el siguiente resultado para cada escenario evaluado:

FRANCOBORDO DE SEGURIDAD DE OBRAS DE ATRAQUE				
Escenario	Puerto	Muelle	Francobordo medio (m)	Cumple normativa POLB
0	POLA	MCLA1	3,42	Cumple
		MCLA2	3,54	Cumple
		MCLA3	3,60	Cumple
		MCLA4	3,61	Cumple
		MCLA5	3,43	Cumple
		MCLA6	3,54	Cumple
		MCLA7	3,49	Cumple
	POLB	MCLB1	2,99	Cumple
		MCLB2	3,45	Cumple
		MCLB3	4,01	Cumple
		MCLB4	3,52	Cumple
		MCLB5	3,69	Cumple
		MCLB6	3,39	Cumple
		1	POLA	MCLA1
MCLA2	3,31			Cumple
MCLA3	3,37			Cumple
MCLA4	3,38			Cumple
MCLA5	3,20			Cumple
MCLA6	3,31			Cumple
MCLA7	3,26			Cumple
POLB	MCLB1		2,76	Cumple
	MCLB2		3,22	Cumple
	MCLB3		3,78	Cumple
		MCLB4	3,29	Cumple

2		MCLB5	3,46	Cumple
		MCLB6	3,16	Cumple
	POLA	MCLA1	2,93	Cumple
		MCLA2	3,05	Cumple
		MCLA3	3,11	Cumple
		MCLA4	3,12	Cumple
		MCLA5	2,94	Cumple
		MCLA6	3,05	Cumple
		MCLA7	3,00	Cumple
	POLB	MCLB1	2,50	Cumple
		MCLB2	2,96	Cumple
		MCLB3	3,52	Cumple
MCLB4		3,03	Cumple	
MCLB5		3,20	Cumple	
MCLB6		2,90	Cumple	
3	POLA	MCLA1	3,06	Cumple
		MCLA2	3,18	Cumple
		MCLA3	3,24	Cumple
		MCLA4	3,25	Cumple
		MCLA5	3,07	Cumple
		MCLA6	3,18	Cumple
		MCLA7	3,13	Cumple
	POLB	MCLB1	2,63	Cumple
		MCLB2	3,09	Cumple
		MCLB3	3,65	Cumple
		MCLB4	3,16	Cumple
		MCLB5	3,33	Cumple
MCLB6	3,03	Cumple		
4	POLA	MCLA1	2,35	Cumple
		MCLA2	2,47	Cumple
		MCLA3	2,53	Cumple
		MCLA4	2,54	Cumple
		MCLA5	2,36	Cumple
		MCLA6	2,47	Cumple
		MCLA7	2,42	Cumple
	POLB	MCLB1	1,92	No cumple
		MCLB2	2,38	Cumple

MCLB3	2,94	Cumple
MCLB4	2,45	Cumple
MCLB5	2,62	Cumple
MCLB6	2,32	Cumple

Tabla 28 - Francobordos de seguridad para los muelles de las terminales de contenedores del ámbito de estudio y bajo la influencia de todos los escenarios analizados

En la tabla anterior se puede observar cómo va evolucionando el francobordo de los muelles de las terminales de contenedores del ámbito de estudio en función de los incrementos del nivel del mar asociados a los escenarios analizados y si estos muelles cumplen o no con lo estipulado por la normativa de diseño del Puerto de Long Beach.

De estos muelles, el único que no cumple con la elevación mínima especificada en la normativa utilizada de 2 metros por encima de la PMVE (presenta 1,92 metros de francobordo por encima de la PMVE), es el muelle MCLB1 correspondiente a la terminal de contenedores CLB1 del Puerto de Long Beach y bajo las condiciones proyectadas para el escenario 4, el cual representa un incremento del nivel del mar permanente de $SLR_p = 1,07$ m por encima de la PMVE.

Los muelles que bajo los distintos escenarios proyectados cumplen con el requisito de elevación mínima especificada en la normativa utilizada de 2 metros por encima de la PMVE pero que no llegan a los 2,90 metros de elevación deseados se agrupan de la manera siguiente en función del escenario analizado:

- **Escenario 1 ($SLR_p = +0,23$ m):**
 - **Puerto de Long Beach:** MCLB1 (2,76 m).
- **Escenario 2 ($SLR_p = +0,49$ m):**
 - **Puerto de Long Beach:** MCLB1 (2,50 m).
- **Escenario 3 ($SLR_p = +0,36$ m):**
 - **Puerto de Long Beach:** MCLB1 (2,63 m).
- **Escenario 4 ($SLR_p = +1,07$ m):**
 - **Puerto de Los Ángeles:** MCLA1 (2,35 m), MCLA2 (2,47 m), MCLA3 (2,53 m), MCLA4 (2,54 m), MCLA5 (2,36 m), MCLA6 (2,47 m), MCLA7 (2,42 m).
 - **Puerto de Long Beach:** MCLB2 (2,38 m), MCLB4 (2,45 m), MCLB5 (2,62 m), MCLB6 (2,32 m).

El único muelle que bajo todos los escenarios cumplió con los requisitos de elevación mínima especificada en la normativa utilizada de 2 metros por encima de la PMVE y elevación deseada de 2,90 por encima de la PMVE es el muelle MCLB3 correspondiente a la terminal de contenedores CLB3 del Puerto de Long Beach.

IV.6.3 Estimación de rebases en diques

Partiendo de las condiciones actuales, dígame el escenario 0, los rebases evaluados en cada uno de los puntos característicos que se estudiaron arrojaron valores medios de 15,94 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 155,46 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 210,81 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 291,25 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

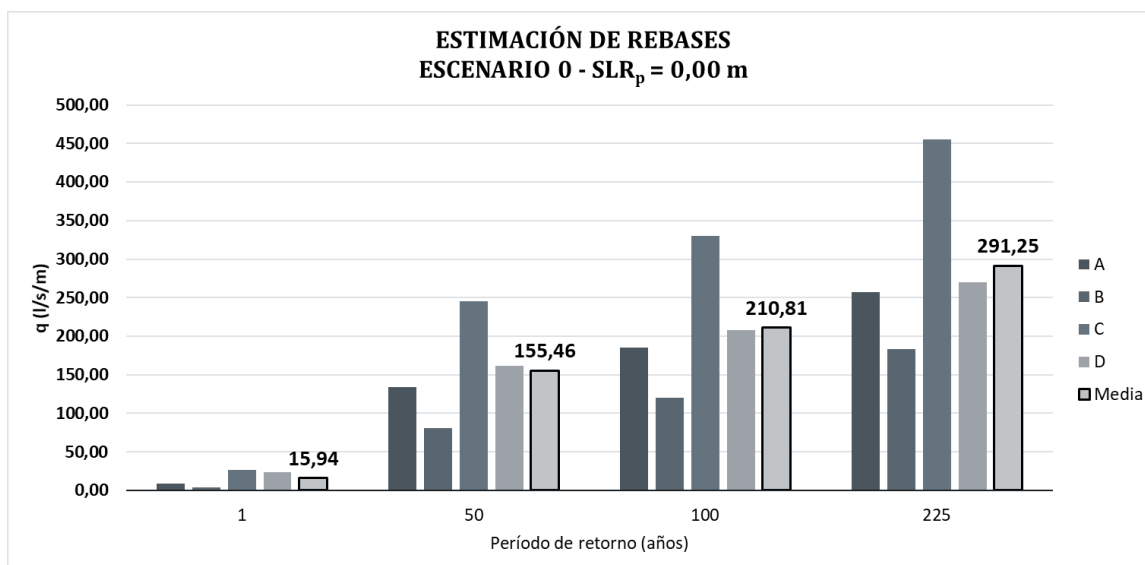


Figura 137 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 0

Como se pudo ver anteriormente en la exposición de los resultados, los rebases en los puntos característicos A y B son inferiores a los de los puntos C y D para todos los escenarios proyectados. Esto tiene su explicación en la ecuación 5.13 del EurOtop (2018) utilizada para el cálculo de los rebases, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m_0}^3}} = 0,1035 * e^{\left(- \left(1,35 * \frac{R_c}{H_{m_0}} * \gamma_f * \gamma_\beta * \gamma_v \right)^{1,30} \right)}$$

Observando el segundo miembro de la ecuación, podemos ver en el exponente al cual se eleva la constante exponencial e , el factor γ_f , que representa la permeabilidad del núcleo de la obra de abrigo evaluada. Para los puntos característicos A y B, localizados en el Dique de San Pedro, este factor tiene un valor de 0,40, debido a que su núcleo es permeable, compuesto únicamente de escollera, lo cual ofrece una mayor disipación de la energía del oleaje y por consiguiente menores rebases, aunque esto pudiera implicar una mayor

transmisión de energía de oleaje a través de este, la cual podría afectar las aguas abrigadas del ámbito de estudio.

Por otro lado, para los puntos característicos C y D, localizados en el Dique Intermedio y en el Dique de Long Beach respectivamente, este factor tiene un valor de 0,55, debido a que su núcleo es impermeable, compuesto de arcilla y arena, lo cual ofrece una menor disipación de la energía del oleaje y por consiguiente mayores rebases.

Para el escenario 1, los rebases evaluados en cada uno de los puntos característicos que se estudiaron arrojaron valores medios de 25,37 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 207,67 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 275,41 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 371,81 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

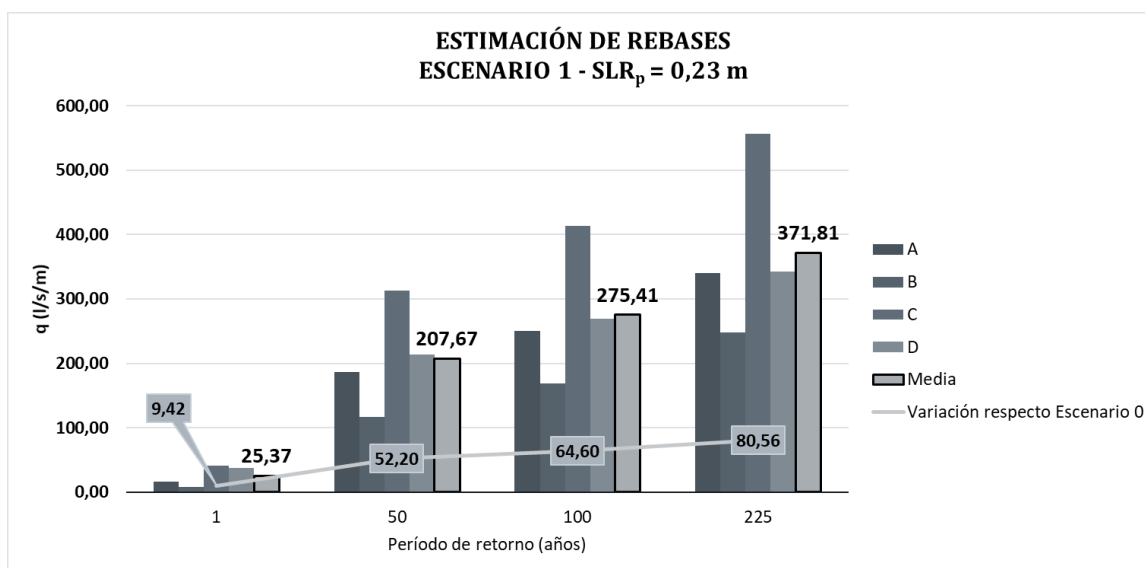


Figura 138 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 1 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0

Del mismo modo y para el presente escenario con respecto del escenario 0, se observan incrementos de 9,42 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 52,20 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 64,60 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 80,56 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

Para el escenario 2, los rebases evaluados en cada uno de los puntos característicos que se estudiaron arrojaron valores medios de 42,43 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 285,88 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 369,91 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 486,75 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

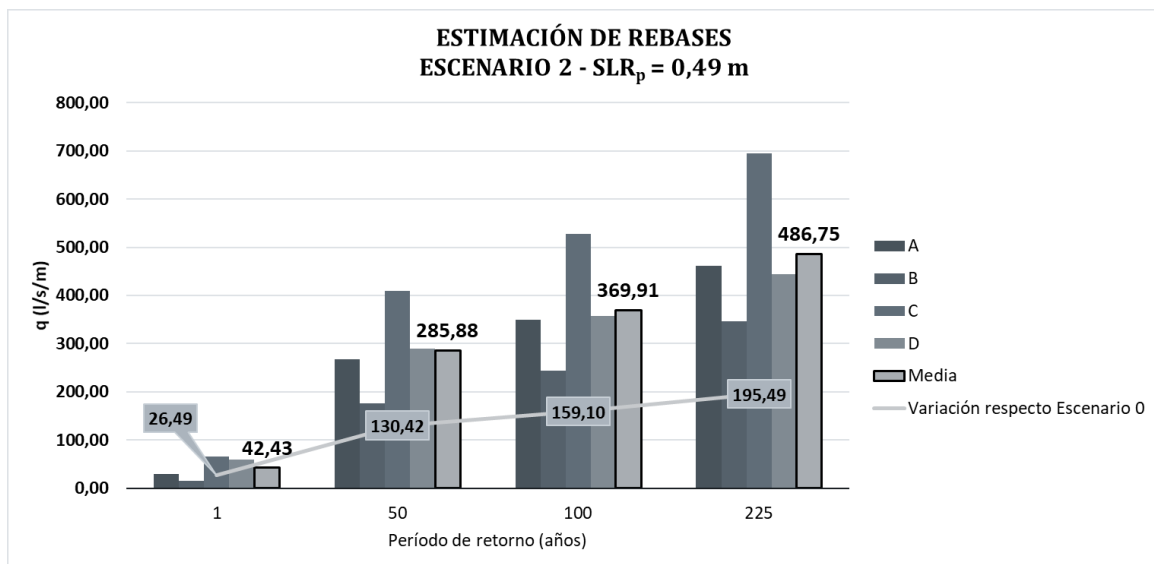


Figura 139 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 2 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0

Del mismo modo y para el presente escenario con respecto del escenario 0, se observan incrementos de 26,49 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 130,42 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 159,10 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 195,49 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

Para el escenario 3, los rebases evaluados en cada uno de los puntos característicos que se estudiaron arrojaron valores medios de 32,85 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 243,92 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 319,50 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 425,81 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

Del mismo modo y para el presente escenario con respecto del escenario 0, se observan incrementos de 16,91 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 88,45 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 108,69 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 134,56 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

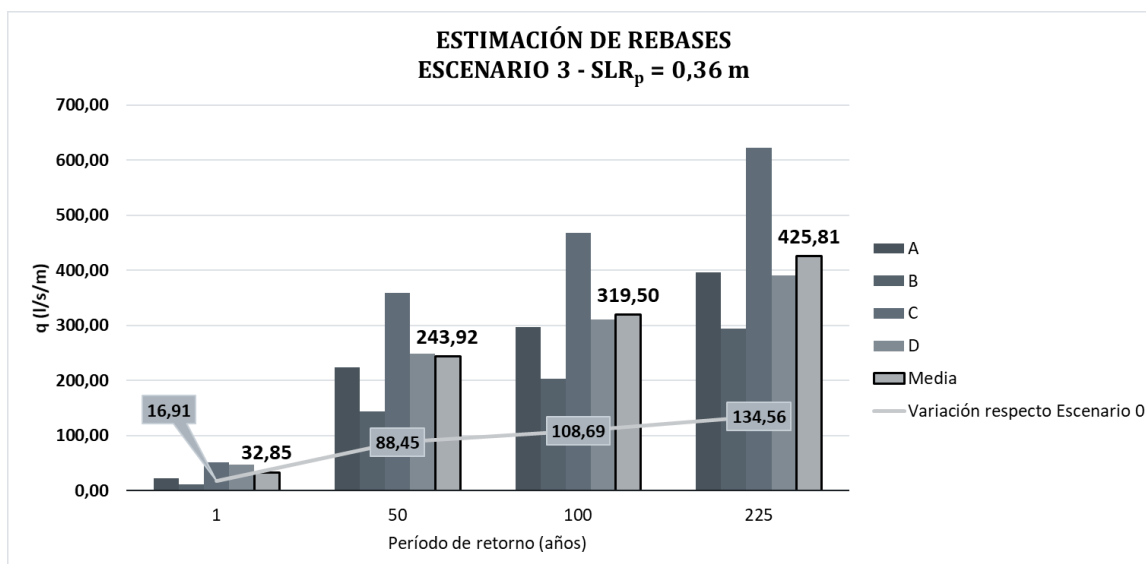


Figura 140 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 3 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0

Para el escenario 4, los rebases evaluados en cada uno de los puntos característicos que se estudiaron arrojaron valores medios de 127,40 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 563,07 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 691,10 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años y 860,97 l/s/m para un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

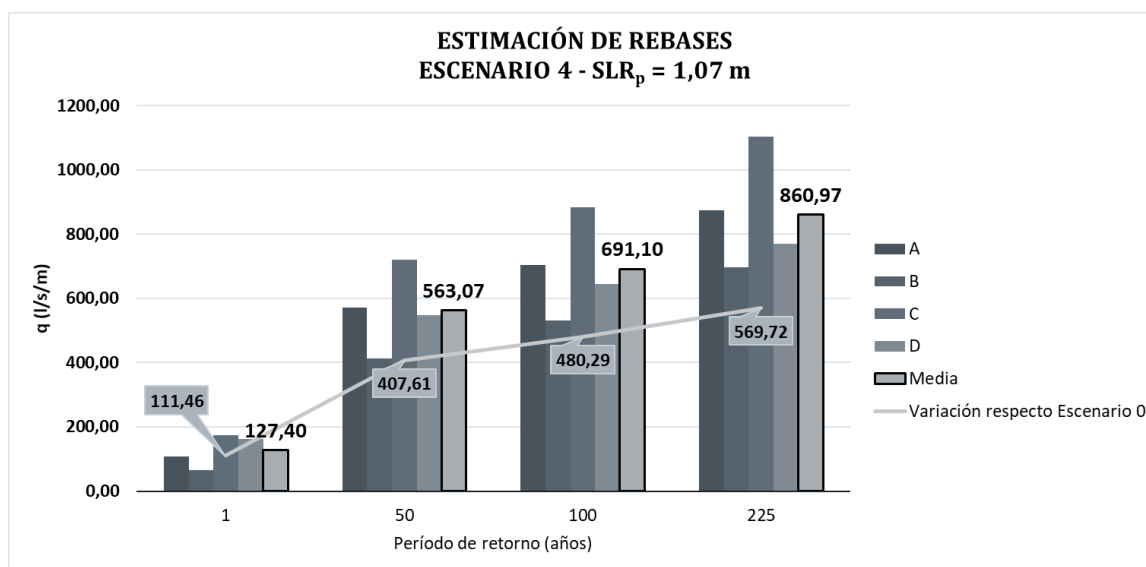


Figura 141 - Comparación de rebases para todos los puntos evaluados en función de distintos períodos de retorno y sus medias para el escenario 4 y la variación de estos con respecto de los valores para el escenario 0

Del mismo modo y para el presente escenario con respecto del escenario 0, se observan incrementos de 111,46 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año, 407,61 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, 480,29 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100

años y 569,72 l/s/m en los rebases causados por un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 225 años.

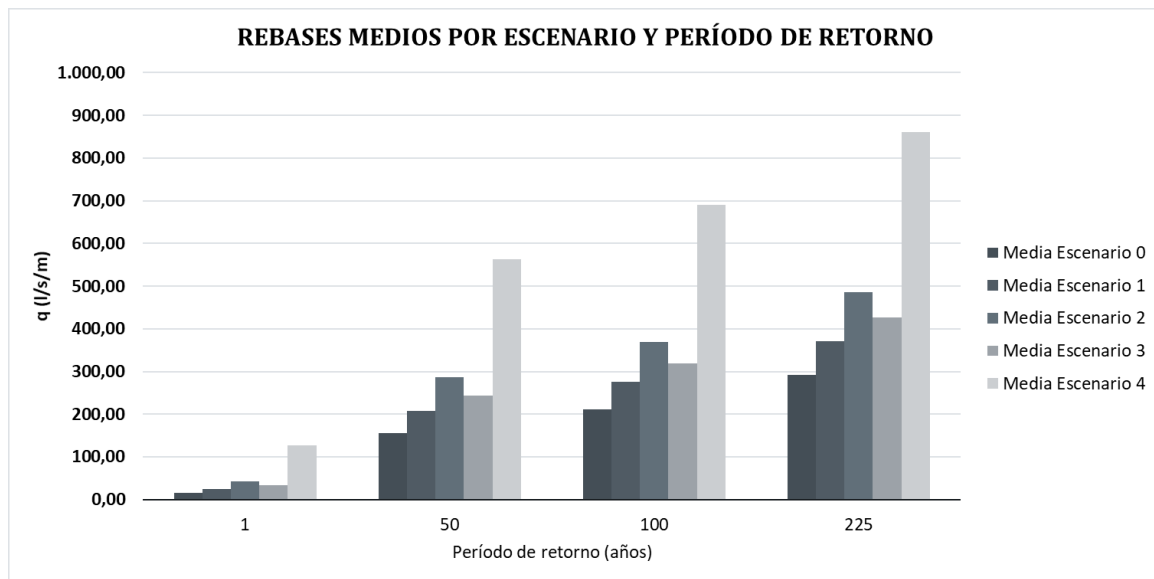


Figura 142 - Comparación de rebates medios por escenario y período de retorno

Si se observa el gráfico anterior se puede visualizar como los distintos incrementos de nivel del mar proyectados influyen en el nivel y período de retorno de los rebates. De esta forma, y considerando los escenarios proyectados menos severos, dígame 1 (+0,23 m), 2 (+0,49 m), y 3 (+0,36 m) los rebates asociados a un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 50 años, se corresponderían aproximadamente con el asociado a un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 100 años para el escenario 0 en el caso de los escenarios 1 y 3 y a un período de retorno de 225 años en el caso del escenario 2.

Atendiendo a la clasificación de los rebates en función de la seguridad estructural de las obras de abrigo del USACE (2002), los rebates asociados a un evento extremo correspondiente a un período de retorno de 1 año no serán superiores a los 50,00 l/s/m (umbral a partir del cual se producirán daños en toda la sección de los diques) para los escenarios 1 (25,37 l/s/m de media), 2 (42,43 l/s/m de media) y 3 (32,85 l/s/m de media), mientras que dicho umbral será superado en el escenario 4 (127,40 l/s/m de media).

CAPÍTULO V

V. Conclusiones

El objetivo general de la presente investigación es estudiar la influencia del incremento del nivel del mar debido al cambio climático en las obras de abrigo y atraque de los puertos de Los Ángeles y Long Beach, en California (EE. UU.). Para llevar a cabo el mismo se desarrollaron tres etapas en la metodología de investigación descrita anteriormente, a partir de las cuales se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Primero, en lo que respecta a la delimitación de la superficie en riesgo de inundación permanente y temporal en el complejo portuario, el modelo ejecutado arroja dos zonas críticas cuya elevación actualmente se encuentra por debajo del nivel medio local del mar en el ámbito de estudio. En dichas zonas se encuentran entre otras instalaciones, refinerías de petróleo, una terminal ro-ro, una planta generadora de electricidad, parte de una de las terminales de contenedores del Puerto de Long Beach, la CLB1 y una importante parte de las carreteras y vías ferroviarias que conectan todas las terminales que comprenden el entorno portuario analizado.

Según los resultados obtenidos, el incremento del nivel del mar no provocará que las aguas del puerto rebasen las instalaciones de contención dispuestas en estas zonas críticas independientemente de que los terrenos tras las mismas se encuentren a una cota por debajo de dicho nivel. Ahora bien, la presencia del Canal Domínguez en las proximidades de la zona 1 hace que esta sea susceptible a ser inundada de combinarse un fenómeno meteorológico extremo con cualquiera de los incrementos de nivel del mar modelados que provoque la inundación y posterior desborde de dicho canal debido a que de por sí constituye una zona inundable ante eventos con un período de retorno de 100 años.

En la zona 2, se observa la presencia de un muro de tablestacas, tras el cual, según se puede observar en los resultados se inicia todo un corredor fluvial que termina en los alrededores de una planta generadora de electricidad. Dicho muro corona en la actualidad a la cota +3,77 por encima del NMLM, y quedaría en el peor de los escenarios modelados con un francobordo de 1,12 metros por encima del nivel proyectado durante la PMVE y en condiciones extremas, por lo cual si se aplica por ejemplo la ecuación 7.2 del EurOtop (2018) se podrían producir rebases de 7,79 a 420,21 l/s/m a partir de alturas de ola significativa de 1 a 3 metros dentro del puerto durante estos eventos.

Segundo, atendiendo a la variación en el francobordo de los muelles que sirven a las terminales de contenedores de ambos puertos, se pudo observar que el único que no cumple para ninguno de los escenarios proyectados con la elevación deseada de 2,90 metros por

encima de la PMVE según las normativas de diseño del Puerto de Long Beach es el muelle MCLB1, el cual sirve a la terminal de contenedores CLB1 del mismo puerto, y, para el escenario más pesimista no cumple con la elevación mínima de 2 metros por encima de la PMVE, ostentando una elevación de 1,92 metros, lo cual en función de las dimensiones de la embarcación que se disponga atracar en este muelle podría dificultar esta operación y las de carga y descarga de contenedores.

Por último, los rebases en las obras de abrigo que protegen el complejo portuario actualmente se estiman en 15,94, 155,46, 210,81 y 291,25 l/s/m de media para eventos extremos con períodos de retorno de 1, 50, 100 y 225 años. Al aplicar los incrementos del nivel del mar y la correspondiente reducción en el francobordo de los diques que esto traería consigo se observan para los escenarios 1 y 3 caudales de rebase correspondientes a eventos con un período de retorno de 100 años en la actualidad con períodos de retorno de 50 años en el futuro y para el escenario 2 caudales de rebase correspondientes a eventos con un período de retorno aproximadamente de 225 años en la actualidad con períodos de retorno de 50 años en el futuro.

Por la naturaleza de estas obras de abrigo y su baja cota de coronación, estos tienden a ser rebasados con frecuencia durante eventos extremos. Como se expuso anteriormente el caudal de rebase medio para un evento extremo cuyo período de retorno sea de 1 año en la actualidad, se estimó en 15,94 l/s/m, dicho caudal según el USACE (2002), no producirá daños a la sección de estos diques, ya que fija el límite a partir del cual esto sucedería en 50,00 l/s/m. Esta limitación será superada durante eventos extremos cuyo período de retorno sea de 1 año en el escenario 4 con 127,40 l/s/m de media.

V.5.1 Futuras líneas de investigación

En lo que respecta a los efectos derivados de la influencia del cambio climático y el incremento del nivel del mar debido a este en los puertos costeros, sus obras de atraque y de abrigo como es el caso en el cual se centra este trabajo se ha investigado poco a pesar de la relevancia que tienen estas estructuras para el sustento de la economía global como se dijo anteriormente en la introducción de esta investigación.

Debido a esto y con el propósito de incrementar el conocimiento científico en estos temas, se proponen las siguientes futuras líneas de investigación:

- Estimar la energía de oleaje transmitida a través de las obras de abrigo que protegen los puertos debido al incremento del nivel del mar.
- Estudiar la influencia del incremento del nivel del mar en las operaciones portuarias de carga y descarga de buques portacontenedores.
- Aplicación de un índice de vulnerabilidad frente al incremento del nivel del mar debido al cambio climático en los puertos y sus obras de abrigo.

El presente Trabajo de Fin de Máster, comprende el **Estudio de la influencia del incremento del nivel del mar debido al cambio climático en las obras de abrigo y atraque de los puertos de Los Ángeles y Long Beach, California (EE. UU.)**, realizado por:

Autor:

De los Santos Bera, Geraldo Eduardo

Valencia, julio de 2019

CAPÍTULO VI

VI. Referencias

- 3DEP-USGS. (2016). USGS NED one meter CA LosAngeles 2016 IMG 2018 - ScienceBase-Catalog. Retrieved April 28, 2019, from <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5b909980e4b0702d0e8081f9>
- Adams, P. N., Inman, D. L., & Graham, N. E. (2008). Southern California Deep-Water Wave Climate: Characterization and Application to Coastal Processes. *Journal of Coastal Research*, 1022–1035. <https://doi.org/10.2112/07-0831.1>
- Aerts, J. C. J. H., Barnard, P. L., Botzen, W., Grifman, P., Hart, J. F., De Moel, H., ... Sadrpour, N. (2018). Pathways to resilience: adapting to sea level rise in Los Angeles. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1427(1), 1–90. <https://doi.org/10.1111/nyas.13917>
- Allan, J. C., & Komar, P. D. (2006). Climate Controls on US West Coast Erosion Processes. *Journal of Coastal Research*, 511–529. <https://doi.org/10.2112/03-0108.1>
- Alley, R. B., Clark, P. U., Huybrechts, P., & Joughin, I. (2005). Ice-Sheet and Sea-Level Changes. *Science*, 310(5747), 456 LP – 460. <https://doi.org/10.1126/science.1114613>
- Alves, J.-H. G. M. (2006). Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling*, 11(1), 98–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.11.007>
- Anthoff, D., Nicholls, R. J., & Tol, R. S. J. (2010). The economic impact of substantial sea-level rise. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(4), 321–335. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9220-7>
- BPA. (2018). Container Throughput & Statistics & Busan Port Authority. Retrieved February 21, 2019, from <http://www.busanpa.com/eng/Contents.do?mCode=MN0042>
- Broecker, W. S. (1975). Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? *Science*, 189(4201), 460 LP – 463. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.460>
- Brown, J. M., Souza, A. J., & Wolf, J. (2010). Surge modelling in the eastern Irish Sea: present and future storm impact. *Ocean Dynamics*, 60(2), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s10236-009-0248-8>
- Burcharth, H. F., Lykke Andersen, T., & Lara, J. L. (2014). Upgrade of coastal defence structures against increased loadings caused by climate change: A first methodological approach. *Coastal Engineering*, 87, 112–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.12.006>
- Caires, S., Swail, V. R., & Wang, X. L. (2006). Projection and Analysis of Extreme Wave Climate. *Journal of Climate*, 19(21), 5581–5605. <https://doi.org/10.1175/JCLI3918.1>

- Camus, P., Tomás, A., Díaz-Hernández, G., Rodríguez, B., Izaguirre, C., & Losada, I. J. (2019). Probabilistic assessment of port operation downtimes under climate change. *Coastal Engineering*, *147*, 12–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.007>
- Cayan, D. R., Bromirski, P. D., Hayhoe, K., Tyree, M., Dettinger, M. D., & Flick, R. E. (2008). Climate change projections of sea level extremes along the California coast. *Climatic Change*, *87*(1), 57–73. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9376-7>
- CDIP-SIO. (2019a). CDIP Model Forecast Socal. Retrieved May 18, 2019, from http://cdip.ucsd.edu/m/forecast/?time=2019-05-20T13:00:00Z&wave_model=socal&layer=waveHs&numcolorbands=10&palette=cdip_classic
- CDIP-SIO. (2019b). Station Data Page Home. Retrieved April 24, 2019, from http://cdip.ucsd.edu/themes/?zoom=auto&tz=UTC&r=999&un=1&pb=1&d2=p70&u2=s:215:st:1:v:type_avail
- Chapman, D. C., & Giese, G. S. (2019). Seiches. In J. K. Cochran, H. J. Bokuniewicz, & P. L. B. T.-E. of O. S. (Third E. Yager (Eds.) (pp. 656–662). Oxford: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10824-3>
- Chini, N., & Stansby, P. K. (2012). Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise. *Coastal Engineering*, *65*, 27–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.02.009>
- Church, J. A., & White, N. J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, *33*(1). <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>
- Church, J. A., & White, N. J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, *32*(4), 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>
- Claudio, F. (2016, June 10). San Pedro Breakwater Comprehensive Condition Assessment. *Ports 2016*. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784479902.025>
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London, United Kingdom: Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Cooper, H. M., Chen, Q., Fletcher, C. H., & Barbee, M. M. (2013). Assessing vulnerability due to sea-level rise in Maui, Hawai'i using LiDAR remote sensing and GIS. *Climatic Change*, *116*(3), 547–563. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0510-9>
- Daniels, R. C. (1992). Sea-Level Rise on the South Carolina Coast: Two Case Studies for 2100. *Journal of Coastal Research*, *8*(1), 56–70. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4297952>
- Davidson, O., & Metz, B. (2000). *IPCC, 2000: Informe especial del IPCC- Escenarios de emisiones: Resumen para responsables de políticas. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC*. <https://doi.org/10.1177/0022146515627849>
- Dlugokencky, E., Tans, P., & NOAA/ESRL. (2019). ESRL Global Monitoring Division - Global Greenhouse Gas Reference Network. Retrieved April 11, 2019, from https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_data.html
- Douglas, B. C. (1991). Global sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *96*(C4),

- 6981–6992. <https://doi.org/10.1029/91JC00064>
- Emanuel, K. A. (1987). The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326(6112), 483–485. <https://doi.org/10.1038/326483a0>
- Emery, K. O. (1980). Relative sea levels from tide-gauge records. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 77(12), 6968–6972. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16592929>
- Encyclopædia Britannica. (2019). Tsunami | Definition & Facts | Britannica.com. Retrieved February 24, 2019, from <https://www.britannica.com/science/tsunami/media/607892/72285>
- ESA - CMEMS. (2018). Copernicus - Marine environment monitoring service. Retrieved March 7, 2019, from http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_OMI_SL_area_averaged_mean
- Esri. (2019). ¿Qué son los datos ráster?—Ayuda | ArcGIS for Desktop. Retrieved February 26, 2019, from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Estado, M. de F.-P. del. (2001). *ROM 0.0-01. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias*. Madrid, España: Ministerio de Fomento, Puertos del Estado. Retrieved from http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM_0.0-01.pdf
- Estado, M. de F.-P. del. (2009). *ROM 1.0-09 recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo, (parte 1ª. bases y factores para el proyecto, agentes climáticos)*. Madrid, España: Puertos del Estado.
- Estado, M. de F.-P. del. (2012). *ROM 2.0-11 Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre. Criterios generales y factores de proyecto*. (P. del Estado, Ed.). Madrid, España: Puertos del Estado.
- Esteban, M., Takagi, H., & Shibayama, T. (2012). SEA LEVEL RISE AND THE INCREASE IN RUBBLE MOUND BREAKWATER DAMAGE. In *Coastal Structures 2011* (pp. 130–140). WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/doi:10.1142/9789814412216_0012
- Esteban, M., Takagi, H., Thao, N. D., & Yamamoto, L. (2015). Chapter 31 - Stability of Shallow Rubble Mound Breakwaters under Climate Change Induced Sea Level Rise. In M. Esteban, H. Takagi, & T. B. T.-H. of C. D. M. for E. and P. Shibayama (Eds.) (pp. 675–696). Boston: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801060-0.00031-9>
- Fries, A. A. (1912). Los Angeles Harbor. *Professional Memoirs, Corps of Engineers, United States Army, and Engineer Department at Large*, 4(13), 1–35. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/44535218>
- G., C. S., & A., T. J. (1990). Statistics of coastal flood prevention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, 332(1627), 457–476. <https://doi.org/10.1098/rsta.1990.0126>
- Gesch, D. B. (2009). Analysis of lidar elevation data for improved identification and delineation of lands vulnerable to sea-level rise. *Journal of Coastal Research, Special Is*, 49–58.

<https://doi.org/10.2112/SI53-006.1>

- Gilleland, E., & Katz, R. W. (2016). in2extremes: Into the R Package extremes - Extreme Value Analysis for Weather and Climate Applications. NCAR Technical Note, NCAR/TN-523+STR. Boulder, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research (NCAR). <https://doi.org/10.5065/D65T3HP2>
- Google. (2019). Google Street View. Long Beach, CA, USA: Google.
- Gornitz, V., Lebedeff, S., & Hansen, J. (1982). Global Sea Level Trend in the Past Century. *Science*, 215(4540), 1611 LP – 1614. <https://doi.org/10.1126/science.215.4540.1611>
- Gornitz, Vivien. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4), 379–398. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90173-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O)
- Graham, N. E., Cayan, D. R., Bromirski, P. D., & Flick, R. E. (2013). Multi-model projections of twenty-first century North Pacific winter wave climate under the IPCC A2 scenario. *Climate Dynamics*, 40(5), 1335–1360. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1435-8>
- Graham, N. E., & Diaz, H. F. (2001). Evidence for Intensification of North Pacific Winter Cyclones since 1948. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1869–1894. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<1869:EFIONP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<1869:EFIONP>2.3.CO;2)
- Grau, I. (2008). Avances en la construcción de diques de abrigo en España. *Libro Del III Congreso Nacional de La Asociación Técnica de Puertos y Costas.*, 60.
- Grifman, P. M., Hart, J. ., Ladwig, J., Newton-Mann, A. G., & Schulhof, M. (2013). Sea Level Rise: Vulnerability Study for the City of Los Angeles, 270.
- Guedes Soares, C., & Scotto, M. G. (2004). Application of the r largest-order statistics for long-term predictions of significant wave height. *Coastal Engineering*, 51(5), 387–394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.04.003>
- Hall, A., Berg, N., & Reich, K. (2018). *Los Angeles Summary Report. California's Fourth Climate Change Assessment. Publication number: SUM-CCCA4-2018-007.*
- Hall, J. A., Gill, S., Obeysekera, J., Sweet, W., Knuuti, K., & Marburger., J. (2016). *Regional Sea Level Scenarios for Coastal Risk Management: Managing the Uncertainty of Future Sea Level Change and Extreme Water Levels for Department of Defense Coastal Sites Worldwide.* Alexandria, VA, USA.
- Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., & Wood, R. M. (2011). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change*, 104(1), 113–137. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9978-3>
- Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., & Russell, G. (1981). Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 213(4511), 957 LP – 966. <https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957>
- Hemer, M. A., Church, J. A., & Hunter, J. R. (2010). Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. *International Journal of Climatology*, 30(4), 475–491. <https://doi.org/10.1002/joc.1900>
- Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., & Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave

- climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, 3, 471. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>
- Hemer, M. A., Katzfey, J., & Trenham, C. E. (2013). Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. *Ocean Modelling*, 70, 221–245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.09.008>
- Hennecke, W. G. (2004). GIS Modelling of Sea-Level Rise Induced Shoreline Changes Inside Coastal Re-Entrants – Two Examples from Southeastern Australia. *Natural Hazards*, 31(1), 253–276. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000020262.46491.93>
- Herron, W., Peel, K., Lillevang, O., & Dunham, J. (1986). *An Oral History of Coastal Engineering Activities in Southern California 1930-1981*. U.S. Army Corps of Engineers - Los Angeles District.
- Hoffman, J. S., Keyes, D., & Titus, J. G. (1983). *Projecting future sea level rise: methodology, estimates to the year 2100, and research needs*. United States. Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/5395742>
- Hong Kong Census and Statistics Department, S. A. R. (2018). Hong Kong Annual Digest of Statistics 2018. *Census and Statistics Department, Hong Kong*.
- Houghton, J., Izrael, Y. A., & Reinstein, R. A. (1992). *IPCC, 1992: Cambio Climático : La evaluación del IPCC de 1990 y 1992*. Retrieved from http://ipcc.ch/ipccreports/1992_IPCC_Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/Spanish/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Linden, P. J. van der, Dai, X., ... Johnson, C. A. (2001a). *IPCC, 2001: Cambio climático 2001 : Informe de síntesis Resúmenes de los Grupos de trabajo*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Linden, P. J. van der, Dai, X., ... Johnson, C. A. (2001b). *IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J., & Ephraums, J. J. (1990). *IPCC, 1990: Climate Change The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1097/MOP.0b013e3283444c89>
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., & Maskell, K. (1995). *IPCC, 1995: Segunda evaluación del Cambio Climático 1995*. Cambridge, United Kingdom.
- Hunter, J. (2012). A simple technique for estimating an allowance for uncertain sea-level rise. *Climatic Change*, 113(2), 239–252. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0332-1>
- Isobe, M. (2013). Impact of global warming on coastal structures in shallow water. *Ocean Engineering*, 71, 51–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.032>
- Izaguirre, C., Méndez, F. J., Menéndez, M., & Losada, I. J. (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophysical Research Letters*, 38(10). <https://doi.org/10.1029/2011GL047302>

- Jevrejeva, S., Grinsted, A., & Moore, J. C. (2009). Anthropogenic forcing dominates sea level rise since 1850. *Geophysical Research Letters*, 36(20). <https://doi.org/10.1029/2009GL040216>
- Jevrejeva, S., Grinsted, A., & Moore, J. C. (2014). Upper limit for sea level projections by 2100. *Environmental Research Letters*, 9(10), 104008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104008>
- Johnston, A., Slovinsky, P., & Yates, K. L. (2014). Assessing the vulnerability of coastal infrastructure to sea level rise using multi-criteria analysis in Scarborough, Maine (USA). *Ocean & Coastal Management*, 95, 176–188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.016>
- Kang-Tsung, C. (2007). *Introduction to Geographic Information Systems* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Klein, R., & J. Nicholls, R. (1999). *Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change. AMBIO A Journal of the Human Environment* (Vol. 28).
- Kopp, R. E., Hay, C. C., Little, C. M., & Mitrovica, J. X. (2015). Geographic variability of sea-level change. *Current Climate Change Reports*, 1(3), 192–204. <https://doi.org/10.7282/T37W6F4P>
- Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., ... Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2(8), 383–406. <https://doi.org/10.1002/2014EF000239>
- Kopp, R. E., Kemp, A. C., Bittermann, K., Horton, B. P., Donnelly, J. P., Gehrels, W. R., ... Rahmstorf, S. (2016). Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(11), E1434 LP-E1441. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517056113>
- LA County. (2019). LA County GIS Data Portal. Retrieved May 1, 2019, from <https://egis3.lacounty.gov/dataportal/>
- Lai, C., Nichol, M. & Inc., E. M., Priestley, N., & Martin, G. (2012). *Port of Long Beach Wharf Design Criteria* (3rd ed.). Long Beach, CA, USA: Port of Long Beach.
- Law, M., & Collins, A. (2015). *Getting to Know ArcGIS* (4th ed.). Esri Press.
- Lee, C.-E., Kim, S.-W., Park, D.-H., & Suh, K.-D. (2013). Risk assessment of wave run-up height and armor stability of inclined coastal structures subject to long-term sea level rise. *Ocean Engineering*, 71, 130–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.035>
- Li, X., Rowley, R. J., Kostelnick, J. C., Braaten, D., Meisel, J., & Hulbutta, K. (2009). GIS Analysis of Global Impacts from Sea Level Rise. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(7), 12.
- Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1975). The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the climate of a General Circulation Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(1), 3–15. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2)
- Mares Nasarre, P. (2017). Estabilidad y rebase de diques en talud con baja cota de coronación

- y rotura por fondo. Aplicación a la ampliación del puerto pesquero de Blanes, Gerona. Retrieved from <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/89955>
- McInnes, K. L., Walsh, K. J. E., Hubbert, G. D., & Beer, T. (2003). Impact of Sea-level Rise and Storm Surges on a Coastal Community. *Natural Hazards*, 30(2), 187–207. <https://doi.org/10.1023/A:1026118417752>
- McQuat, H. W. (1950). HISTORY OF LOS ANGELES HARBOR. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(1), 29. <https://doi.org/10.9753/icce.v1.29>
- Meehl, G. A., Washington, W. M., Collins, W. D., Arblaster, J. M., Hu, A., Buja, L. E., ... Teng, H. (2005). How Much More Global Warming and Sea Level Rise? *Science*, 307(5716), 1769 LP – 1772. <https://doi.org/10.1126/science.1106663>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., ... van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Méndez, F. J., Menéndez, M., Luceño, A., & Losada, I. J. (2006). Estimation of the long-term variability of extreme significant wave height using a time-dependent Peak Over Threshold (POT) model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C7). <https://doi.org/10.1029/2005JC003344>
- Menéndez, M., Méndez, F. J., Losada, I. J., & Graham, N. E. (2008). Variability of extreme wave heights in the northeast Pacific Ocean based on buoy measurements. *Geophysical Research Letters*, 35(22). <https://doi.org/10.1029/2008GL035394>
- Menéndez, M., & Woodworth, P. L. (2010). Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10). <https://doi.org/10.1029/2009JC005997>
- Mercer, J. H. (1978). West Antarctic ice sheet and CO2 greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*, 271(5643), 321–325. <https://doi.org/10.1038/271321a0>
- Mitchell, J. M. (1953). ON THE CAUSES OF INSTRUMENTALLY OBSERVED SECULAR TEMPERATURE TRENDS. *Journal of Meteorology*, 10(4), 244–261. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1953\)010<0244:OTCOIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1953)010<0244:OTCOIO>2.0.CO;2)
- Mitchell, J. M. (1971). The Effect of Atmospheric Aerosols on Climate with Special Reference to Temperature near the Earth's Surface. *Journal of Applied Meteorology*, 10(4), 703–714. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1971\)010<0703:TEOAAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1971)010<0703:TEOAAO>2.0.CO;2)
- Morrison, N. D., & Chun, J. Y. (2014). *Port of Long Beach Design Criteria Manual*. Long Beach, CA, USA: Port of Long Beach.
- Morton, I. D., Bowers, J., & Mould, G. (1997). Estimating return period wave heights and wind speeds using a seasonal point process model. *Coastal Engineering*, 31(1), 305–326. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(97\)00016-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3839(97)00016-1)
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nations, U. (2017). *Factsheet: People and Oceans*. New York, USA.

- NCEI-NOAA. (2015). Dataset Overview | National Climatic Data Center (NCDC). Retrieved April 28, 2019, from <https://www.ncei.noaa.gov/metadata/geoportal/rest/metadata/item/gov.noaa.ngdc.mgg.dem:11506/html>
- Nerem, R. S., Chambers, D. P., Choe, C., & Mitchum, G. T. (2010). Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions. *Marine Geodesy*, 33(sup1), 435–446. <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.491031>
- Nicholls, R.J., Hanson, S. E., Lowe, J. A., Warrick, R. A., Lu, X., Long, A. J., & Carter, T. R. (2011). *Constructing Sea-Level Scenarios for Impact and Adaptation Assessment of Coastal Area: A Guidance Document. Supporting Material, Intergovernmental Panel on Climate Change Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA)*.
- Nicholls, Robert J. (2002). Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(32), 1455–1466. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00090-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00090-6)
- Nicholls, Robert J., & Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328(5985), 1517 LP – 1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>
- NOAA. (2019a). Datums - NOAA Tides and Currents. Retrieved April 9, 2019, from <https://tidesandcurrents.noaa.gov/datums.html?units=1&epoch=0&id=9410660&name=Los+Angeles&state=CA>
- NOAA. (2019b). Sea Level Trends - NOAA Tides and Currents. Retrieved April 9, 2019, from https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9410660
- NOAA - LSA. (2019a). Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Level Rise. Retrieved March 7, 2019, from <https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lsa/SeaLevelRise/>
- NOAA - LSA. (2019b). Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Level Rise - Products: Global sea level time series. Retrieved March 7, 2019, from https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php
- NOAA - NHC. (2019). Storm Surge Overview. Retrieved February 24, 2019, from <https://www.nhc.noaa.gov/surge/#TIDE>
- NOAA, O. for C. M. (2017). Detailed Method for Mapping Sea Level Rise Inundation. NOAA.
- OCM-NOAA. (2018). 2018 NOAA NGS Ortho-rectified Color Mosaic of Port Los Angeles and Long Beach, CA | ID: 55017 | InPort. Retrieved June 5, 2019, from <https://inport.nmfs.noaa.gov/inport/item/55017>
- Outlaw, D. G., Durham, D. L., Chatham, C. E., & Whalin, R. W. (1977). LOS ANGELES AND LONG BEACH HARBORS MODEL STUDY. REPORT 4. MODEL DESIGN. Retrieved from <https://trid.trb.org/View/49096>
- Overeem, I., Anderson, R. S., Wobus, C. W., Clow, G. D., Urban, F. E., & Matell, N. (2011). Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <https://doi.org/10.1029/2011GL048681>
- Pachauri, R. K., Meyer, L. A., & Redacción, E. principal de (eds. . (2014). *IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al*

- Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Paolo, F. S., Fricker, H. A., & Padman, L. (2015). Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, *348*(6232), 327 LP – 331. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0940>
- Parris, A. S., Bromirski, P., Burkett, V., Cayan, D. R., Culver, M. E., Hall, J., ... Weiss, J. (2012). Global sea level rise scenarios for the United States National Climate Assessment. (N. O. and A. A. United States Climate Program Office, Ed.). U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Oceanic and Atmospheric Research, Climate Program Office. Retrieved from <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/11124>
- Peltier, W. R., & Tushingham, A. M. (1989). Global Sea Level Rise and the Greenhouse Effect: Might They Be Connected? *Science*, *244*(4906), 806 LP – 810. <https://doi.org/10.1126/science.244.4906.806>
- Pfeffer, W. T., Harper, J. T., & O'Neel, S. (2008). Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science*, *321*(5894), 1340 LP – 1343. <https://doi.org/10.1126/science.1159099>
- Plass, G. N. (1956). The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. *Tellus*, *8*(2), 140–154. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1956.tb01206.x>
- Plass, G. N. (1959). Carbon dioxide and climate. *Scientific American*, *201*(1), 41–47.
- POLA. (2018). Container Statistics | Port of Los Angeles. Retrieved December 19, 2018, from <https://www.portoflosangeles.org/business/statistics/container-statistics>
- POLA. (2019). The Port of Los Angeles: America's Port® | Port of Los Angeles. Retrieved July 10, 2019, from <https://www.portoflosangeles.org/>
- POLB. (2018). Port of Long Beach - Yearly TEUs. Retrieved December 19, 2018, from http://www.polb.com/economics/stats/yearly_teus.asp
- POLB. (2019). Port of Long Beach - Homepage. Retrieved July 10, 2019, from <http://www.polb.com/>
- POLB, P. & E. A.-. (2016). *Port of Long Beach Climate Adaptation and Coastal Resiliency Plan (CRP)*. Long Beach, CA, USA.
- PON. (2018). Statistics – Port of Nansha. Retrieved February 21, 2019, from <http://portofnansha.com/statistics/>
- Poulter, B., & Halpin, P. N. (2008). Raster modelling of coastal flooding from sea-level rise. *International Journal of Geographical Information Science*, *22*(2), 167–182. <https://doi.org/10.1080/13658810701371858>
- Rahmstorf, S. (2007). A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science*, *315*(5810), 368 LP – 370. <https://doi.org/10.1126/science.1135456>
- Reidmiller, D. R., Avery, C. W., Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Lewis, K. L. M., Maycock, T. K., ... (eds.), A. L. (2018). *USGCRP, 2018: Impactos, Riesgos, y Adaptación en los Estados Unidos: Cuarta Evaluación Nacional del Clima, Volumen II: Informe Resumido*. Washington, DC, USA.
- Röbke, B. R., & Vött, A. (2017). The tsunami phenomenon. *Progress in Oceanography*, *159*(September), 296–322. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.09.003>

- Roemmich, D. (1992). Ocean Warming and Sea Level Rise Along the Southwest U.S. Coast. *Science*, 257(5068), 373 LP – 375. <https://doi.org/10.1126/science.257.5068.373>
- Rohling, E. J., Haigh, I. D., Foster, G. L., Roberts, A. P., & Grant, K. M. (2013). A geological perspective on potential future sea-level rise. *Scientific Reports*, 3, 3461. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/srep03461>
- Rosoff, H., & Von Winterfeldt, D. (2007). A Risk and Economic Analysis of Dirty Bomb Attacks on the Ports of Los Angeles and Long Beach. *Risk Analysis*, 27(3), 533–546. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00908.x>
- Sekimoto, T., Isobe, M., Anno, K., & Nakajima, S. (2013). A new criterion and probabilistic approach to the performance assessment of coastal facilities in relation to their adaptation to global climate change. *Ocean Engineering*, 71, 113–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.01.032>
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., ... Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *Managing the Risk of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.)]. A Sp, 109–230. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0015br>
- Seymour, R. J. (2011). Evidence for Changes to the Northeast Pacific Wave Climate. *Journal of Coastal Research (JCR)*, 27(1), 194–202. Retrieved from <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00149.1>
- Sierra, J. P., Genius, A., Lionello, P., Mestres, M., Mösso, C., & Marzo, L. (2017). Modelling the impact of climate change on harbour operability: The Barcelona port case study. *Ocean Engineering*, 141, 64–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.002>
- Sierra, J. P., & Lo Presti Blanco, A. (1998). Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular. *Ingeniería Del Agua, Vol. 5, Nú.* <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2741>
- Sierra, Joan Pau, Casanovas, I., Mösso, C., Mestres, M., & Sánchez-Arcilla, A. (2016). Vulnerability of Catalan (NW Mediterranean) ports to wave overtopping due to different scenarios of sea level rise. *Regional Environmental Change*, 16(5), 1457–1468. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0879-x>
- Singapore PSA. (2018). About Us. Retrieved February 21, 2019, from <https://www.singaporepsa.com/about-us>
- SIPG. (2018). SIPG Container Throughput. Retrieved February 21, 2019, from http://www.portshanghai.com.cn/jtwbs/webpages/server_teu.html
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... Miller, H. L. (2007). *IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Solomon, Susan, Plattner, G.-K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1704 LP – 1709. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812721106>

- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. B. and P. M. M., & (eds.). (2013). *IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.Summary>
- Sweet, W. V., Horton, R., Kopp, R. E., LeGrande, A. N., & Romanou, A. (2017). Sea level rise. In D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart, & T. K. Maycock (Eds.), *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* (pp. 333–363). Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0VM49F2>
- Sweet, W. V., Kopp, R. E., Weaver, C. P., Obeysekera, J., Horton, R. M., Thieler, E. R., & Zervas, C. (2017). NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083 National Ocean Service Center for Operational Oceanographic Products and Services GLOBAL AND REGIONAL SEA LEVEL RISE SCENARIOS FOR THE UNITED STATES Center for Operational Oceanographic Products and Services National, (January). Retrieved from https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83_Global_and_Regional_SLR_Scenarios_for_the_US_final.pdf
- Tebaldi, C., Strauss, B. H., & Zervas, C. E. (2012). Modelling sea level rise impacts on storm surges along US coasts. *Environmental Research Letters*, 7(1), 14032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014032>
- Thorne, J. H., Wraithwall, J., & Franco, G. (2018). *Cambio Climático de California en 2018 - Cuarta Evaluación del Cambio Climático de California*.
- Toimil, A., Losada, I. J., Díaz-Simal, P., Izaguirre, C., & Camus, P. (2017). Multi-sectoral, high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding. *Climatic Change*, 145(3), 431–444. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2104-z>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM), EM1110-2-1100*. Washington, DC, USA: U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Congress, 101st. (1990). Public Law 101-445 101st Congress An Act, 22(1), 3096–3104.
- USACE - Los Angeles District. (2014). Port breakwater repairs underway & Los Angeles District & Los Angeles District News Stories. Retrieved March 11, 2019, from <https://www.spl.usace.army.mil/Media/News-Stories/article/547743/port-breakwater-repairs-underway/>
- USC - Digital Library. (1900). Stones of the San Pedro breakwater just after completion, ca.1900 :: California Historical Society Collection, 1860-1960. Retrieved March 11, 2019, from <http://digitallibrary.usc.edu/cdm/singleitem/collection/p15799coll65/id/18498/rec/3>
- USGCRP. (2001). *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change. Report for the US Global Change Research Program*. Cambridge, United Kingdom.
- USGS. (2016). USDA National Agriculture Imagery Program (NAIP) - ScienceBase-Catalog. Retrieved April 27, 2019, from <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/51355312e4b0e1603e4fed62>

- USGS. (2019). GIS data layers visualization. Retrieved February 26, 2019, from <https://www.usgs.gov/media/images/gis-data-layers-visualization>
- Van der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., D. R., J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., ... Zanuttigh, B. (2018). *EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Retrieved from www.overtopping-manual.com
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vellinga, P., & Klein, R. J. T. (1993). Climate change, sea level rise and integrated coastal zone management: An IPCC approach. *Ocean & Coastal Management*, 21(1), 245–268. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0964-5691\(93\)90029-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0964-5691(93)90029-X)
- Vermeer, M., & Rahmstorf, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51), 21527 LP – 21532. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907765106>
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1), 2360. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>
- Walsh, K. J. E., McInnes, K. L., & McBride, J. L. (2012). Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific — A regional assessment. *Global and Planetary Change*, 80–81, 149–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.10.006>
- Wang, X. L., Swail, V. R., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Feng, Y. (2009). Detection of external influence on trends of atmospheric storminess and northern oceans wave heights. *Climate Dynamics*, 32(2), 189–203. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0442-2>
- Wang, X. L., Zwiers, F. W., & Swail, V. R. (2004). North Atlantic Ocean Wave Climate Change Scenarios for the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 17(12), 2368–2383. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2368:NAOWCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2368:NAOWCC>2.0.CO;2)
- Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A., & Chang, H.-R. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309(5742), 1844 LP – 1846. <https://doi.org/10.1126/science.1116448>
- Wiegel, R. L. (2009). San Pedro Bay Delta, in Southern California Shore and Shore Use Changes During Past 1-1/2 Centuries from a Coastal Engineering Perspective.
- Woth, K., Weisse, R., & von Storch, H. (2006). Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics*, 56(1), 3–15. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0024-3>
- Wuebbles, D. J., Fahey, D. W., Hibbard, K. A., Deangelo, B., Doherty, S., Hayhoe, K., ... Weaver, C. P. (2017). Climate Science Special Report. *Executive Summary of the Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment*, 1, 26. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>

- Wuebbles, D. J., Fahey, D. W., Hibbard, K. A., Dokken, D. J., Stewart, B. C., & (eds.), T. K. M. (2017). *USGCRP, 2017: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>
- Xiao, Y., Fu, X., Ng, A. K. Y., & Zhang, A. (2015). Port investments on coastal and marine disasters prevention: Economic modeling and implications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 78, 202–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.04.009>
- Yang, X. (1997). GIS modeling in coastal flooding analysis: a case study in the Yellow River Delta, China. In *IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development* (Vol. 1, pp. 219–221 vol.1). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.615844>
- Yang, Z., Myers, E. P., Dhingra, E., Wong, A., & White, S. (2009). *NOAA Technical Memorandum NOS CS17 - VDatum for the coastal waters of Southern California: Tidal Datums and Sea Surface Topography*. Silver Spring, Maryland, USA.
- Young, I. R., Zieger, S., & Babanin, A. V. (2011). Global Trends in Wind Speed and Wave Height. *Science*, 332(6028), 451 LP – 455. <https://doi.org/10.1126/science.1197219>
- Zhang, K. (2011). Analysis of non-linear inundation from sea-level rise using LIDAR data: a case study for South Florida. *Climatic Change*, 106(4), 537–565. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9987-2>





Imagen cortesía del Puerto de Long Beach (POLB, 2019)