



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DEL AUMENTO DEL RIESGO FÍSICO Y SOCIOECONÓMICO ASOCIADO
AL INCREMENTO DEL NIVEL DEL MAR EN LA ZONA COSTERA DE ENSENADA, BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ

TUTOR PRINCIPAL
RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

Secretario: DRA. LILIA REYES CHÁVEZ

Vocal: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

1^{er}. Suplente: DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

2^{do}. Suplente: DR. ISMAEL DE JESÚS MARIÑO TAPIA

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM, CIUDAD DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

FIRMA

Agradecimientos

Al *Dr. Rodolfo Silva Casarín*, tutor y director de este trabajo. Gracias por tu apoyo, consejos, motivación y confianza, por siempre tomarte el tiempo para escucharme y dar pronta respuesta a mi llamado. Gracias por las oportunidades que me diste para desarrollar y mejorar mi formación académica impulsándome siempre hacia adelante.

Al *Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin*, gracias por tu tiempo, apoyo, consejos y comentarios, aprendí mucho de cada uno de ellos. Gracias por siempre “aterrizar” cada una de las ideas que componen este trabajo.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)* por la beca otorgada durante la realización de este trabajo.

A todos mis *compañeros y amigos* del grupo de Costas y Puertos, con los que coincidí en algún momento durante estos 4 años y con los que pasé momentos muy agradables. Los que me ayudaron con sus ideas y comentarios, los que me dedicaron un momento de su valioso tiempo para compartir su conocimiento conmigo. Ustedes saben quiénes son, muchas gracias por todo.

A mis *cómplices y amigos*: Anahí, Román, Ángel, Ernesto, Monse, Cesia, Dea y Rosa. Gracias a cada uno por su invaluable e incondicional ayuda, por siempre estar ahí sin importar el “topic”, por todos los buenos momentos que pasamos, por las risas y demás tonterías que hicieron de estos últimos años los más amenos del camino. Muchas gracias por su amistad.

A *Claudia*, gracias infinitas por tu apoyo incondicional durante este complicado camino, por ser mi soporte día a día e impulsarme a seguir adelante; por todos tus valiosos consejos, paciencia (mucho paciencia), comprensión, por estar ahí siempre, en las buenas, las malas y las peores. Gracias por tanto.

A mi *familia*, gracias a todos por estar siempre.

CDMX., Junio de 2018

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I: Introducción	1
Área de estudio	3
Objetivos.....	5
Síntesis del estudio	5
Capítulo II: Caracterización del riesgo en zonas costeras	7
Concepto de riesgo	7
Análisis y enfoques de evaluación.....	9
Evaluación cuantitativa del riesgo	10
Análisis de Costo-Beneficio (CBA)	10
Análisis Multi-Criterio (MCA).....	10
Modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias (SPRC)	10
Índice de vulnerabilidad costera (CVI)	12
Riesgo como probabilidad y consecuencias	22
Evaluación de la probabilidad	22
Evaluación de las consecuencias	22
Evaluación del riesgo costero en México	23
Evaluación del riesgo costero en Ensenada.....	24
Capítulo III: Variabilidad del nivel del mar.....	25
Nivel del mar	25
Variabilidad a largo plazo	25
Variabilidad estacional.....	26
Variabilidad a corto plazo	26
Marea astronómica.....	27
Oleaje y viento	29
Marea meteorológica y marea de tormenta	29
Cambio climático	32
Variabilidad del mar en Ensenada	34
Análisis del nivel del mar en Ensenada	34

Análisis de oleaje y viento en Ensenada	41
Análisis de marea de tormenta en Ensenada	48
Capítulo IV: Riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos extremos	54
Evaluación del riesgo de inundación en Ensenada	56
Simulación numérica con MIKE 21/3 FM.....	56
Módulo hidrodinámico.....	56
Módulo de oleaje.....	56
Mapas de inundación costera	60
Área norte	61
Área centro.....	63
Área sur	69
Capítulo V: Conclusiones y futuras líneas de investigación	78
Conclusiones	78
Futuras líneas de investigación	80
Bibliografía.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio.	3
Figura 2. Modelo conceptual SPRC (Modificado de FLOODsite).	11
Figura 3. Clasificación de los daños provocados al receptor (Modificado de Carmona Enríquez, 2013).	13
Figura 4. Indicadores socioeconómicos para la evaluación de riesgo por inundación en la zona costera de Alemania (Modificado de Sterr, 2008).	17
Figura 5. Modelo de Presión – Estado – Respuesta para el desarrollo de indicadores (Modificado de Bowen & Riley, 2003).	18
Figura 6. Nivel del mar durante los últimos 500,000 años, en comparación con los datos actuales (Tomado de Ballesteros-Carral, 2016).	26
Figura 7. Distribución de las fases de la marea (Tomada de NOAA, 2000).	28
Figura 8. Marea de tormenta.	30
Figura 9. Marea meteorológica según la pendiente de la plataforma continental. Con una pendiente suave, la marejada tiene mayor efecto sobre la costa (izquierda) que cuando se tiene una pendiente abrupta (derecha), en donde el agua se ve frenada por la pendiente (Tomado de COMET, sf).	31
Figura 10. Datos de nivel del mar de la serie de tiempo de la Secretaría de Marina para el periodo de 2003 a 2015. La línea punteada roja representa NBMinI establecido en cero.	34
Figura 11. Datos de nivel del mar de la serie de tiempo del Servicio Mareográfico Nacional para el periodo histórico de 1956 a 1991. La línea punteada roja representa NBMinI establecido en cero.	35
Figura 12. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de frecuencias mayores a 36 horas (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo) para el registro de la SEMAR.	36
Figura 13. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de frecuencias mayores a 36 horas (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo) para el registro del SMN.	37

Figura 14. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos de frecuencias mayores a 15 días (amarillo) para el registro de la SEMAR.	37
Figura 15. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos de frecuencias mayores a 15 días (amarillo) para el registro del SMN.....	38
Figura 16. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos con frecuencias mayores a 30 días (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo) para el registro de la SEMAR.....	38
Figura 17. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos de frecuencias mayores a 30 días (amarillo) para el registro del SMN.....	39
Figura 18. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos con frecuencias mayores a un año (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo).....	39
Figura 19. Línea de tendencia negativa para los datos de nivel del mar correspondientes al registro de la SEMAR.....	40
Figura 20. Línea de tendencia positiva para los datos de nivel del mar correspondientes al registro del SMN.	40
Figura 21. Función de distribución (probabilidad acumulada) de Hs para tormentas.	43
Figura 22. Rosa de oleaje (izquierda) y velocidad del viento (derecha) para condiciones de tormenta. *Nota: la dirección indica de donde proviene el oleaje y el viento.....	44
Figura 23. Probabilidad conjunta de altura significativa Hs, periodo pico Tp y dirección de incidencia Dir. Probabilidad conjunta Hs/Tp (izquierda) y probabilidad conjunta de Hs/Dir (derecha).....	45
Figura 24. Análisis de valores extremos para Hs asociados a periodos de retorno Tr 2, 5, 10, 25 y 50 años, por el método POT (Peak Over Threshold) pico sobre un umbral a 99.5% con la función GVE.....	46
Figura 25. Análisis de valores extremos para la velocidad del viento asociados a periodos de retorno Tr 2, 5, 10, 25 y 50 años, por el método POT (Peak Over Threshold) pico sobre un umbral a 99.5% con la función GVE.	46
Figura 26. Pacas de algodón en la playa del Hotel Riviera (A) y en la playa de la rada portuaria (B) después de la tormenta invernal de 1978.....	48

Figura 27. Mapa de pendientes para la zona costera de la Bahía de Ensenada. La pendiente va del 0 al 2%.....	49
Figura 28. Estimación de los valores de marea de tormenta en función del tiempo.....	50
Figura 29. Estimación de los valores de marea de tormenta en función de la velocidad y la dirección NW del viento.....	51
Figura 30. Coeficientes de ajuste A y B en función de la dirección NW del viento.....	51
Figura 31. Configuración topobatimétrica de la Bahía de Ensenada. Cerca del 75% del área presenta una profundidad menor a 50 m y el 25% restante forma parte del cañón submarino de la bahía.....	58
Figura 32. Topobatimetría y malla de celda triangular para la simulación en MIKE 21/3. En la línea de costa la malla se refinó hasta 5 m, mientras que en otras zonas se mantuvo en 20 m.	60
Figura 33. Secciones definidas en el área de estudio para la presentación y el análisis de los resultados de inundación.....	61
Figura 34. Área norte. Simulación de inundación para el $Tr= 2$ años en San Miguel, El Sauzal, Punta Morro y la zona norte del puerto de Ensenada.....	62
Figura 35. Mancha de inundación para un $Tr= 2$ y 50 años en la zona del fraccionamiento residencial Santorini y la franja costera frente al fraccionamiento Colinas del Mar, en el área norte de la bahía.....	63
Figura 36. Playa Hermosa. El perfil A-B muestra el nivel de inundación que alcanza y elevación topográfica con respecto al nivel cero. El nivel del mar alcanza la cota topográfica.....	64
Figura 37. Área de playa Hermosa. La mancha de inundación para el $Tr= 50$ años se extiende sobre la playa (particularmente hacia el sur de playa Todos Santos), pero se mantiene por debajo del nivel topográfico sobre el que se ubica la infraestructura habitacional.....	65
Figura 38. Comparación entre los resultados de inundación $Tr= 2$ y 50 años para las playas Corona, Nueva España y Mona Lisa. El nivel del agua alcanza la cota topográfica de 4 m con una lámina de inundación que se extiende tierra adentro para ambos periodos de retorno con profundidades menores a 0.5 m.	66
Figura 39. Perfiles A-B para las playas Corona, Nueva España y Mona Lisa para un $Tr= 2$ años. El nivel del agua alcanza la elevación topográfica de 4 m generando inundación con profundidades de hasta 1 m en las tres playas.....	66

Figura 40. Playa El Faro, resultados de inundación para un $Tr= 2$ años muestran que el nivel del agua no alcanza la cota de 4 m sobre la que se sitúa la infraestructura.	67
Figura 41. Hotel Estero Beach, el nivel del agua alcanza la cota topográfica de 3 m generando una lámina de inundación de 0.4 m para un $Tr= 2$ años.....	68
Figura 42. Mancha de inundación para la zona del hotel Estero Beach para el $Tr= 50$ años. La mancha de inundación se extiende tierra adentro con profundidades entre 0.2 y 0.6 m, siendo más crítico que para el $Tr= 2$ años.	69
Figura 43. Área sur de la bahía de Ensenada dividida en tres secciones: 1) Punta Estero, 2) infraestructura habitacional y 3) playa La Jolla.	70
Figura 44. Comparación entre condiciones normales y la mancha de inundación producto de condiciones extremas para $Tr= 2$ y 50 años. La mancha de inundación se extiende sobre la barra hasta con 1 m de profundidad.	71
Figura 45. Desarrollos turísticos sobre la barra del estero de Punta Banda. El nivel del mar genera una lámina de inundación de 1 m de profundidad, insuficiente para provocar daño a la infraestructura asentada sobre la cota topográfica de 5 m.	72
Figura 46. Lámina de inundación para eventos extremos en la barra del estero de Punta Banda. A) Punta Estero presenta el mayor potencial erosivo; B) la zona centro no se ve perjudicada debido a la topografía; y C) es el área mayormente inundada debido a las condiciones hidrodinámicas y oleaje para $Tr= 50$ años.	73
Figura 47. Playa La Jolla. El nivel del mar genera una lámina de inundación que alcanza la cota topográfica de 1 m, quedando por debajo de la cota de 2 m sobre la cual se sitúa la infraestructura.....	74
Figura 48. Comparación entre la mancha de inundación para los $Tr= 2$ y 50 años en playa La Jolla. Para 50 años la mancha de inundación sobrepasa la cota de 2 m extendiéndose tierra adentro.	74
Figura 49. Comparación entre condiciones normales y condiciones extremas $Tr= 2$ años para la zona del estero de Punta Banda. Se muestra que la mancha de inundación se extiende sobre la planicie de inundación con profundidades menores a 1 m.....	75
Figura 50. Mancha de inundación para el estero de Punta Banda, no se presenta diferencia significativa entre periodos de retorno.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Indicadores socioeconómicos dentro del modelo Fuerza motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (Modificado de Bowen & Riley, 2003).	19
Tabla II. Impactos incluidos en los escenarios de la OECD (Modificado de Hallegatte et al., 2011).	20
Tabla III. Evaluación de los diferentes métodos de evaluaciones de vulnerabilidad (Tomado de (UNFCCC, sf).	21
Tabla IV. Tabla de probabilidades direccionales y datos estadísticos de Hs para cada dirección.	44
Tabla V. Resumen de resultados para el análisis de oleaje y viento	47
Tabla VI. Valores estimados de marea de tormenta asociada a diferentes periodos de retorno.	52
Tabla VII. Datos de entrada de oleaje y viento para la simulación numérica de inundación en la Bahía de Ensenada.	58
Tabla VIII. Valores de marea meteorológica utilizados como datos de entrada para la simulación de inundación. Los máximos niveles se presentan con los vientos procedentes del NW.	58

CAPÍTULO I:

Introducción



Capítulo I: Introducción

La zona costera es la interfaz entre los tres principales sistemas naturales que hay sobre la faz de la tierra: atmósfera, océano y superficie terrestre. Los procesos que operan en estos tres sistemas son los responsables de la forma de la costa y la interacción entre los procesos de cada sistema hacen de la costa una zona extremadamente dinámica, lo que le da las características geomorfológicas que distinguen ciertas áreas en el mundo. Sin embargo, adicional a la significancia geomorfológica, la zona costera es particularmente importante desde una perspectiva humana, ya que una gran cantidad de recursos naturales y un porcentaje muy significativo de la población mundial se concentra en la zona costera (Arnott, 2009).

La zona costera es utilizada para la pesquería, el transporte, fines recreativos, disposición de aguas residuales, obtención de energía, desplante de infraestructura, entre otros usos. Muchas de estas actividades representan una amenaza para los sistemas costeros, física y biológicamente, a través de la contaminación, dragados, infiltración, sedimentación, y otras actividades que alteran la dinámica natural del sistema. Aunado a esto, los procesos naturales, frecuentemente significan un peligro para la ocupación humana y la utilización de la zona costera, a través de la acción del oleaje, la erosión, la marea por tormenta y las inundaciones, más aún si se toma en cuenta el incremento del nivel del mar producto del cambio climático.

Las inundaciones costeras son de los riesgos naturales e inducidos más comunes y mayormente distribuidos en el mundo para la vida y la propiedad, entendiendo la palabra riesgo como la probabilidad de sufrir pérdidas o daño. Las inundaciones por lo general se describen en términos de la frecuencia estadística de los fenómenos naturales que las originan, ya que las costas son afectadas mayormente por fenómenos de origen hidrometeorológico, tales como el oleaje, el viento y la marea de tormenta, causados por eventos extremos, e incremento del nivel del mar en las zonas que lo manifiesten. Estos fenómenos mencionados, comúnmente son agrupados bajo el término genérico de “peligros”. La combinación de los peligros y la vulnerabilidad del sistema dan como resultado el riesgo para una zona en específico (Nicholls et al., 1999; Balica, 2012).

En la última década, el interés por la evaluación del riesgo de inundación en zonas costeras, producto del incremento en la magnitud de los peligros naturales y la expansión de las actividades humanas en la costa se ha incrementado de manera significativa. Sin embargo, la evaluación del riesgo por inundación en zonas costeras es un problema complejo, debido a la gran variabilidad espacial de la dinámica marina, la

gama de variables que participan y su estado cambiante (Nicholls et al., 1999; McInnes et al., 2003; Balica, 2012; Villatoro et al., 2014).

Debido a la complejidad en la evaluación, los estudios de riesgo se han desarrollado bajo distintas perspectivas, utilizando diversos métodos y bajo los términos que mejor se adapten a su contexto, ya que no existe una metodología establecida o un marco conceptual que permita analizar cualquier tipo de riesgo para cualquier lugar (Carmona, 2013).

De manera general, se pueden distinguir dos aproximaciones al estudio del riesgo por inundación, la de las ciencias naturales y exactas, y la de las ciencias sociales. Desde el área de las ciencias naturales, la evaluación del riesgo posee un enfoque ingenieril, orientado al análisis de las amenazas y sus impactos, es decir, a los fenómenos hidrometeorológicos potencialmente dañinos y sus efectos (principalmente físicos) en la costa. Por su parte, las ciencias sociales se han enfocado en la capacidad de la sociedad de enfrentar, responder y adaptarse a cualquier tipo de amenaza, además asume que la vulnerabilidad de un sistema no consiste solamente en la probabilidad de un peligro. Esto explica el amplio marco conceptual del tema de riesgo, el cual se abordará a detalle en el capítulo II.

Una manera efectiva que se utiliza en ingeniería para evaluar el riesgo de inundación costera es mediante la implementación de modelos numéricos hidrodinámicos, los cuales son una herramienta útil que se ha utilizada en muchos casos de estudio para conocer el comportamiento de peligros potenciales (Bates et al., 2005; Gallien et al., 2014; Seenath, 2015; Gallien, 2016; Seenath et al., 2016).

Los modelos numéricos hidrodinámicos toman en cuenta una serie de factores físicos que influyen potencialmente en la hidrodinámica (fricción, fuerza de Coriolis, presión atmosférica, viento, oleaje, marea, barreras naturales y artificiales, etc.) y en la inundación resultante, proporcionando resultados más precisos para la evaluación del riesgo por inundación en la costa (Kantha & Clayson, 2000; Chen et al., 2011; Gallien et al., 2014).

Por lo tanto, identificar y evaluar el riesgo de inundación por eventos extremos en áreas costeras bajas es primordial para el diseño de infraestructura, gestión de emergencias y respaldar la toma de decisiones en el manejo costero. Para el manejo de la costa se requiere hacer una planeación basada en el conocimiento confiable y compartido, adoptando una perspectiva transversal y a largo plazo, involucrando a las partes interesadas y tomando en cuenta y de manera conjunta a los componentes marino y terrestre de la zona costera.

Área de estudio

En la ciudad de Ensenada ($31^{\circ} 40' - 31^{\circ} 56'N$ y $116^{\circ} 36' - 116^{\circ} 50'W$), (Figura 1) la información sobre inundaciones en la zona costera por fenómenos hidrometeorológicos extremos de origen marino es prácticamente inexistente, ya que las inundaciones registradas han sido de origen fluvial. Esta ciudad se ubica sobre la costa Noroeste de la Península de Baja California en la Bahía de Todos Santos (BTS) a 111 km al sur de la frontera México - Estados Unidos. La ciudad originalmente se construyó sobre planicies costeras y aluviales, en las cuales se asienta gran parte de la mancha urbana actual. La ciudad se divide en regiones, siendo la región norte la correspondiente a El Sauzal, la región central es el primer cuadro de la ciudad, y la región sur-suroeste es el valle de Maneadero, ex-ejido Chapultepec y el estero de Punta Banda (IMIP, 2015).

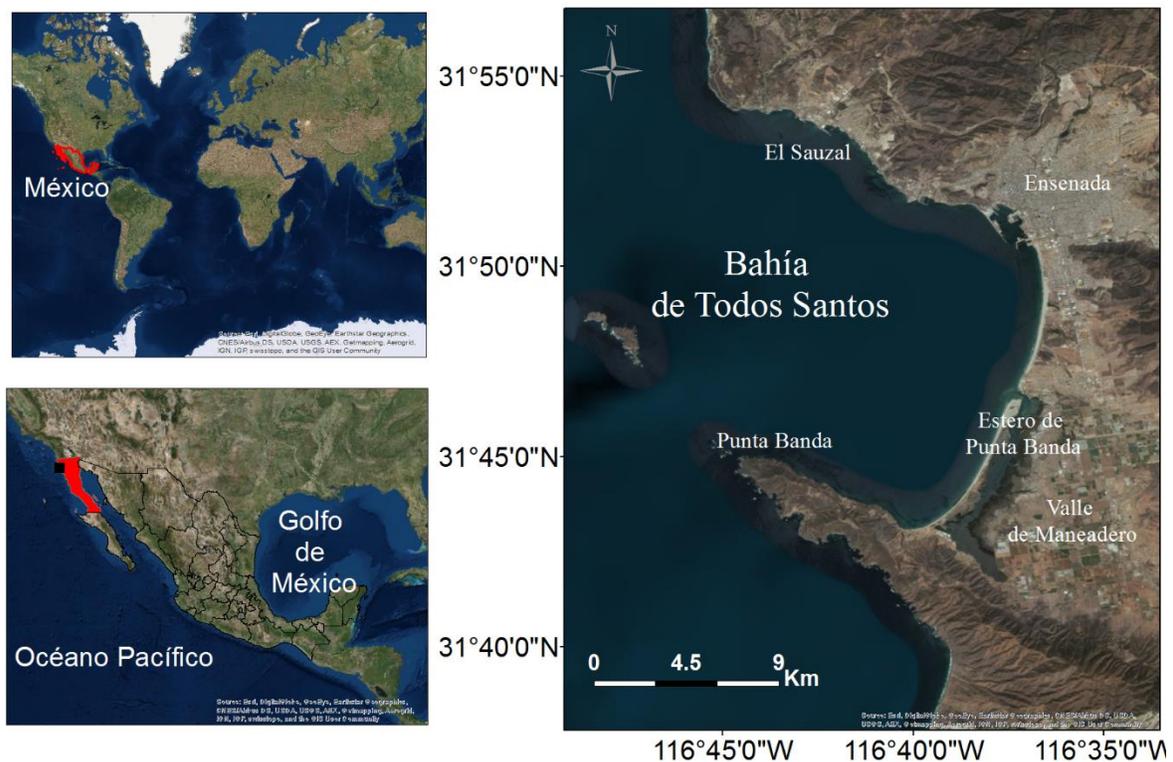


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

En el ámbito socioeconómico se puede destacar que, sobre la línea de costa de El Sauzal, el uso de suelo es habitacional e industrial, localizándose infraestructura destinada para realizar actividades productivas como la pesca y la maquila, actividades de las que depende la economía local y también influyen a la economía regional. Además, en

esta área se ubica la principal vía de conexión hacia el norte del estado, a través de la carretera escénica Tijuana – Ensenada la cual permite el ingreso de turismo, el transporte de productos dentro y fuera de la región y el transporte local. La BTS cuenta con dos puertos, el puerto de Ensenada y el puerto de El Sauzal que forman parte del Sistema Portuario Nacional y son impulsores para el desarrollo de diversas actividades industriales, comerciales, pesqueras y turísticas, en las que se estima la presencia de cuarenta y una empresas generadoras de empleos. Sus campos de influencia comercial se extienden a nivel nacional e internacional, teniendo conexión con sesenta y cuatro puertos de veintiocho países en los cinco continentes, destacando a nivel nacional los puertos de La Paz, Manzanillo, Mazatlán y Lázaro Cárdenas, y a nivel internacional los puertos de San Diego, Long Beach y Los Ángeles, Honolulu, Panamá, Yokohama y Hong Kong; reportando un movimiento portuario en contenedores de 136,719 TEUS (unidad equivalente a 20 pies, por sus siglas en inglés)(IMIP, 2015; API-Ensenada, 2017).

En el aspecto físico-ambiental una zona importante de la ciudad es el estero de Punta Banda (Figura 1), una laguna costera situada a lo largo del margen sureste de la bahía que se caracteriza por tener un canal en forma de “L” y se separa del mar por una barra arenosa que se extiende desde Punta Banda hacia el noroeste con más de 7 km de longitud, en donde se localiza un Área Natural Protegida (ANP) y varios asentamientos residenciales (CONANP, 2017; IMIP, 2015)

Sobre la franja costera sur de la ciudad se sitúa infraestructura comercial, de educación y centros turísticos, y playas de uso recreativo. Debido a que la ciudad ofrece vista al mar, se ha desarrollado un enfoque en la actividad turística que ha influido en la ocupación de esta área por viviendas residenciales y comercios turísticos. Lo anterior, y la poca disponibilidad de uso de suelo en el centro de la población, ha propiciado la especulación del suelo y costos desmedidos de los predios en la franja costera (Carmona, 2013).

Con todo lo expuesto anteriormente, es relevante evaluar los efectos que pueda tener la variabilidad del nivel del mar en la zona costera de Ensenada, estableciendo las zonas propensas a inundación, ya que el uso sostenible de la infraestructura y los recursos naturales costeros para el desarrollo económico de la ciudad, dependen en gran medida de las actividades involucradas con la franja costera.

Por lo anterior, el trabajo que se presenta tiene como finalidad evaluar el riesgo físico y socioeconómico de los impactos que pudiera provocar el incremento del nivel del mar en la zona costera de la ciudad de Ensenada, Baja California, a través de la modelación numérica de fenómenos hidrometeorológicos en condiciones extremas asociadas a diferentes periodos de retorno y mapas de riesgo de inundación.

El conocimiento generado en este trabajo permitirá el entendimiento del riesgo por inundación en la zona de estudio y reforzará la futura toma de decisiones cuando de manejo costero se trate.

Objetivos

Se plantea como objetivo principal de este trabajo, evaluar la variabilidad del nivel del mar debido a eventos hidrometeorológicos extremos en la zona costera de Ensenada, estableciendo las zonas propensas a inundación y los posibles impactos físicos y socioeconómicos consecuentes.

Como objetivos particulares se evalúa la variabilidad del nivel del mar en Ensenada considerando:

- Marea astronómica
- Incremento del nivel del mar producto del cambio climático
- Oleaje
- Viento
- Marea de tormenta

Se analizan potenciales escenarios de riesgo por inundación en la costa de Ensenada debido a los peligros de oleaje, viento y marea de tormenta, y se establecen las zonas propensas a inundación mediante mapas de peligrosidad. Por último, se analizan las zonas sujetas a inundación y se establecen recomendaciones.

Síntesis del estudio

El trabajo se organiza en cinco capítulos, los cuales se describen a continuación.

Capítulo 1: se presenta la introducción, la descripción del área de estudio, los objetivos alcanzados en el trabajo y la síntesis del estudio.

Capítulo 2: se presenta el estado del arte relacionado con el tema de riesgo costero mediante la revisión de información sobre las diferentes definiciones del mismo, modelos numéricos útiles para evaluar inundación y la importancia de la generación de mapas de riesgo para la toma de decisiones. Se expone también la información disponible para la zona de estudio.

Capítulo 3: se describen los factores propician la variabilidad del nivel del mar y por consiguiente el riesgo de inundación costera. Se describe también, la metodología utilizada para evaluar cada uno de ellos y todos en conjunto mediante análisis estadístico y probabilidad de ocurrencia. Se presentan los resultados obtenidos.

Capítulo 4: se presenta la metodología utilizada para la modelación numérica de los factores hidrometeorológicos asociados a periodos de retorno. Se exponen los resultados obtenidos mediante mapas de riesgo por inundación.

Capítulo 5: se exponen las conclusiones y se plantean futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO II:

Caracterización del riesgo en zonas costeras

Capítulo II: Caracterización del riesgo en zonas costeras

De todos los ambientes naturales y dinámicos que existen alrededor del mundo, la zona costera es uno de los más importantes y valiosos para la sociedad. Actualmente es un foco de atención para el sector habitacional y las economías nacionales e internacionales, ya que su paisaje de gran valor y la riqueza ecológica que posee son piezas fundamentales para las actividades sociales, industriales, económicas y recreativas que en ella se desarrollan (Nicholls & Lowe, 2004; Escudero et al., 2012).

En las últimas décadas las costas del mundo se han urbanizado y modificado intensamente, razón que las hace más vulnerables y las expone a diversos niveles de riesgo, ya que este incremento en la población genera intensos efectos asociados a múltiples factores en extensas áreas costeras, particularmente en aquellos asentamientos que se ubiquen en zonas bajas en donde se estima habita gran parte de la población mundial y se llevan a cabo actividades que permiten el desarrollo socioeconómico de muchos países (McGranahan 2007; UNFCCC, sf).

Debido a esto, la evaluación del riesgo ha sido un tema ampliamente estudiado en los últimos años. Sin embargo, aún no se ha establecido una metodología común que se pueda aplicar en todas las áreas costeras del mundo, ya que se ha realizado bajo distintas visiones, utilizando diversos enfoques y métodos y tomado los términos que mejor se adaptan a su contexto.

Concepto de riesgo

En la literatura especializada el término riesgo ha sido analizado desde diversos puntos de vista, como se mencionó en el párrafo anterior, basados principalmente en las necesidades que se quieran atender y evaluando los factores (económico, social, seguridad, ambiental) que se ajusten mejor a los requerimientos de cada región.

Algunos ejemplos de estas definiciones son:

- a) el riesgo involucra la “exposición a la posibilidad de daño o pérdida”, haciendo referencia a la pérdida de vidas humanas, personas afectadas, daños a propiedades e interrupción de actividades económicas, debido a un peligro en particular en un área específica y para un periodo dado. Basado en cálculos matemáticos, el riesgo es el producto del peligro y la vulnerabilidad (Brooks, 2003; United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1992).

- b) El riesgo es una medida compuesta que combina la probabilidad y magnitud de un efecto adverso (Morgan & Henrion, 2003).
- c) Riesgo = impacto de un peligro * elementos en riesgo * la vulnerabilidad de los elementos en riesgo (Kelman, 2003).
- d) Riesgo = peligro * vulnerabilidad * valor del área amenazada/capacidad de respuesta (De La Cruz-Reyna, 2003).
- e) Riesgo es la exposición de algo que posee un valor a un peligro y está relacionado frecuentemente a la probabilidad y pérdida (Smith, 2003).
- f) El riesgo también puede definirse simplemente como la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado, pero se describe mejor como la probabilidad de que un peligro contribuya a un desastre potencial. Es importante considerar la vulnerabilidad al peligro (Stenchion, 2003).
- g) Riesgo significa o hace referencia a un número esperado de vidas perdidas, personas afectadas, daños a la propiedad e interrupción de actividades económicas debido a un fenómeno natural en particular y, en consecuencia, es producto de un riesgo específico y los elementos en riesgo. El riesgo total puede expresarse en forma pseudo-matemática como: riesgo = peligro * elementos en riesgo * vulnerabilidad (Granger et al., 2003).
- h) Riesgo es la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un daño y la severidad de ese daño (Brooks, 2003).
- i) Riesgo es la probabilidad de una pérdida, y depende de tres elementos, peligro, vulnerabilidad y exposición (Crichton, 2008)
- j) Riesgo se define como una función de la probabilidad del peligro, la exposición a el peligro y la vulnerabilidad de los receptores a el peligro (Kelman, 2003).
- k) Riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un peligro, donde el peligro es igual a la amenaza potencial para las personas y su bienestar (Brooks, 2003).
- l) El riesgo es función de la probabilidad y magnitud de diferentes impactos (SO/EC, 2005).
- m) Riesgo es la probabilidad de consecuencias perjudiciales, o pérdidas esperadas (muerte, daño, propiedades, sustento, actividades económicas interrumpidas o daño al medio ambiente) resultado de la interacción entre los peligros naturales o inducidos y la vulnerabilidad (Gouldby & Samuels, 2005).

- n) Riesgo es una combinación de la posibilidad de un evento en particular, con el impacto que este evento pudiera causar si ocurriera, y tienen dos componentes: la probabilidad de que ocurra y el impacto o consecuencias que pudiera ocasionar (Wallingford, 2005).
- o) Riesgo = probabilidad * consecuencia (Bellomo, 2008; Gouldby & Samuels, 2005; Kelman, 2003; Safecoast, 2008).
- p) Riesgo es la función de la probabilidad que un evento riesgoso ocurra y las consecuencias asociadas con el evento. Prácticamente, el riesgo se conforma de cuatro principales bloques: la probabilidad del riesgo, la exposición de los elementos al riesgo, el valor de los elementos y la vulnerabilidad de los elementos al riesgo (ADAPT, 2010).

Así como hay diversos conceptos de riesgo, existen diferentes metodologías para evaluar el riesgo costero y generalmente se basan en la disponibilidad de datos y las condiciones locales de la zona a estudiar. Aunque actualmente la mayoría han evolucionado para permitir la evaluación del riesgo con mayor precisión y rigor, todavía hay muy pocos estudios que presentan metodologías viables y eficaces que conduzcan a la integración efectiva del análisis de riesgo en todos los niveles (Escudero et al., 2012; Carmona, 2013; Escudero et al., 2014).

Análisis y enfoques de evaluación

A pesar de que los términos análisis del riesgo y evaluación del riesgo, frecuentemente se utilizan como uno mismo, hay autores que los separan. Por ejemplo, FLOODsite (2007) define el análisis de riesgo como una metodología para determinar riesgo combinando la probabilidad y las consecuencias. Mientras que la evaluación del riesgo comprende el entendimiento, la evaluación y la interpretación de la percepción del riesgo y la tolerancia social, la toma de decisiones y acciones para el manejo del riesgo. El objetivo de las metodologías que evalúan el riesgo es tener una estimación del probable riesgo a futuro y proveer una visión de la distribución del riesgo y sus consecuencias, así como las causas que lo propician.

En general, las metodologías definen el riesgo en términos cualitativos o cuantitativos, siendo los cuantitativos los más precisos para determinarlo. Dentro de las metodologías cuantitativas más utilizadas se encuentra el *Análisis de Costo-Beneficio* (CBA por sus siglas en inglés), el *Análisis Multi-criterio* (MCA por sus siglas en inglés), el *Índice de Vulnerabilidad Costera* (CVI por sus siglas en inglés) y el *Modelo Fuente-Ruta-Receptor-Consecuencias* (SPRC por sus siglas en inglés); en las metodologías cualitativas se encuentra el *Análisis de preferencias reveladas* y el *Análisis de preferencias expresadas*;

metodologías como la *Matriz de riesgo*, *Riesgo costero por múltiples peligros* y *Múltiples peligros sísmico-hidrológicos* pueden ser cualitativas o cuantitativas en función de las necesidades específicas de cada evaluación (Escudero Castillo et al., 2012). A continuación, se hace una breve descripción de las metodologías cuantitativas mencionadas.

Evaluación cuantitativa del riesgo

Análisis de Costo-Beneficio (CBA)

Esta metodología se ha utilizado por más de 50 años para cuantificar en términos monetarios los costos y beneficios de propuestas viables, es decir, pretende determinar la conveniencia de la propuesta mediante la enumeración y valoración posterior en términos monetarios de todos los costos y beneficios derivados directa e indirectamente de dicha propuesta, prestando atención a la importancia y cuantificación de sus consecuencias sociales y/o económicas. Por otra parte, el CBA no considera aquellos factores que no pueden expresarse en términos pecuniarios, como cuestiones morales o vidas humanas, por lo que este tipo de gestión no ofrece un análisis completo, ya que solo controla las partes financieras del riesgo. Sin embargo, se utiliza el análisis de costo-beneficio para tomar medidas de mitigación basadas en el beneficio neto.

Análisis Multi-Criterio (MCA)

El MCA se basa en la unión de los criterios económicos, sociales y ambientales, considerándolos como un conjunto que permite hacer una estimación completa del riesgo. Cada criterio se pondera para establecer su importancia relativa dentro del análisis, considerando los factores monetarios y no monetarios, permitiendo hacer una evaluación integrada que proporciona un mejor soporte técnico para la toma de decisiones. El análisis multi-criterio ha sido utilizado por (Bana et al., 2004; Brouwer & Van Ek, 2004; Escudero et al., 2014; FLOODsite, sf), entre otros, para evaluar la dimensión económica, social y ecológica del riesgo de una forma integrada.

Modelo Fuente-Trayectoria-Receptor-Consecuencias (SPRC)

Es una metodología conceptual desarrollada recientemente para evaluar el riesgo, su aplicación permite evaluar riesgos tanto sociales como ambientales (Escudero Castillo et al., 2012). Se divide en 4 módulos, en el módulo "*fuentes*" se definen los factores climáticos que provocan la iniciación del evento: erosión, inundación o cualquier otra amenaza a la seguridad o estabilidad en la interfaz tierra-agua. Por ejemplo, la marea de tormenta, oleaje o viento. La "*trayectoria*" describe las principales variables y procesos que controlan el peligro en el camino que recorre desde la *fuentes* iniciadora del mismo hasta alcanzar al *receptor*. Incluye tanto elementos naturales como de origen

humano, como son los procesos morfológicos de inundación y aquellos relacionados con el comportamiento y modos de fallo de los sistemas de defensa (rebase, procesos de iniciación y crecimiento de fisuras o brechas, o la inundación de la zona situada atrás del sistema de defensa). El “receptor” son todas las entidades físicas expuestas a la amenaza, como la población, bienes, propiedades, infraestructura o medioambiente. En el módulo “consecuencias” se representan los efectos adversos causados al medio físico, a la sociedad, a instituciones, a la economía y al ambiente, derivados de la ocurrencia de la amenaza. Aquí se evalúan las pérdidas económicas directas e indirectas como la pérdida de empleos y los daños a infraestructura y construcciones (Figura 2).

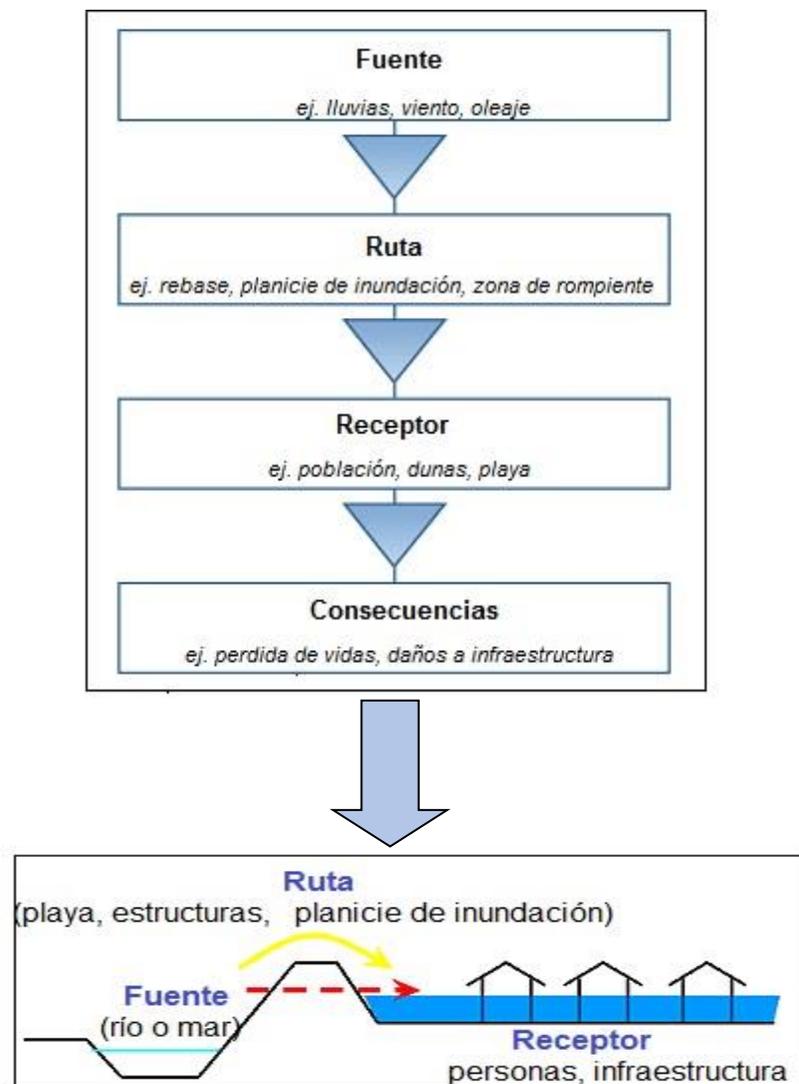


Figura 2. Modelo conceptual SPRC (Modificado de FLOODsite).

Índice de vulnerabilidad costera (CVI)

El índice de vulnerabilidad costera (CVI por sus siglas en inglés) se basa en el conjunto de factores naturales y socioeconómicos que reflejan el riesgo costero ante una amenaza específica. Este índice se ha utilizado para identificar el riesgo de inundación por eventos de incremento del nivel del mar en la costa Este y Sureste de Estados Unidos, la costa del Mar Egeo y Brasil. Para el caso de Brasil, se consideran variables socioeconómicas como población total afectada por la inundación y población afectada indirectamente, niños y ancianos afectados directamente, densidad de población, pobreza y capacidad económica gubernamental para la recuperación; cada variable tiene un peso asignado de acuerdo a su grado de dependencia el cual influye cuando se generan los índices de vulnerabilidad (FLOODsite, 2007).

Además de evaluar el aspecto ecológico, diferentes metodologías se enfocan en establecer cuáles son los aspectos socioeconómicos más relevantes al evaluar el riesgo por inundación costera, considerando como amenaza la variabilidad del nivel del mar producto de eventos extremos hidro-meteorológicos y la vulnerabilidad de la costa desde el punto de vista social.

El enfoque de la vulnerabilidad resalta la exposición a los fenómenos físicos y el contexto socioeconómico y político en donde ocurren. Mientras que los fenómenos físicos son la causa de un peligro natural, su traducción al riesgo y el potencial para el desastre depende de la exposición humana y la falta de capacidad para hacer frente a los impactos negativos que dicha exposición podría llevar a las personas o a la sociedad. Esto explica por qué los países experimentan niveles de mortalidad muy diferentes ante un peligro similar. Por ejemplo, Haití y República Dominicana comparten un perfil de riesgo similar, pero el impacto de eventos naturales entre 2000 y 2007 fue significativamente diferente, con un promedio de 121,000 personas afectadas cada año en Haití y 38,000 en República Dominicana (FLOODsite, sf).

Por lo que, planificar la reducción del riesgo y la respuesta ante él requiere comprender la vulnerabilidad en términos de identificar quién es vulnerable, en dónde se sitúa y por qué es vulnerable. Tener esta información mejora la focalización y aborda los factores clave de vulnerabilidad.

En México, un estudio de evaluación de riesgo costero realizado en dos zonas socioeconómicamente diferentes en el estado de Quintana Roo (M. Escudero et al., 2014), sirvió para identificar las variables socioeconómicas que permiten la estimación de las posibles consecuencias que traería una inundación costera. La metodología aplicada se basa en el modelo SPRC, en donde las consecuencias en el receptor fueron evaluadas en términos de pérdidas de acuerdo a la clasificación propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2008),

el cual las considera como tangibles (materiales) e intangibles (no materiales) en función de si se pueden o no evaluar monetariamente (Figura 3).

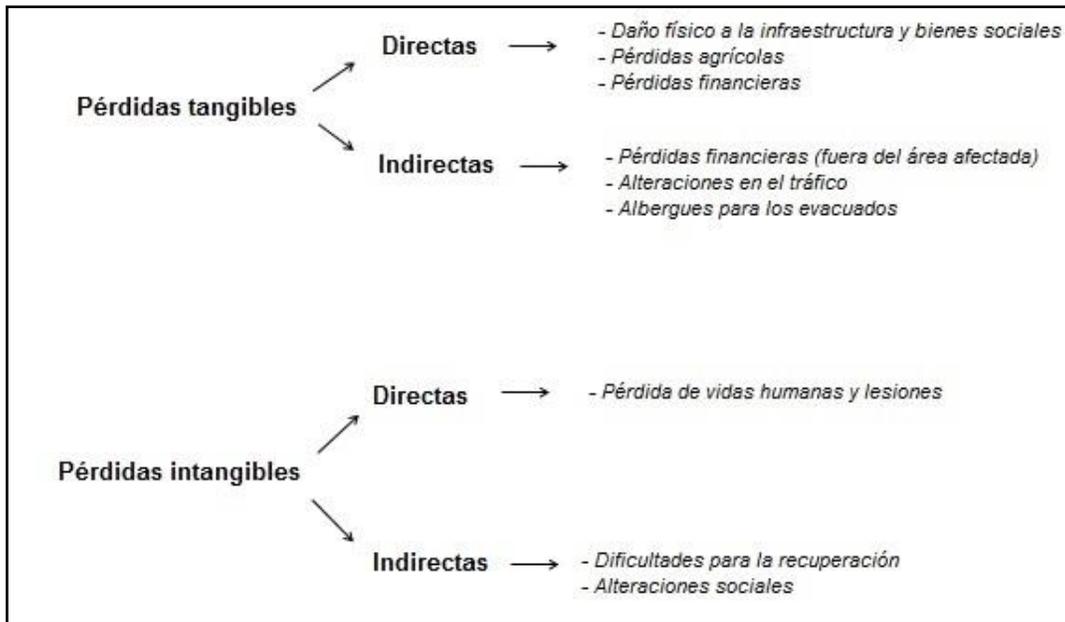


Figura 3. Clasificación de los daños provocados al receptor (Modificado de Carmona Enríquez, 2013).

Uno de los factores que debe evaluarse es el daño físico a la infraestructura y a los activos sociales, en función del uso de suelo dividido en los siguientes sectores: *residencial* (construcciones y bienes) basado en el tipo de construcción y el material del que está construido; *industrial* (construcciones y bienes industriales) se considera el número de empleados o el número de unidades económicas; *turístico* (construcciones y bienes turísticos) se define igual que el sector residencial, y las pérdidas de bienes de los hoteles se evalúan en función de su categoría, tomando en cuenta que una categoría mayor se aplica a los hoteles de mejor calidad; *otras instalaciones públicas* (construcciones y bienes públicos) hace referencia a los centros del sector educación, salud, recreativo y de ocio.

En áreas donde la actividad agrícola sea importante, se debe considerar como un factor a evaluar las pérdidas agrícolas, definidas por el valor económico de las tierras perdidas. Las pérdidas financieras tanto para el sector industrial y comercial deben evaluarse considerando la pérdida total obtenida por cada día de inactividad, para el

sector turístico se consideran las pérdidas totales cuantificadas tomando en cuenta la capacidad del hotel, la categoría y la estacionalidad.

Para estimar la pérdida de vidas humanas y lesiones debidas a la inundación se recomienda utilizar el modelo propuesto por Dassanayake et al., (2015) y la evaluación de riesgo basada en la celda de integración espacial (CRA por sus siglas en inglés) de (Burzel et al., (2012)). Los datos de entrada para estos modelos toman en cuenta las características de las personas que se encuentran en riesgo (número de habitantes, presencia de ancianos, enfermos y discapacitados, etc.), las características de la zona propensa a inundación (tipo de construcciones y la cantidad de niveles que poseen) y las características de la inundación (profundidad de inundación, velocidad de flujo y remanentes). La estimación del número de personas expuestas a la inundación en gran parte está determinada por la posibilidad de evacuación, resguardo y rescate. Es muy importante también considerar y analizar cuidadosamente cómo se puede ver afectada la salud y la moral de las personas por la variación en las características de la inundación.

Estos estudios consideran además la capacidad de recuperación después de la inundación, la cual se basa en la resiliencia del receptor ante el evento, en donde las variables que se deben considerar son la *productividad de los sectores turístico, industrial y comercial; las personas económicamente activas y las clases sociales; las características de la infraestructura y las construcciones*, por ejemplo, la capacidad de drenaje en carreteras; *problemas de salud producto de la inundación*, como las enfermedades que las personas puedan contraer por estar en contacto directo con el agua; las *fuentes de contaminación* que se deben tomar en cuenta son las zonas con incompatibilidad de usos de suelo, sitios en donde existan plantas de tratamiento de aguas negras, cementerios y zonas sin servicios de alcantarillado (Carmona Enríquez, 2013).

Sin embargo, no siempre se consideran los mismos factores socioeconómicos cuando se evalúa el riesgo, ya que éstos dependen de la zona de estudio y del efecto físico que funge como amenaza. En 2005, el huracán Katrina causó graves daños en Nueva Orleans, una ciudad ubicada en su mayoría bajo el nivel del mar y en las márgenes del lago Portchartrain. Los daños se debieron a una inundación causada por la ruptura de los diques del lago, la cual dejó cientos de muertos, cientos de miles de afectados y miles de millones de dólares como pérdida. En 2008, se realizó un estudio para evaluar el costo total que dejó Katrina en términos de producción, y posteriormente poder predecir el tiempo y el costo de la reconstrucción (Hallegatte, 2008). La metodología se basa en un modelo de Adaptación Regional de “Entradas-Salidas” (ARIO por sus siglas

en inglés), que es una poderosa herramienta para evaluar cómo el impacto sobre uno o varios sectores, se propaga en la economía de un sistema.

Cuando se hace una evaluación en términos de producción, las variables socioeconómicas que se deben considerar se pueden agrupar en 15 sectores: (1) agricultura, silvicultura, pesca y caza; (2) actividades relacionadas a la minería; (3) utilidades/bienes; (4) construcción; (5) manufactura; (6) comercio por mayoreo; (7) comercio por menudeo; (8) transportación y almacenamiento; (9) turismo; (10) finanzas, aseguradoras, inmobiliarias y arrendadoras; (11) servicios profesionales y empresariales; (12) servicios de educación, salud y asistencia social; (13) arte, entretenimiento, recreación, alojamiento y servicios de alimentación; (14) otros servicios, con excepción de gobierno; y (15) servicios de gobierno.

Estos sectores son la base económica que permitirá evaluar los daños causados a la producción, empleos (el modelo asume que es proporcional a la producción de cada sector), precios y ganancias (los desastres naturales conducen a la inflación) y la exportación e importación de bienes (en las zonas afectadas incrementan sus importaciones y decrecen las exportaciones). Es importante destacar que estos sectores sirven como base para distinguir entre los que producen bienes y servicios que pueden ser importados y los que se producen localmente, con la finalidad de hacer una evaluación que considere los costos extras que pudieran generarse. Los sectores: utilidades, construcción, comercio por menudeo, y transportación y almacenamiento, no pueden separarse.

Las ciudades costeras situadas en zonas bajas dejan a su población y a sus bienes potencialmente expuestos a las inundaciones, como es el caso de la ciudad de Copenhague, que posee la cota de elevación más alta a 45 m sobre el nivel del mar. A pesar de que Copenhague es una ciudad protegida y con planes de adaptación ante eventos que pudieran provocar inundaciones, en 2011 se llevó a cabo un estudio para evaluar las pérdidas económicas a escala local que se pudieran derivar de una inundación debida al incremento del nivel del mar y la marea de tormenta, además de los beneficios de la adaptación, ya que, en ausencia de protección, las pérdidas potenciales se pueden incrementar significativamente con el tiempo (Hallegatte, Ranger, et al., 2011). La metodología usada también se basa en el modelo ARIIO, pero se consideran únicamente 8 sectores económicos relevantes para la localidad: (1) agricultura, pesca y extracción; (2) manufactura; (3) suministros de agua, gas y electricidad; (4) construcción (residencial, industrial, turística); (5) comercio por mayoreo y menudeo, hoteles, restaurantes; (6) transporte, servicio postal y de telecomunicación; (7) actividades financieras y empresariales; y (8) servicios públicos.

Aunque no se menciona dentro de los sectores, un factor importante a considerar es si las construcciones y/o propiedades están o no aseguradas, ya que de no contar con un seguro que los respalde, el costo recaerá sobre los involucrados en cada sector, por ejemplo, los daños a las construcciones residenciales afectan solamente a las familias que las poseen, pero las pérdidas industriales afectan a los sectores 2, 3, 4 y 6; y las pérdidas comerciales afectan a los sectores 5, 7 y 8. El daño al sector de la construcción podría provocar la pérdida de miles de empleos, pero a su vez, generaría miles de nuevos empleos dedicados a la reconstrucción. En este trabajo no se consideran, pero no dejan de ser importantes los aspectos sociales como enfermedades causadas por el evento, accidentes, traumas psicológicos y pérdida de herencia cultural.

En 2008, se llevó a cabo una evaluación del riesgo en la costa de Alemania debido al incremento del nivel del mar, en donde se considera que los factores socioeconómicos relevantes a evaluar son los patrones sociodemográficos, como la distribución de la población costera; el uso actual de los recursos económicos y el probable desarrollo económico; los patrones en el uso del suelo; la infraestructura y otros activos económicos; los activos culturales e institucionales; el capital acumulado y el valor ecológico que se encuentre en riesgo (Figura 4).

En un estudio de evaluación del riesgo costero es importante desarrollar indicadores de susceptibilidad en los que se incluyan las características de la población (como la densidad de población y la edad de los habitantes), además de evaluar la capacidad de adaptación en tres sectores: económico, infraestructura e institucional y considerar siete categorías de adaptación: autonomía financiera, cobertura de áreas verdes, servicios médicos, accesibilidad al agua, nivel de conciencia antes el problema, capacidad del gobierno, y capacidad institucional. En zonas donde lo amerite, se debe considerar también la agricultura (Yoo et al., 2011).

Un indicador exitoso deberá reducir el número de mediciones y simplificar el proceso de comunicación entre los administradores, los interesados y la comunidad, de manera tal que contribuyan al proceso de una planificación estratégica (Bowen & Riley, 2003). Algunos modelos que se pueden utilizar para seleccionar indicadores socioeconómicos son el modelo "Presión-Estado-Respuesta" y el modelo "Fuerza motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta".

La OECD creó el modelo Presión-Estado-Respuesta en 1993 para modelar las causas y los efectos de la relación entre los humanos y el medio ambiente (Figura 5). Este modelo es un ejemplo de un marco común para evaluar la presión que causan las actividades humanas en el medio ambiente, las condiciones del ambiente y la respuesta de la sociedad ante ello.

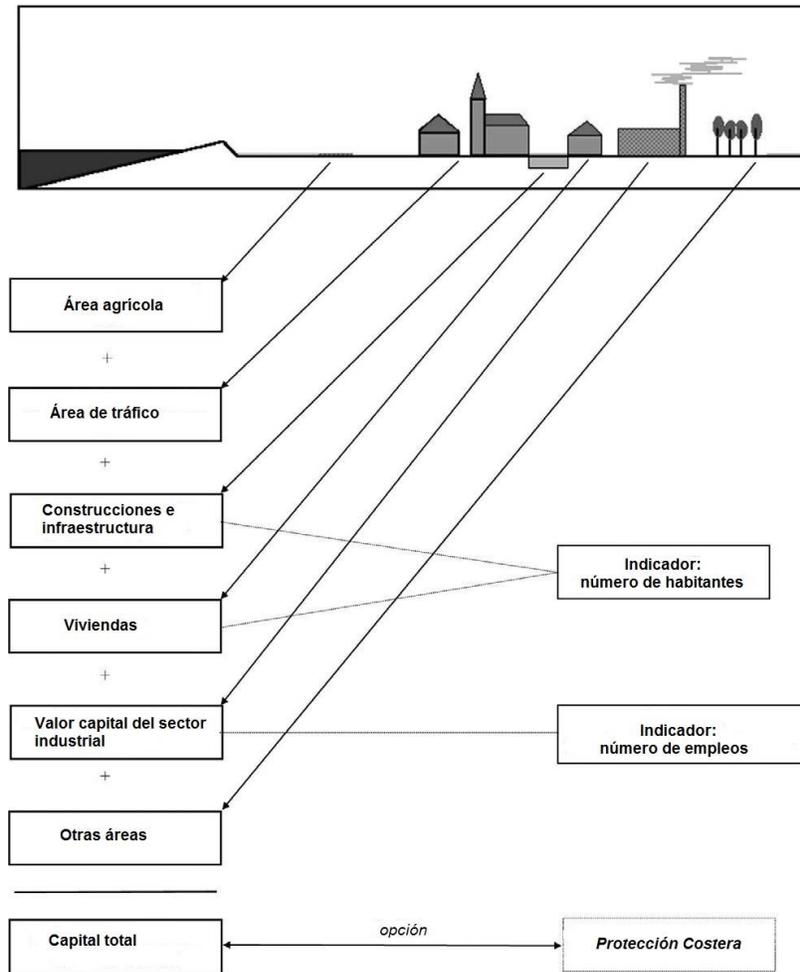


Figura 4. Indicadores socioeconómicos para la evaluación de riesgo por inundación en la zona costera de Alemania (Modificado de Sterr, 2008).

Por lo tanto, es un modelo útil para desarrollar indicadores sociales, económicos o ecológicos, los cuales dependerán de los objetivos planteados. Sin embargo, sus limitaciones conceptuales son importantes, ya que describe un sistema demasiado simple y demasiado limitado.

En el modelo Fuerza motriz – Presión – Estado - Impacto-Respuesta (F-P-E-I-R), los indicadores de la *fuerza motriz* describen a gran escala las condiciones socioeconómicas y las tendencias sectoriales, como los patrones de uso de suelo en la costa y el crecimiento y desarrollo del sector industrial costero. Los indicadores de *presión*, describen los factores que tienen la capacidad de influir en el entorno costero, como los patrones de alteración en los humedales costeros, la industria y el uso de

fertilizantes. Los indicadores de *estado*, describen los cambios que se observan en la dinámica ecológica de la costa y la describen en función del desarrollo sostenible.

Los indicadores de *impacto*, son los cambios medidos en el estado y que provocan efectos adversos tales como enfermedades, pérdida de zonas de recreación o pérdidas en la pesca comercial debido a contaminantes. Los indicadores de *respuesta* se describen como la respuesta institucional a los cambios en el sistema (Tabla I).

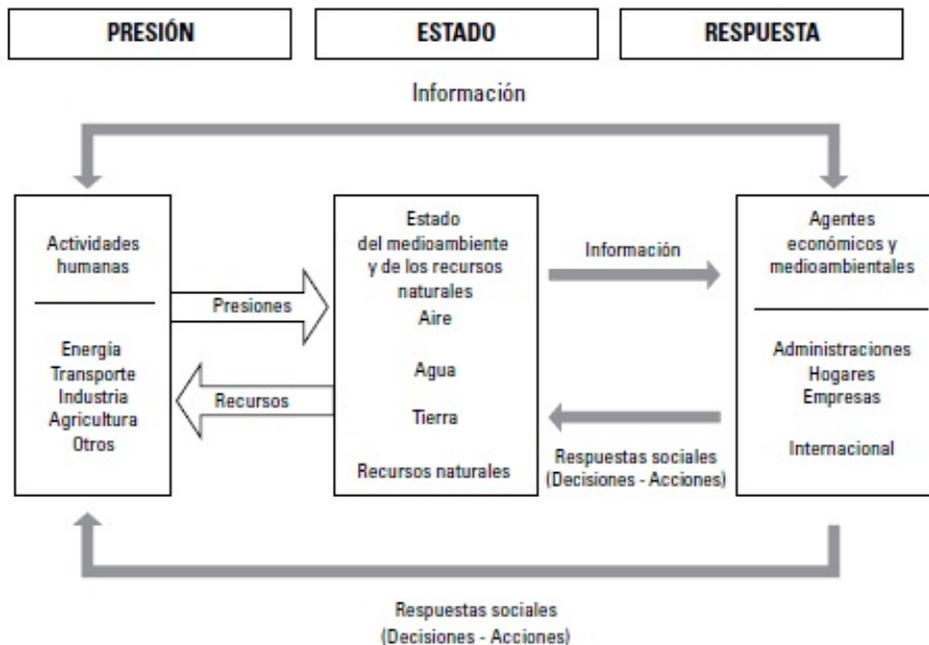


Figura 5. Modelo de Presión – Estado – Respuesta para el desarrollo de indicadores (Modificado de Bowen & Riley, 2003).

Una guía metodológica de evaluación frente al cambio climático y sus efectos como es la inundación en las costas, debe abordar diferentes escenarios que describan la zona de estudio en términos de demografía, tecnología y economía como la desarrollada por Hallegatte et al., (2011) basada en los escenarios propuestos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés) y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Estos escenarios sirven de base para modelar tres situaciones de riesgo: sin planes de adaptación, con planes de adaptación deficientes y con planes de adaptación adecuados. Adicional a esto, la subsidencia inducida por las actividades humanas es un factor

importante que se debe considerar y que depende en parte del agua extraída y de dónde se extrae. Si el agua se extrae de la zona urbana la subsidencia incrementa.

Tabla I. Indicadores socioeconómicos dentro del modelo Fuerza motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (Modificado de Bowen & Riley, 2003).

	Fuente motriz/Estado	Presión	Impacto
Dinámica poblacional	Total de la población costera. Uso de suelo y cobertura. Patrones de zonación.		
Condiciones económicas	Valoración anual del PIB medio ambiental ajustado al PIN doméstico. Valor y empleos de la industria costera.		
Condiciones sociales y tradiciones culturales	% de la población con agua potable. Estabilidad e integridad cultural.		Conflictos entre los usuarios.
Desarrollo/Construcción		% de tierra alterada/afectada. Tierra permeable que fue rellenada (Ha/año).	Costo de la inundación. Amenazas y economía proveniente del hábitat costero. Costos de dragado impulsado por la contaminación de sedimentos.
Cambio en el hábitat/Valor ecológico		Valor de los productos manufacturados por hábitat. Valor de los servicios del hábitat costero.	Costo social por especies invasivas. Cambio en el valor de los servicios por alteraciones del hábitat.
Contaminantes		% de la población que cuenta con el tratamiento de aguas residuales. Uso de fertilizantes en cuencas costeras. Industria y el uso de metales.	% de áreas de recolección bajo restricciones ambientales.
Actividades de extracción de recursos		Tuberías para la extracción y transportación de petróleo. Pesquería comercial. Patrones de	Cambios en el valor de la comida proveniente del mar por el riesgo de un hábitat alterado.

	consumo de alimentos provenientes del mar.	
Actividades humanas	Acuicultura y asistencia por parte de la población a las playas.	Enfermedades causadas por vectores. Costos por el cierre de playas.

Bajo esta metodología, las consecuencias socioeconómicas se pueden dividir en dos grupos: las que generan impactos en el mercado, que directamente afectan la economía, y las que no impactan en el mercado, las cuales afectan a los humanos y al ambiente (Tabla II).

Tabla II. Impactos incluidos en los escenarios de la OECD (Modificado de Hallegatte et al., 2011).

Impactos	Directos	Indirectos
Monetarios	Decremento/incremento en el consumo de energía debido a la demanda de refrigeración o calefacción.	Pérdidas económicas provenientes de la actividad turística. Caída en la productividad de los trabajadores debido a problemas de salud. Alteraciones sociales. Efectos a largo plazo en el desarrollo económico.
No monetarios	Incremento en la mortalidad debido al desarrollo de enfermedades transmitidas por vectores. Población en riesgo.	Pérdida de cultura, migración. Desigualdad en la seguridad, conflictos de estado.

Los impactos monetarios son aquellos que tienen un precio y que permiten una evaluación indiscutible en el aspecto financiero, de modo que estos factores se evalúan principalmente en el dominio técnico y no en el dominio ético. Por otro lado, los no monetarios afectan a bienes y servicios los cuales no tienen un precio establecido en el mercado, por ejemplo, la salud de las personas y los impactos al ecosistema. Sin embargo, para comprender los impactos en la salud, muchos estudios utilizan el método del *Valor de una Vida Estadística* (VSL por sus siglas en inglés). El VSL se puede estimar a través de pruebas sobre las decisiones que toman las personas, por ejemplo, fumar un cigarro o conducir un coche. También puede obtenerse por medio de

encuestas aplicadas a las personas, en donde se les pregunta la disponibilidad que tienen a pagar para evitar riesgos en su vida. Los análisis sugieren que la estimación del VSL depende de la edad, el género, la educación, la salud, etc., de los encuestados, tipo de riesgo al que se someten y la estimación misma del método.

El Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud a veces utilizan indicadores de riesgo tales como el “DALYs” o Años de vida ajustados por discapacidad para integrar en un único indicador la duración de la vida y su calidad. Este indicador utiliza los años de vida perdidos por muertes prematuras y la fracción de los años de vida sana perdidos como consecuencia de una enfermedad o discapacidad para medir la magnitud del daño. Para evaluar los daños no monetarios frecuentemente se utilizan indicadores como el número de vidas en riesgo, calidad de vida, pérdida de paisajes con valor cultural, desigualdad social.

En general, varios instrumentos de evaluación están disponibles para cada paso y/o pregunta producida en cualquier marco de evaluación. Hay cinco modelos de evaluación que son los más utilizados, sin embargo, como cualquier modelo tienen ventajas y desventajas que al analizarlas permiten elegir el de mayor conveniencia (Tabla III).

Tabla III. Evaluación de los diferentes métodos de evaluaciones de vulnerabilidad (Tomado de (UNFCCC, sf).

Método	Ventajas	Desventajas
Common Methodology (IPCC, 1992)	Estructura lógica prescrita; se presta para producir resultados consistentes; útil para un agregado global; ampliamente utilizada	Inflexible; evaluación de exposición al estrés y de sensibilidad, pero no evaluación de vulnerabilidad completa; opciones de adaptación insuficientemente desarrolladas
U.S. Country Studies Methodology (Leatherman and Yohe, 1996)	Enfoque del manual	Dirigidos sólo a impactos de pérdida de tierra; evaluación de exposición al estrés y de sensibilidad, pero no evaluación de vulnerabilidad completa
UNEP Handbook Methodology (Klein and Nicholls, 1998, 1999)	Buena base conceptual; todos los impactos son considerados; provee pautas sobre posibles herramientas de evaluación.	Aún no ha sido ampliamente probado
South Pacific Island Methodology (Yamada et al., 1995)	Útil en áreas con datos limitados; conceptualiza la vulnerabilidad en elementos cuantificables.	Los resultados son cualitativos a semicualitativos.

RIKS Decision Support Methodology (Engelen et al., 1993, 1996; White et al., 2000; de Kok et al., 2001)	Considera sistemas costeros completos, y las interacciones pueden ser especificadas como se desee.	El enfoque se puede convertir en una caja negra; asume una alta capacidad técnica.
--	--	--

Riesgo como probabilidad y consecuencias

Evaluación de la probabilidad

La probabilidad hace referencia al peligro o probabilidad de ocurrencia de un evento que puede provocar daño. Su análisis suele ofrecer una estimación de la extensión e intensidad de los parámetros que definen el peligro (altura de inundación o erosión), para varios escenarios de riesgo y su probabilidad asociada.

El análisis incluye la realización de estudios hidrometeorológicos e hidráulicos, con frecuencia apoyados en modelos numéricos que permiten reproducir y simular los principales procesos de cada escenario de riesgo. En la aplicación de la metodología del modelo SPRC, el peligro sobre el *receptor* es representado por el análisis de las *fuentes* y la *trayectoria*. El análisis de las *fuentes* de peligro se logra mediante modelos como “WAVEWATCH III model” (Tolman, 2014), “HURAC” o “WAM” (Silva et al., 2007) los cuales permiten obtener las características del oleaje a partir de datos de viento a una determinada distancia de la costa de interés.

Los modelos numéricos que pueden ayudar a caracterizar elementos *trayectoria* son los modelos hidrodinámicos como “Delft3D” (Deltares Research Institute, 2017), “Ref/Dif” (Kirby & Dalrymple, 1994), “WAPO” (Silva et al., 2005) y MIKE 21 (DHI Water & Environment, 2017); algunos como el *modelo de circulación avanzada* (ADCIRC por sus siglas en inglés) y el *sistema de modelación regional del océano* (ROMS por sus siglas en inglés) permiten simular la dinámica y el balance de sedimentos cerca de la costa (Snoussi et al., 2008); modelos de evolución de la morfología costera como “GEOMBEST” (Stolper, List, & Thieler, 2005); modelos hidrodinámicos y morfodinámicos como “XBEACH” (Roelvink et al., 2010); o modelos de inundación como “Sobek 1D2D” (Dhondia & Stelling, 2010) o “Kalypso-RMA” (Schrage et al., 2009).

Evaluación de las consecuencias

Las consecuencias de la ocurrencia de un peligro sobre el *receptor*, o entidades físicas expuestas a la amenaza, generalmente se evalúan en términos de daños o pérdidas e incluye la evaluación de la vulnerabilidad del *receptor*. Los daños o pérdidas se evalúan en función de si los daños son tangibles o intangibles, dependiendo si pueden ser o no evaluadas en términos monetarios. Pérdidas directas son aquellas que ocurren por el

contacto físico del agua producto de la inundación; mientras que los daños indirectos son inducidos por los impactos directos dentro o fuera del área inundada (Dassanayake et al., 2012; Dassanayake et al., 2015).

Evaluación del riesgo costero en México

En México se ha carecido de una cultura de prevención y se ha optado por la atención de las emergencias, ya que la planeación en las zonas costeras del país es relativamente reciente y obedece al creciente desarrollo económico en esta zona. Sin embargo, se han realizado estudios para evaluar el riesgo costero asociado al aumento del nivel del mar en algunos estados del país. Varios de estos estudios están publicados en el libro “Cambio Climático en México: un enfoque costero y marino” en donde se abordan perspectivas culturales y ecológicas, así como propuestas de series de indicadores que describen factores fisiográficos y socioeconómicos para evaluar la vulnerabilidad y gestión del riesgo por inundaciones en los municipios costeros del país. Además, se presenta un estudio de la vulnerabilidad en la zona costera del Golfo de México ante el aumento del nivel del mar, en donde se toma en cuenta el porcentaje del territorio afectado para cada tipo de vegetación y uso de suelo en la costa, se clasifica el litoral en función del tipo de costa transgresiva o regresiva y se describen las características fisiográficas (Rivera-Arriaga et al., 2010).

En otro estudio se analizan las tendencias regionales de la variación del nivel del mar en México y se presentan algunas series de tiempo de datos disponibles en el país, las cuales resultan ser cortas comparadas con las de otros países del mundo. También se discute la importancia que tienen los efectos tectónicos para la determinación de la tasa de cambio del nivel del mar, ya que lugares como la franja costera de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, presentan aumento nulo del nivel del mar debido al levantamiento cosísmico periódico que ocurre en la región (Ortíz-Figueroa & González-Navarro, 2008).

En 2005 se creó el “Programa de Cambio Climático”, en el cual se incorporan estrategias específicas para enfrentar el cambio climático dentro de la política. Posteriormente, en 2007 se creó la “Estrategia Nacional de Cambio Climático” en el cual se planteó que los estados de la república deben crear sus propios programas para evaluar las consecuencias del cambio climático y elaborar sus propias líneas de acción ante el riesgo costero.

Evaluación del riesgo costero en Ensenada

Particularmente, para la ciudad de Ensenada, se ha evaluado el riesgo por inundación y el efecto erosivo debido al aumento del nivel del mar en la franja de playa arenosa ubicada en el centro de la bahía. El método que se siguió fue el cálculo del retroceso de la línea de costa utilizando una adaptación a la Regla de Bruun, mostrando como resultados un retroceso máximo de la línea de costa de 203.2 m para el año 2100, considerando un aumento del nivel del mar de 1.5 m. Se establece que las zonas de playa con poca altura como El Ciprés y Coronitas podrían ser susceptibles a inundación (Montoya & Gómez-Morín, 1991). Otro estudio realizado evalúa el riesgo de inundación debido a las variaciones del nivel del mar a través de un marco conceptual integral (Carmona Enríquez, 2013). Sin embargo, este tipo de aproximaciones tienen algunas deficiencias de tipo fundamental, ya que los métodos utilizados, en la mayoría de las ocasiones, no considera aspectos como la variación del relieve y efectos de transformación que el oleaje sufre durante su aproximación a la costa.

Mayormente, los estudios realizados en la zona de estudio han sido por el lado de las propuestas de manejo de erosión (Peynador & Méndez-Sánchez, 2010) considerando balance sedimentario, y estudios de retroceso de la línea de costa (Delgado et al., 2005) mediante imágenes aéreas y de satélite.

Cabe mencionar que la ciudad de Ensenada cuenta con un Atlas de riesgos naturales, el cual fue desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) en 2012. Aunque, los autores hacen hincapié en que la falta de información y datos debidamente registrados y georreferenciados fue el principal obstáculo para realizar el Atlas. En este Atlas se abordan, entre otros, los riesgos, peligros y/o vulnerabilidad ante fenómenos de origen hidrometeorológico, considerando a las inundaciones como el segundo riesgo que más afecta a las personas y a la infraestructura del municipio (UABC & IIO, 2012). Las inundaciones manifestadas son principalmente originadas por lluvias de tormentas invernales o por las lluvias de huracanes y tormentas tropicales históricas, y avenidas de caudal brusco en arroyos como San Miguel, al norte de la ciudad. Es decir, los registros disponibles corresponden a inundaciones de origen pluvial y fluvial, más no de origen marino.

CAPÍTULO III:

Variabilidad del nivel del mar

Capítulo III: Variabilidad del nivel del mar

Nivel del mar

Según el Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar (PSMSL por sus siglas en inglés), el nivel medio del mar (NMM) se define como el nivel de aguas tranquilas del mar promediado durante un periodo determinado de tiempo, en donde los efectos provocados por la marea y por otras causas frecuentes como las olas, quedan compensados (Pons, 2009).

El NMM está basado en valores horarios tomados durante un periodo de tiempo no inferior a un año, sin embargo, para efectos geodésicos se requiere un registro de largo periodo que permita establecer un patrón definido de acuerdo con su frecuencia. La medición del NMM es aplicable a temas prácticos como la construcción de infraestructura costera, el transporte marino, y el riesgo costero por inundación, es también un indicador importante del cambio climático y los procesos relacionados, como el derretimiento glacial y la expansión térmica (Cadena, 2012).

Hay un gran número de causas que ocasionan cambios en el nivel del mar, las cuales varían en términos de su magnitud y la escala de tiempo sobre la cual operan. Conceptualmente podemos pensar en el NMM como un promedio del nivel del mar en un punto a lo largo de la costa o en mar abierto, y sus fluctuaciones debido a las mareas, las condiciones meteorológicas, las variaciones a corto plazo en la temperatura del océano y las corrientes. A mediano y largo plazo, los cambios en el NMM pueden ocurrir debido a la subsidencia de la tierra o cambios en el nivel mismo del mar producto de cambios en el volumen de agua.

La variabilidad del NMM ocurre en diferentes escalas espacio-temporales e influencia de diferentes formas a la costa. Una forma de clasificar la variabilidad del nivel del mar en la escala del tiempo, es mediante el periodo de duración, de manera que se distinguen variaciones a largo plazo, variaciones estacionales y variaciones a corto plazo.

Variabilidad a largo plazo

A lo largo de la historia de la Tierra, el nivel del mar ha sufrido grandes cambios con oscilaciones de más de 100 m debidas a los ciclos glaciares (Figura 6). Estas variaciones del nivel del mar son resultado de las variaciones de la radiación solar en la superficie de la Tierra y la concentración de gases de efecto invernadero, además de la expansión

térmica y los cambios en la masa de agua. La expansión térmica es uno de los principales contribuyentes al cambio del nivel del mar a largo plazo, además de contribuir también a cambios regionales y de corto plazo (Ballesteros-Carral, 2016).

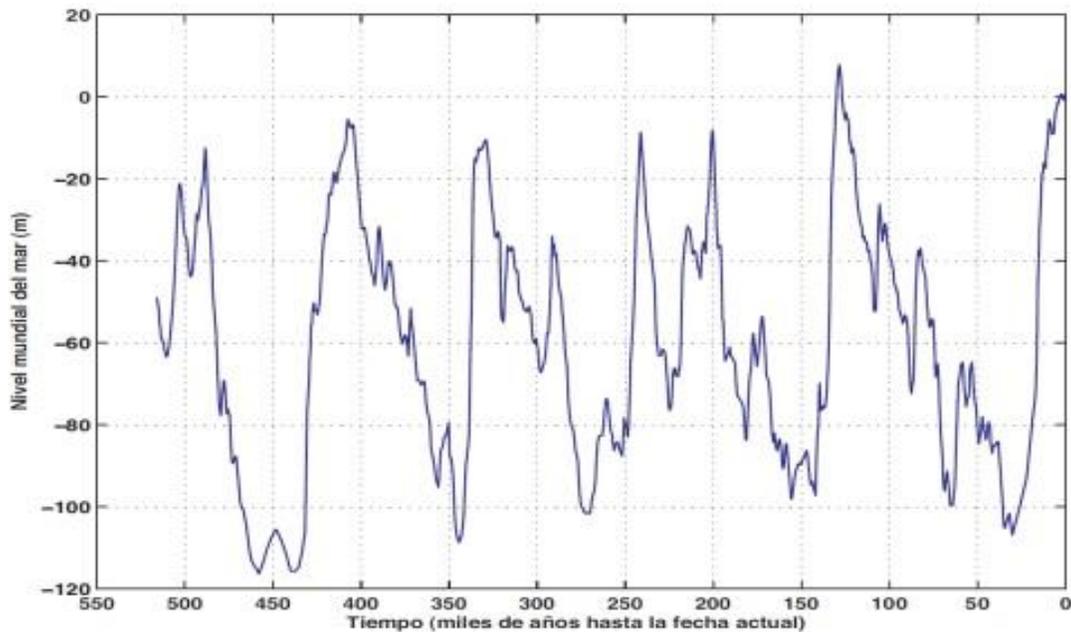


Figura 6. Nivel del mar durante los últimos 500,000 años, en comparación con los datos actuales (Tomado de Ballesteros-Carral, 2016).

Variabilidad estacional

El nivel del mar también tiene cambios interanuales. Una causa importante de estos cambios es el ciclo de calentamiento y enfriamiento anual en ambos hemisferios. En ambos hemisferios los océanos se calientan y se expanden en el verano, mientras que, en el invierno, se enfrían y se contraen. De este modo, los niveles del mar son mayores en verano y principios de otoño, y menores en invierno y principios de primavera. Además, el aumento de agua almacenada en tierra durante el invierno en el hemisferio norte, conduce a una reducción en el nivel medio del mar en esta época.

El fenómeno de El Niño causa cambios de entre 20 y 30 cm en el nivel del mar desde el océano Pacífico Oriental hasta el océano Índico Oriental. La oscilación decadal del Pacífico y el dipolo del océano Índico, también provocan cambios en el nivel del mar.

Variabilidad a corto plazo

Existen ciertos procesos que producen cambios en el nivel del mar a corto plazo (horas, días o hasta 18.6 años) tales como:

Marea astronómica

Las mareas son el proceso más importante que afecta al nivel del mar. Estas se deben a la atracción que ejercen el Sol y la Luna sobre la masa de agua, lo que provoca variaciones diurnas y semidiurnas, las cuales son periódicas y predecibles. Sin embargo, las mareas también pueden tener una escala temporal mayor, que ocurren cuando el Sol, la Luna y la Tierra se alinean (luna nueva o llena), la marea solar tiene un efecto aditivo sobre la marea lunar, dando lugar a las mareas vivas o pleamar. Una semana después, cuando el Sol y la Luna están en ángulo recto entre sí, la marea solar anula parcialmente la marea lunar y se producen las mareas conocidas como mareas muertas o bajamar. De tal forma que, durante cada mes lunar tienen lugar dos mareas vivas y dos mareas muertas y cada 18.6 años coincidiendo con el ciclo lunar se producen mareas excepcionales como consecuencia de la perfecta alineación de la Tierra, la Luna y el Sol (Ballesteros-Carral, 2016; NOAA, 2000; Pons, 2009).

La diferencia entre la pleamar y la bajamar equivale a la amplitud, el intervalo medio entre pleamares y bajamares sucesivas es de 12 horas y 25 minutos aproximadamente, la hora de pleamar o bajamar se retrasa en 50 minutos entre un día y el siguiente, y se relaciona con la Luna, pues también ésta se retrasa diariamente 50 minutos en su paso por el meridiano. La duración media de un ciclo de marea corresponde a la mitad de un día lunar medio. Las alturas de dos pleamares o bajamares consecutivas son generalmente distintas, esta desigualdad puede ser tan grande, que parece solo presentarse una pleamar y una bajamar cada día lunar, en lugar de dos, lo que origina las mareas mixtas (Cadena, 2012).

La marea diurna, tiene una marea alta y una baja cada día lunar. La marea semidiurna, tiene dos mareas altas y dos mareas bajas con altura casi igual diariamente. La marea mixta se caracteriza por una evidente desigualdad diurna en la elevación de las pleamares y bajamares entre ciclos de marea sucesivos (Figura 7) (NOAA, 2000).

La evolución de los niveles de la marea astronómica en un lugar en concreto puede expresarse como la suma de n conjunto de componentes senoidales:

$$\eta = \sum_m A_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_m} t - \varphi_m\right)$$

donde η es el nivel del agua, T_m es el periodo de la componente de orden m .

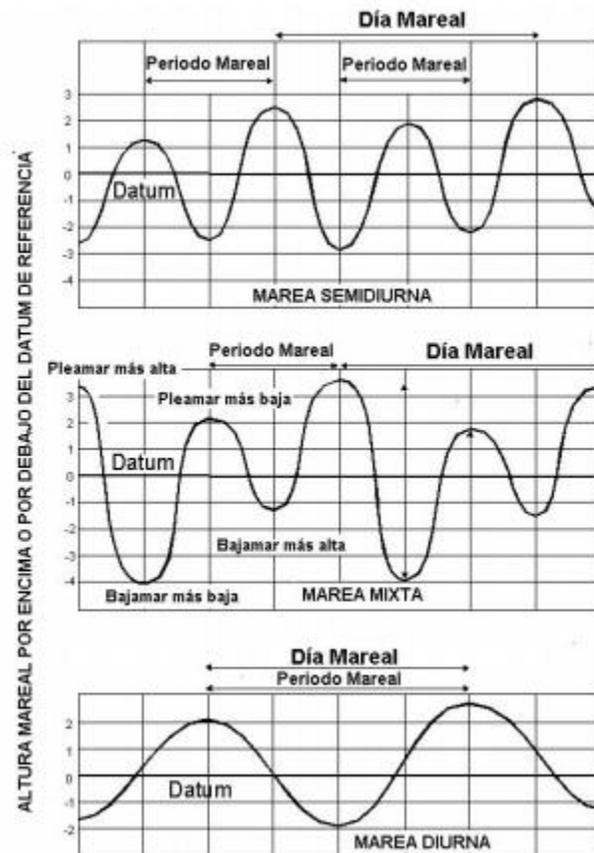


Figura 7. Distribución de las fases de la marea (Tomada de NOAA, 2000).

El rango de marea, es decir la distancia entre los niveles máximo (pleamar) y mínimo (bajamar) que alcanzan depende de la zona geográfica. En mares como el Mediterráneo las mareas son bajas, del orden de cm, debido a que la cuenca es de una extensión bastante inferior a las grandes cuencas oceánicas, y el agua se encuentra demasiado confinada por los continentes, lo que impide que se desarrollen amplitudes de marea elevadas. Pero en otras costas la marea puede ser considerable causando importantes procesos litorales en playas y generando corrientes que pueden afectar la navegación, provocar intrusión salina en lagunas costeras o estuarios, ya que cuanto mayor sea el nivel del mar, mayor será la zona de costa que se verá afectada, sobre todo en áreas planas como las planicies aluviales y las llanuras de inundación.

Durante eventos de tormenta, cuando la pleamar de la marea astronómica llega a coincidir con la marea meteorológica, el nivel del mar se incrementa de tal forma que puede ocasionar inundación en zonas costeras bajas. La marea meteorológica es la variación del nivel del mar ocasionada por fenómenos meteorológicos, como el viento de temporal y grandes cambios en la presión atmosférica. Se hablará de ella más adelante.

Oleaje y viento

El oleaje en el océano puede ser causado por diferentes tipos de factores, desde el paso de embarcaciones hasta fenómenos tales como terremotos submarinos. Sin embargo, la causa más común de la generación del oleaje es el viento. El viento es la corriente de aire que se produce en la atmósfera por causas naturales, siendo una de ellas la presencia de los llamados “frentes fríos”, los cuales se forman cuando una masa de aire frío choca con una masa de aire caliente, pues al ser más denso, el aire frío se mete como una cuña debajo del aire caliente, lo que genera movimiento y provoca inestabilidad en la atmósfera en esa zona. Durante este fenómeno se presentan descensos de temperatura, heladas, vientos intensos, fuerte oleaje, abundante nubosidad y lloviznas. Se considera que los vientos son fuertes a partir de que alcanzan una velocidad alrededor de 63 km/hr, lo cual es conocido como vientos con fuerza de tormenta tropical (CENAPRED, 2014a; CONAGUA, sf).

El oleaje producido por el viento, transmite energía, pero no masa, la cual va dispersando conforme avanza hacia la costa. Conforme se acerca a la costa, el oleaje comienza a sufrir los efectos que el fondo ejerce sobre él debido a la disminución de la profundidad, hasta que alcanza una profundidad lo suficientemente reducida como para que el oleaje “rompa”, liberando así la totalidad de la energía que contenía, tanto potencial como cinética (Almazán & Palomino, 2000).

Cuando las olas rompen en una playa producen el denominado *set-up* del oleaje, un incremento del nivel medio del mar que se produce en la zona de rompiente y consiste en una pendiente ascendente del agua en dirección hacia tierra. La línea de costa efectiva formada por la intersección de la superficie del *set-up* con la playa, es mayor cuanto mayores son las alturas de la ola incidente, con lo que puede llegar a alcanzar valores muy altos durante episodios de tormenta.

De tal forma que, el viento y las tormentas proporcionan grandes cantidades de energía a las olas que viajan hacia la costa, donde esta energía adquirida es disipada en la zona de rompientes. El impacto de una tormenta sobre una costa baja, puede producir inundación temporal por efecto de la marea de tormenta, afectando además a los cuerpos de agua dulce que se localicen en el área afecta, debido al aporte de agua marina hacia tierra que se produce durante el evento. Esta es la causa principal por la que es importante evaluar la acción del oleaje en la costa durante eventos de tormenta.

Marea meteorológica y marea de tormenta

La marea meteorológica o ciclónica, es la sobreelevación anormal del nivel del mar debido al estrés de fuertes vientos sobre la superficie del mar y la presencia de bajas presiones. La marea de tormenta es el aumento anormal del nivel del mar causado por la suma de la marea ciclónica y la marea astronómica (Figura 8) (NOAA, 2000).

La marea meteorológica ocurre por causas independientes al flujo de agua que causa la marea astronómica. Por ejemplo, en algunos lugares como la Bahía de Fundy, en Canadá, la marea astronómica puede causar un incremento o reducción significativa del nivel del mar (más de un metro) cada día, que es independiente de las condiciones meteorológicas. Sin embargo, puede suceder que coincida una tormenta con la pleamar, y que la combinación de ambos efectos, la marea alta y la marea meteorológica amplifiquen el riesgo por inundación (WPC & NOAA, sf).

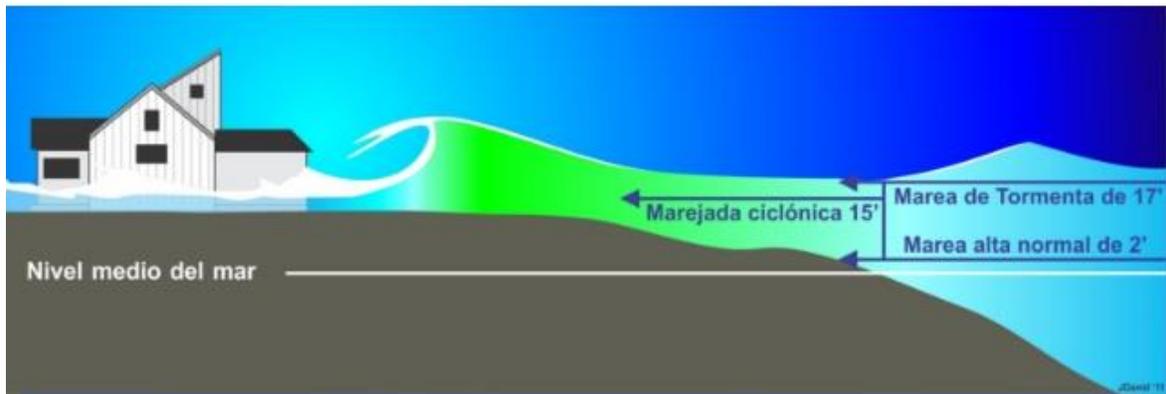


Figura 8. Marea de tormenta.

Hay varios factores que contribuyen en la altura de la marea meteorológica para una localidad en particular:

- a) *Presión central.* Las bajas presiones producirán una marejada más alta, sin embargo, la presión es un contribuidor mínimo si se compara con los otros factores.
- b) *Intensidad de la tormenta.* Los vientos más fuertes producirán una marejada más alta. Por lo tanto, una tormenta más grande producirá una marejada más alta. Y esto es por dos razones: primero, los vientos de una tormenta más grande ponen una mayor fuerza sobre un área del océano. Segundo, los vientos fuertes en una tormenta más grande tienden a afectar un área más grande que la tormenta (NHC-NOAA, sf).
- c) *Velocidad de traslación.* En una costa sin obstáculos, una tormenta moviéndose más rápido producirá una marejada más alta. Sin embargo, una marejada alta también se produce en las bahías y otros cuerpos cercanos de agua con una tormenta moviéndose lentamente (NHC-NOAA, sf).
- d) *Ángulo al aproximarse a la costa.* Es probable que una tormenta que se mueva hacia la costa en un ángulo perpendicular produzca una marejada más alta que

una tormenta que se mueve paralelo a la costa, o se mueve tierra adentro en ángulo oblicuo.

- e) *Tamaño de la costa.* La marejada será más alta cuando una tormenta toca tierra en una costa de tamaño cóncavo en lugar de una costa convexa.
- f) *Ancho y pendiente del fondo.* Las marejadas más altas ocurren con plataformas continentales anchas y de menor pendiente, mientras que las marejadas más bajas ocurren con plataformas continentales estrechas y de pendientes abruptas (Figura 9). Por ejemplo, el área a lo largo de la costa del Golfo de México, son particularmente vulnerables a la marea ciclónica, porque la plataforma continental tiene una pendiente suave.
- g) *Características locales.* La marea meteorológica depende sumamente de las características locales y las barreras que afectarán el flujo del agua.



Figura 9. Marea meteorológica según la pendiente de la plataforma continental. Con una pendiente suave, la marejada tiene mayor efecto sobre la costa (izquierda) que cuando se tiene una pendiente abrupta (derecha), en donde el agua se ve frenada por la pendiente (Tomado de COMET, sf).

Generalmente, la marea meteorológica se asocia a los ciclones o huracanes, porque presentan campos de viento de magnitud considerable. Sin embargo, otros fenómenos meteorológicos como los frentes fríos, también son importantes en la generación de marea de tormenta debido a las ráfagas de viento que presentan (CONAGUA, sf; SMN, sf). Sin importar cuál sea la causa de generación, es importante evaluar el riesgo de inundación por este fenómeno.

Diversos estudios han documentado que la marea de tormenta suele provocar inundaciones en zonas costeras bajas y daño por impacto sobre estructuras costeras y/o rebase (Mireille et al., 2014; Gallien, 2016; Hallegatte et al., 2011; Lichter & Felsenstein, 2012; McInnes et al., 2003; Seenath et al., 2016; Villatoro et al., 2014), lo que afecta directa o indirectamente a la población y/o al medio ambiente de la zona

afectada. La mayoría de estos estudios se basan en las metodologías de evaluación de riesgo costero descritas en el capítulo II.

La marea de tormenta es más intensa cuando los vientos se dirigen hacia la costa. Cuando la dirección de los vientos es hacia la costa y ésta tiene la forma de bahía, es mayor la sobreelevación del nivel medio del mar. Los daños por la marea de tormenta que se presenta cerca de la línea de costa se deben principalmente a la inundación y al impacto del oleaje. Estos se pueden reducir si se predice la marea de tormenta que causaría un evento extremo y si se toman las medidas de protección pertinentes (CENAPRED, 2014b).

Cambio climático

El nivel del mar se ha estudiado para conocer sus cambios y los forzamientos que los inducen. Los fenómenos causales de las variaciones del nivel del mar en las costas son predominantemente: a) astronómicos: interacción de fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna sobre la Tierra; b) meteorológicos: vientos y gradientes de presión atmosférica, evaporación y precipitación; c) gradientes de densidad: producto de gradientes de salinidad y/o de temperatura horizontales o verticales; y d) causas locales u otras: morfología, fricción, dimensiones de la cuenca, efecto Coriolis, y afluentes (Huyer & Pattullo, 1997).

Sin embargo, el incremento del nivel del mar es uno de los asuntos más preocupantes y mayormente difundidos en el mundo sobre los impactos potencialmente adversos de la variabilidad y cambio climático, lo que adquiere mayor importancia al considerar que dos terceras partes de la población mundial vive en zonas costeras (Nicholls, 2002).

La determinación de la tasa de cambio del NMM es importante por una variedad de razones científicas y socioeconómicas, ya que se relaciona con cambios en el clima de la Tierra y posibles consecuencias para la población que habita zonas costeras bajas o sobre planicies situadas a escasos metros del nivel del mar (PNUD, 2010).

Estimaciones basadas en mediciones realizadas por medio de altimetría satelital (TOPEX/Poseidon, Jason) en la década de 1993-2003, establecen que el incremento del NMM fue de 2.8 ± 0.4 mm/año para ese periodo. Sin embargo, estas mediciones podrían estar influenciadas por variaciones en el nivel del mar no relacionadas al cambio climático (Bates et al., 2005) lo que genera incertidumbre en los resultados. Por otro lado, las estimaciones del cambio del nivel del mar global realizadas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y presentadas en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) reportan incrementos de 0.19 m para el periodo 1901-2010, esto es 1.7 mm/año, pronosticando mayor incremento

durante el siglo XXI con rangos probables de 0.26 – 0.54 m para un escenario optimista y 0.45 – 0.81 m para un escenario catastrófico en el periodo 2018 – 2100 (IPCC, 2014).

Desde su Cuarto Informe de Evaluación (AR4) en 2007, el IPCC estableció que el incremento del nivel del mar es inequívoca e inminente, ya que hay un alto nivel de coincidencia y abundante evidencia respecto a que con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, las emisiones mundiales de GEI (gases de efecto invernadero) seguirán aumentando en los próximos decenios, lo que supone un riesgo por inundación para las zonas costeras bajas del mundo (UNFCCC, sf).

Sin embargo, el IPCC recomienda establecer y considerar los cambios regionales del nivel del mar y las características fisiográficas y tectónicas de la zona a estudiar antes de asumir la existencia de incremento del nivel del mar. Esto debido a que existen zonas tectónicamente activas que presentan levantamiento co-sísmico periódico o zonas en donde la explotación de agua subterránea es tal que permite la presencia de subsidencia.

El estudio de la variabilidad del nivel del mar en diferentes escalas de tiempo posee un gran valor para la ciencia y la perspectiva socioeconómica de una ciudad o región, ya que determinar su comportamiento es de suma importancia para aquellos proyectos de obras costeras y marítimas, evaluación de riesgo de inundación y manejo costero.

Variabilidad del mar en Ensenada

Análisis del nivel del mar en Ensenada

Los fenómenos causales de las variaciones del nivel del mar en las costas, como ya se dijo, son predominantemente astronómicos y meteorológicos. Así pues, conociendo el comportamiento de estos fenómenos, se puede conocer, como una primera aproximación, el comportamiento del nivel del mar a largo plazo. Es decir, una serie de datos del nivel del mar puede descomponerse en las señales de los diferentes fenómenos que la componen, los cuales podrían extraerse mediante diversos métodos. Sin embargo, al extraer de la serie original los fenómenos de altas frecuencias, podemos observar las tendencias de oscilación de fenómenos de largo plazo y baja frecuencia, como podría ser el incremento del nivel del mar asociado al cambio climático.

Para la bahía de Ensenada, se utilizaron dos series de tiempo de datos de nivel del mar. La primera serie corresponde a los datos registrados por el mareógrafo de la Secretaría de Marina (SEMAR) para el periodo de 2003-2015 con datos horarios e inconsistencias en el registro para los años 2008 y 2012, en los cuales no hay información para los meses de enero y febrero (Figura 10). La segunda serie corresponde a los registros históricos del Servicio Mareográfico Nacional (SMN) correspondiente al periodo 1956-1991 (Figura 11), en donde se tiene ausencia de datos para casi 5 años consecutivos (1975 a 1980). Ambas series se referenciaron al nivel cero, el cual corresponde al nivel de bajamar media inferior (NBMinI) representado con la línea punteada en rojo.

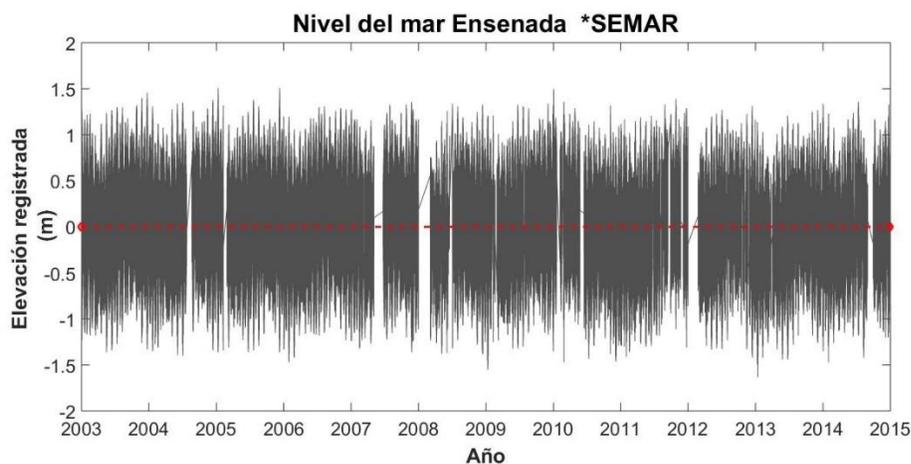


Figura 10. Datos de nivel del mar de la serie de tiempo de la Secretaría de Marina para el periodo de 2003 a 2015. La línea punteada roja representa NBMinI establecido en cero.

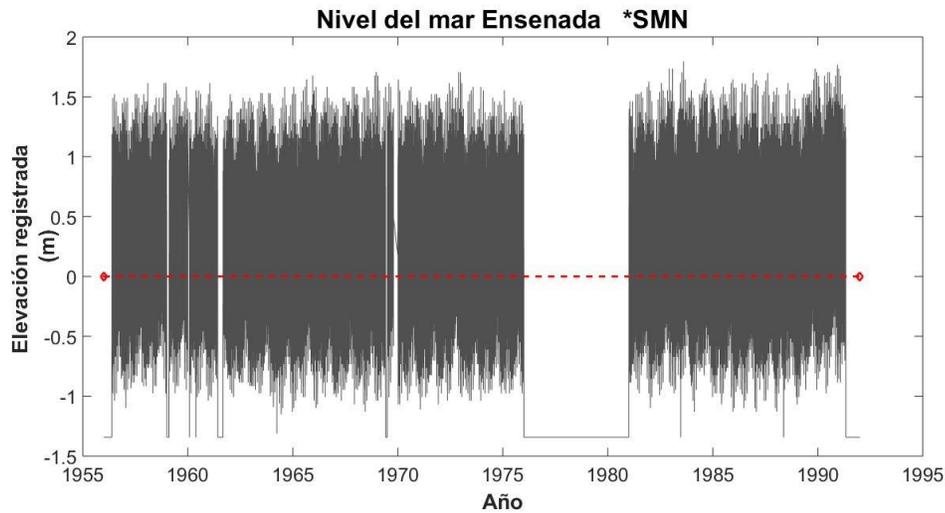


Figura 11. Datos de nivel del mar de la serie de tiempo del Servicio Mareográfico Nacional para el periodo histórico de 1956 a 1991. La línea punteada roja representa NBMI establecido en cero.

En Ensenada la marea astronómica es tipo mixta semidiurna, es decir, se registran dos pleamares y dos bajamares al día. La pleamar media superior es de aproximadamente 1.61 m (referido al NBMI), en un ciclo anual, los niveles del mar más altos se presentan en el verano, mientras que los más bajos suceden durante el invierno (SEMAR, sf). En ambas series de tiempo (Figura 10 y 11) se puede observar que los valores máximos registrados, es decir, la pleamar, sobrepasa el 1.5 m, llegando a un máximo de 1.8 m en la serie correspondiente al SMN y 1.6 m en la serie de la SEMAR.

Un método utilizado para extraer los fenómenos de altas frecuencia de una serie de datos y poder observar el comportamiento o la tendencia de los fenómenos de bajas frecuencias, es el método de la media móvil. La media móvil no es más que un cálculo utilizado para analizar un conjunto de datos en modo de puntos para crear series de promedios. Así, las medias móviles son un conjunto de números en el que cada uno es el promedio de un subconjunto de los datos originales. Este proceso es equivalente al filtro conocido como “paso bajo” dado por la ecuación:

$$y_s(i) = \frac{1}{2N+1} (y(i+N) + y(i+N-1) + \dots + y(i-N))$$

Donde: $y_s(i)$ es el valor suavizado para el dato del punto i , N es el número de datos vecinos a cada lado de $y_s(i)$ y $2N+1$ es la ventana de filtrado.

La media móvil se puede programar mediante un código en MATLAB, sin embargo, MATLAB tiene una función llamada *smooth* que no es otra cosa más que la media móvil. Esta función *smooth* permite analizar datos con diferentes métodos y ventanas de filtrado.

En este trabajo se aplicó la media móvil a las dos series de tiempo de datos de nivel del mar para Ensenada mediante un código programado en MATLAB. A cada serie de tiempo se le aplicaron diferentes ventanas de filtrado: 36, 360, 720 Y 8760; lo que significa, que, de la serie original, fueron removidos los fenómenos de frecuencia de 36 horas, 15 días, 30 días y 1 año. Cabe aclarar, que el objetivo no está centrado en identificar los fenómenos registrados en las series, sino observar si la variabilidad del nivel del mar muestra una tendencia de incremento.

Para la ventana de 36 horas, se eliminan fenómenos de oscilación de alta frecuencia como las brisas marinas y los vientos locales provocados por los cambios térmicos en la superficie del océano y la tierra consecuentes con la fluctuación de la radiación solar día-noche. Con esta misma ventana, se eliminan las componentes de marea diurna y semidiurna. Las figuras 12 y 13 muestran la serie original del nivel del mar y la serie resultante después de aplicar la ventana de 36 horas para los dos registros, SEMAR y SMN.

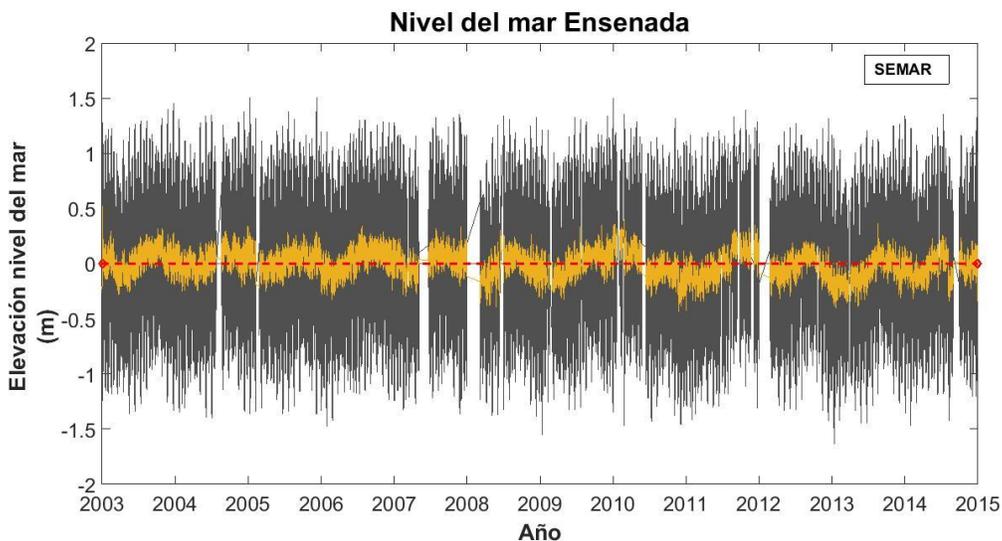


Figura 12. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de frecuencias mayores a 36 horas (amarillo) referenciados al NBMInI (línea punteada en rojo) para el registro de la SEMAR.

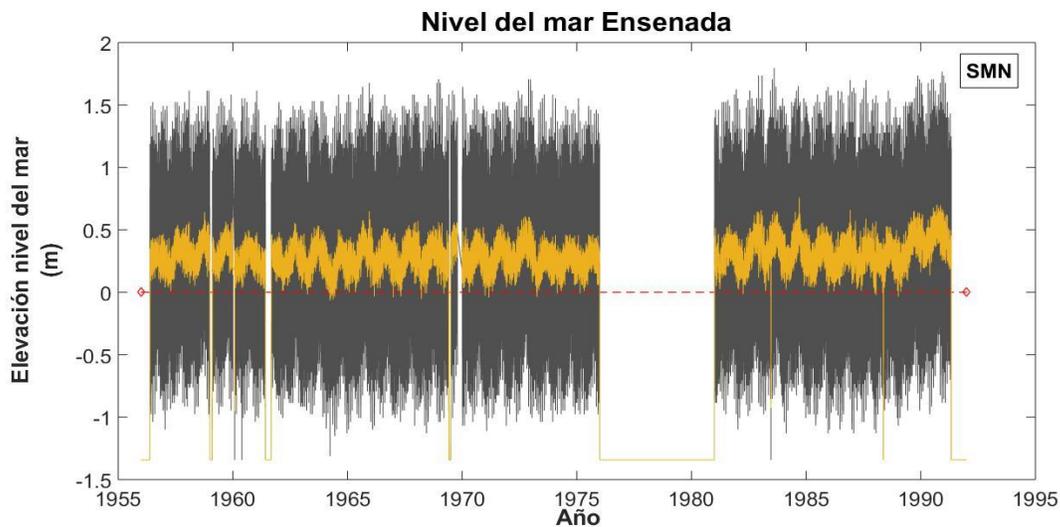


Figura 13. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de frecuencias mayores a 36 horas (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo) para el registro del SMN.

Aplicando una ventana de 360 horas, se eliminan fenómenos que oscilan en la frecuencia por debajo de los 15 días, como consecuencia de las variaciones más habituales de la presión atmosférica en la región, además de las componentes quincenales de la marea (Figura 14 y 15). Para la ventana de 720 horas se eliminan los fenómenos asociados a frecuencias mayores a 15 días y menores a 30 días (Figura 16 y 17) como las componentes mensuales de la marea. Para la ventana de 8760 horas, se elimina cualquier fenómeno de frecuencia menor a un año, como las componentes anuales de la marea y los fenómenos estacionales (Figura 18).

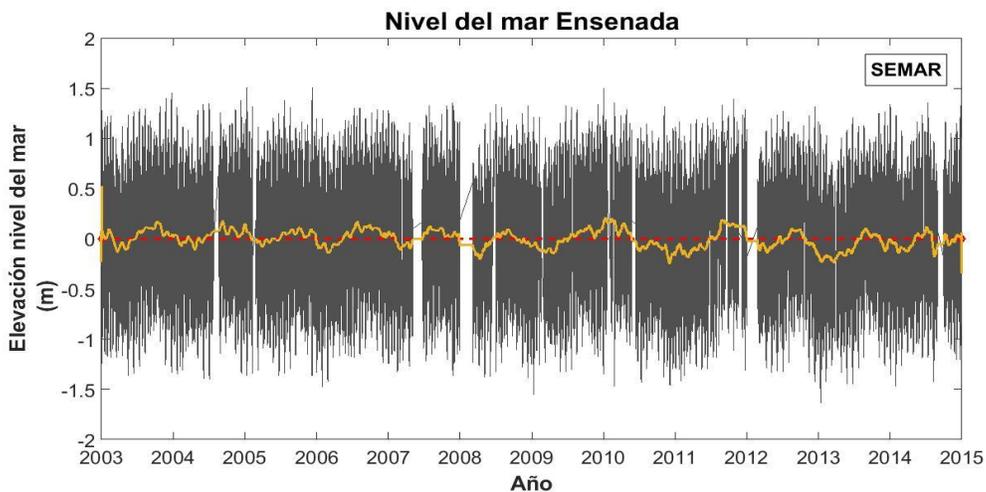


Figura 14. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos de frecuencias mayores a 15 días (amarillo) para el registro de la SEMAR.

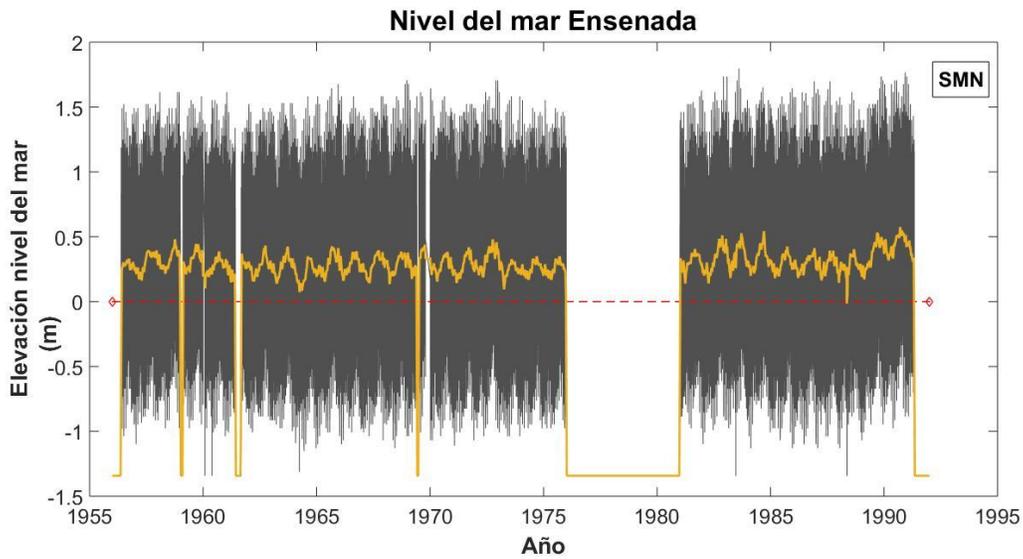


Figura 15. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos de frecuencias mayores a 15 días (amarillo) para el registro del SMN.

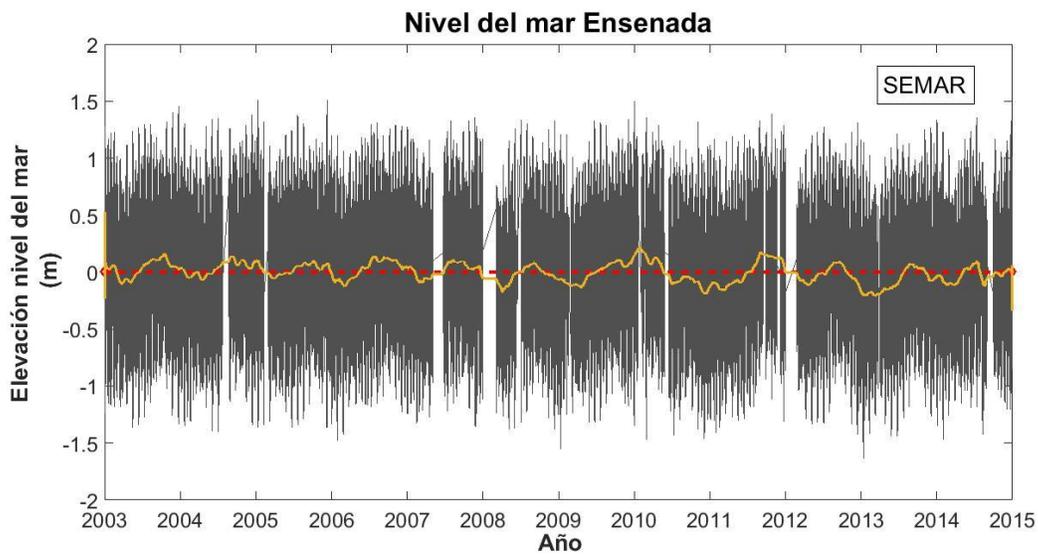


Figura 16. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos con frecuencias mayores a 30 días (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo) para el registro de la SEMAR.

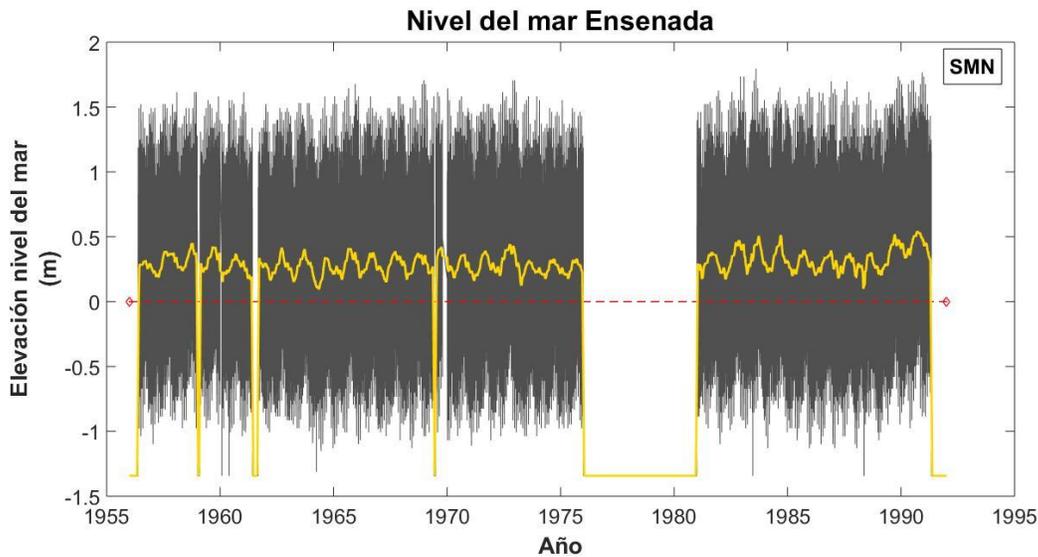


Figura 17. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos de frecuencias mayores a 30 días (amarillo) para el registro del SMN.

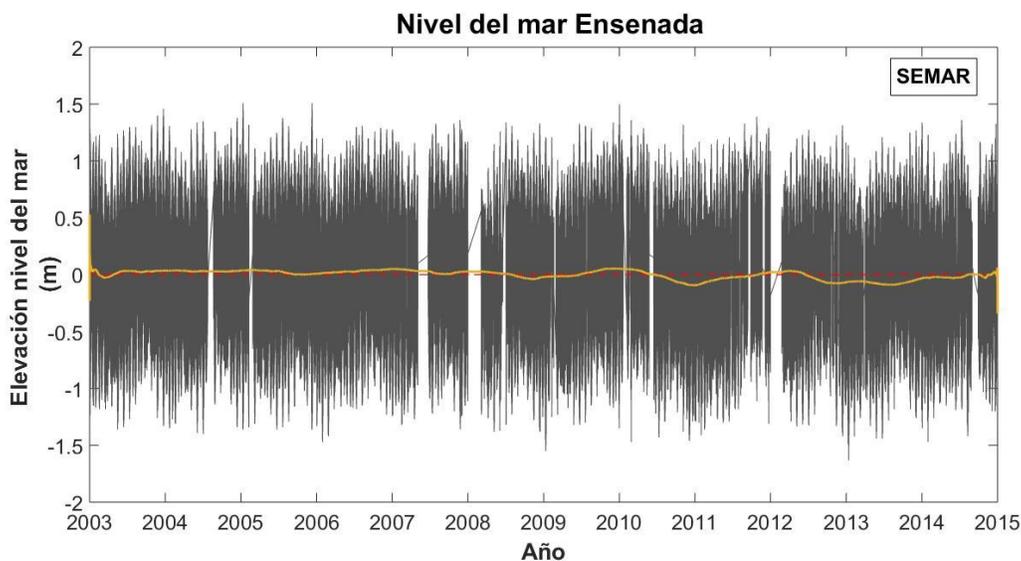


Figura 18. Serie del nivel del mar original (gris) y tendencia de oscilación de fenómenos con frecuencias mayores a un año (amarillo) referenciados al NBMinI (línea punteada en rojo).

Después de aplicar diferentes ventanas de filtro a ambas series, se observa que, después del filtrado de la serie, se aprecia mejor la variabilidad del nivel del mar, sin embargo, no se muestra incremento. Por lo tanto, mediante funciones de MATLAB, se aplicó un ajuste de tipo lineal para establecer la tendencia de la serie de datos reciente de la SEMAR con una ventana de filtro de un mes. El ajuste muestra una línea de tendencia negativa. Por lo tanto, se puede decir que, como primera aproximación y con base en

los datos de nivel del mar del registro perteneciente a la SEMAR para el periodo de 2003 al 2015 no hay incremento del nivel del mar en la bahía de Ensenada (Figura 19), pero para la serie del SMN si se muestra una leve tendencia de incremento (Figura 20). Es interesante como para un mismo lugar se pueden tener resultados completamente opuestos, quizá una razón se deba a errores sistemáticos.

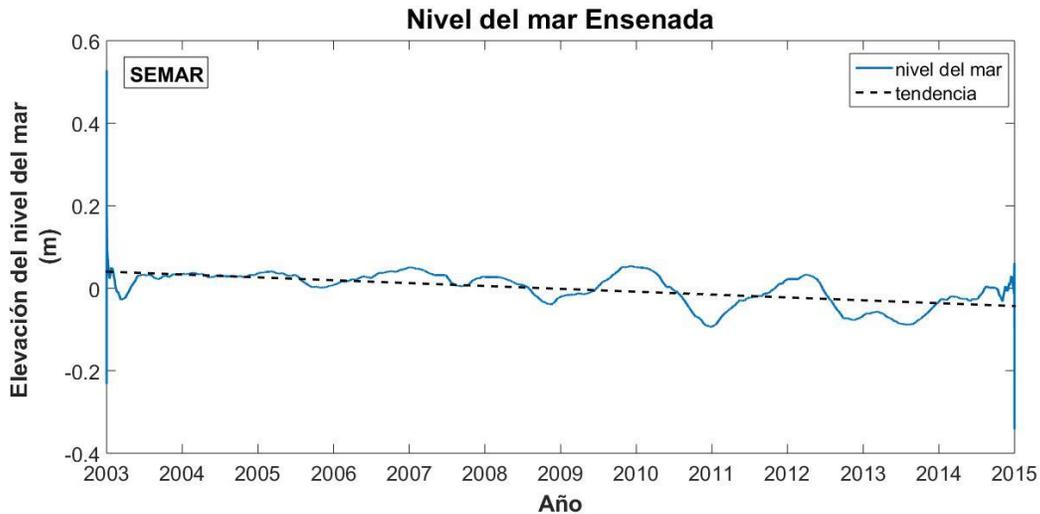


Figura 19. Línea de tendencia negativa para los datos de nivel del mar correspondientes al registro de la SEMAR.

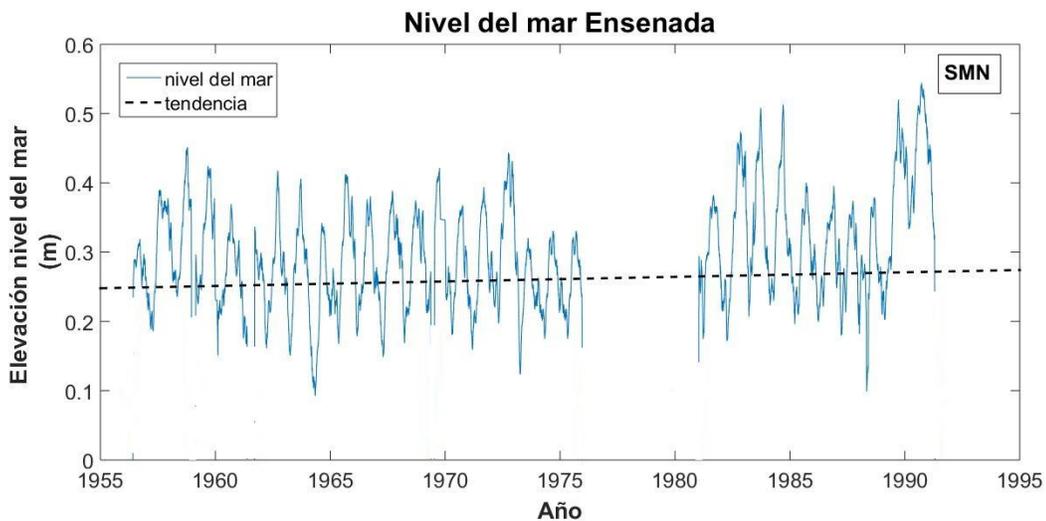


Figura 20. Línea de tendencia positiva para los datos de nivel del mar correspondientes al registro del SMN.

Sin embargo, es importante considerar que en la mayoría de las estaciones mareográficas ubicadas en la costa occidental de México y en el Golfo de California, la tendencia observada en el nivel del mar no es estadísticamente significativa, debido a

que se cuenta con muy pocas observaciones continuas y de calidad (Ortíz-Figueroa, 2008), que puedan utilizarse como bases confiables para establecer tendencias, tal es el caso de los registros para la bahía de Ensenada. Es evidente que, en las costas de México, como la costa de Ensenada, se cuenta con relativamente pocos años de observaciones que, si bien han resultado de gran utilidad para dar aproximaciones, no son suficientes para aventurarnos a formular proyecciones significativas del cambio relativo del nivel del mar.

Según Ortíz-Figueroa (2008), en la costa occidental de la península de Baja California como en el Golfo de California y la península de Yucatán no se han observado movimientos significativos de las márgenes continentales en comparación con las variaciones de largo plazo del nivel del mar, y en general las tendencias del nivel del mar son positivas pero mínimas.

Por otro lado, en el informe final del Instituto Nacional de Ecología (2008) sobre la evaluación de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos, establecen una estimación de la tendencia a largo plazo en el nivel del mar para 17 sitios de las costas mexicanas, entre ellos Ensenada, considerando los promedios mensuales de las series de nivel del mar a partir de los datos obtenidos por el SMN de la UNAM. Mencionan que dichas observaciones se ven limitadas por la longitud y la continuidad de las series de tiempo. Para Ensenada estiman un incremento de 2.73 mm/año, sin embargo, aclaran que las series claramente muestran variaciones interanuales y de escala decadal que, para ser separadas del cambio producido por el calentamiento global del planeta, es deseable contar con series de mayor longitud, por lo que aconsejan tomar con cautela las estimaciones presentadas en su informe.

Por lo tanto, en este trabajo no se considera que exista incremento del nivel del mar en la bahía de Ensenada producto del cambio climático, ya que, aunque la serie del SMN es de mayor longitud, la inconsistencia y la falta de datos es más persistente que en la serie de la SEMAR. Además, la tendencia de incremento que muestra la serie del SMN no resulta ser significativa.

Análisis de oleaje y viento en Ensenada

En la gran mayoría de las regiones alrededor del mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo, las series de datos medidos en aguas someras no existen o no son suficientemente largas para caracterizar el clima marino (Bonanata et al., 2009). Por lo tanto, es necesario el uso de series de datos provenientes de programas de reanálisis de olas en aguas profundas para caracterizar el oleaje y posteriormente trasladar esos resultados hacia la costa mediante un modelo de propagación.

En este trabajo, los datos utilizados para el análisis y caracterización del oleaje y viento en aguas profundas fueron extraídos de la base de datos del modelo de WAVEWATCH III (WWIII) (Tolman, 2014), un modelo de tercera generación desarrollado por la NOAA/NCEP (Centros Nacionales de Predicción Ambiental, por sus siglas en inglés) que resuelve la ecuación de conservación de la densidad espectral de onda. Este modelo asume que las propiedades del medio (profundidades y corrientes), así como el campo de ondas, varían en escalas espaciales y temporales superiores a las escalas de variación de una única onda. El WWIII permite simular la generación y propagación de espectros de olas con base en el viento.

Los datos del clima de ola en aguas profundas (altura significativa H_s , periodo pico T_p y dirección de incidencia Dir) fueron extraídos del nodo de la malla situado en las coordenadas 31.800084°N , $-117.066427^\circ\text{W}$, a 1,200 m de profundidad y a 40 km de la costa, para el periodo comprendido entre el 01 de abril de 2005 y el 31 de julio de 2015.

A partir de los datos del clima de ola, se caracterizó el régimen extremal del oleaje y el viento en el origen del dominio. Para establecer el régimen extremal del oleaje, después de descargados los datos del WWIII, se utilizaron códigos programados en MATLAB para quitar los valores “error” (NaN). Posteriormente, la serie de datos resultante fue analizada nuevamente mediante códigos de MATLAB para extraer los datos correspondientes a las tormentas, en donde una tormenta se definió como un evento con una altura de ola significativa H_s igual a 1.5 veces la altura cuadrática media H_{rms} , que se define como la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de todas las alturas de ola.

Con la serie de tiempo perteneciente a las tormentas, se obtuvo la función de distribución de H_s (Figura 20), la cual muestra que el 25% de las olas tienen altura de ola de 4.31 m, el 50% altura de 4.6 m y 75% de las olas presentan una altura de 5.5 m.

La dirección de incidencia del oleaje de tormenta está muy marcada, el 84% de las olas proviene del WNW con alturas de 4 a 5 m, mientras que el 16% restante incide del W y alturas de 5 a 7 m. Las rosas de viento muestran una velocidad predominante de entre 3 y 8 m/s y un máximo de 12 m/s en el año, con dirección W y WNW (Tabla IV y Figura 21). Esta dirección de incidencia del oleaje está fuertemente influenciada por los vientos que se producen por el paso de tormentas invernales asociadas a frentes fríos procedentes del Golfo de Alaska (Martinez-Diaz-De-Leon et al., 2008; SEMAR, sf).

La función de distribución de H_s y la tabla de probabilidades direccionales para H_s se obtuvieron mediante el software CAROL (desarrollado por el IH de Cantabria), este software caracteriza variables oceanográficas definidas a partir de una serie temporal con base en tres módulos generales: 1) información preliminar y estadística descriptiva

de los datos; 2) caracterización del régimen medio de una determinada variable; y 3) caracterización del régimen extremal de una variable. Por otro lado, para generar las rosas de altura de ola y viento, se utilizó el software GRAPHER 12.

Mediante códigos de MATLAB, se estimó también la probabilidad conjunta de altura significativa y periodo pico de ola, y altura significativa y dirección de incidencia de ola (Figura 22), con la finalidad de obtener el periodo pico que caracteriza a la serie de datos del oleaje y su dirección de incidencia, para establecer escenarios de modelación y propagación de oleaje hacia la costa. El análisis de probabilidad conjunta de altura de ola VS periodo pico y dirección de incidencia arrojó como resultado periodos de entre 14 y 16 segundos con altura significativa de 4 – 5 m y dirección WNW.

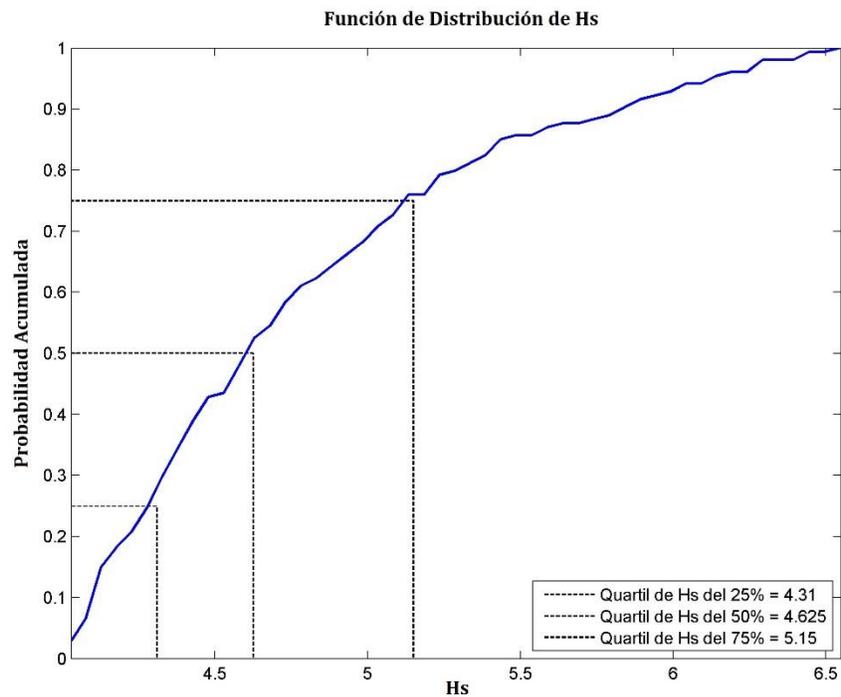


Figura 21. Función de distribución (probabilidad acumulada) de H_s para tormentas.

Tabla IV. Tabla de probabilidades direccionales y datos estadísticos de *Hs* para cada dirección.

TABLA ESTADÍSTICOS BÁSICOS					
Variable medida <i>Hs</i>					
Direcciones °	Prob. dirección	Hs 50%	Hs 90%	Hs 99%	H12
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.1623	5.6000	6.2900	6.5500	6.5500
WNW	0.8377	4.6000	5.4120	6.3294	6.4400
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

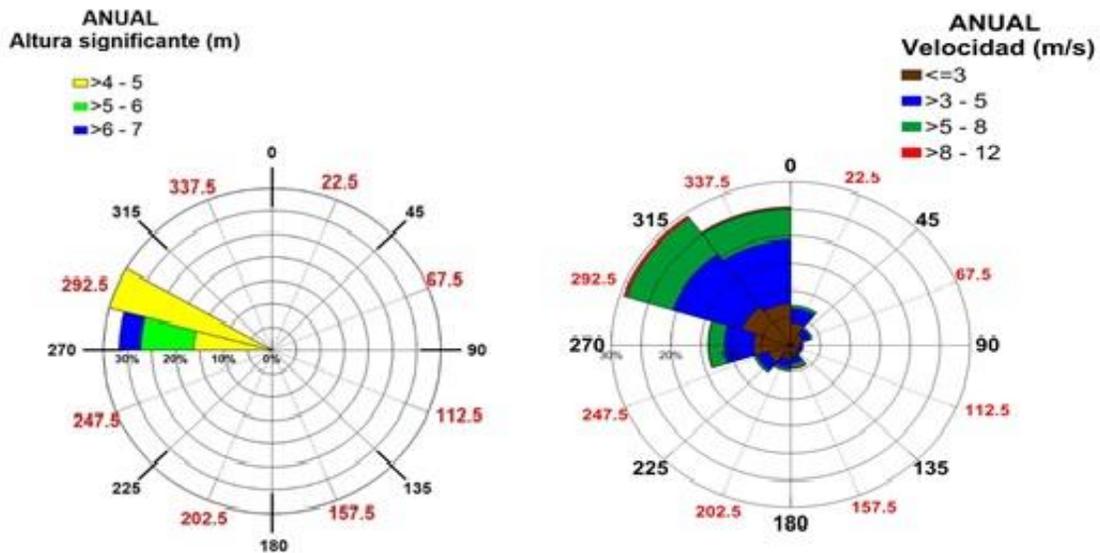


Figura 22. Rosa de oleaje (izquierda) y velocidad del viento (derecha) para condiciones de tormenta. *Nota: la dirección indica de donde proviene el oleaje y el viento.

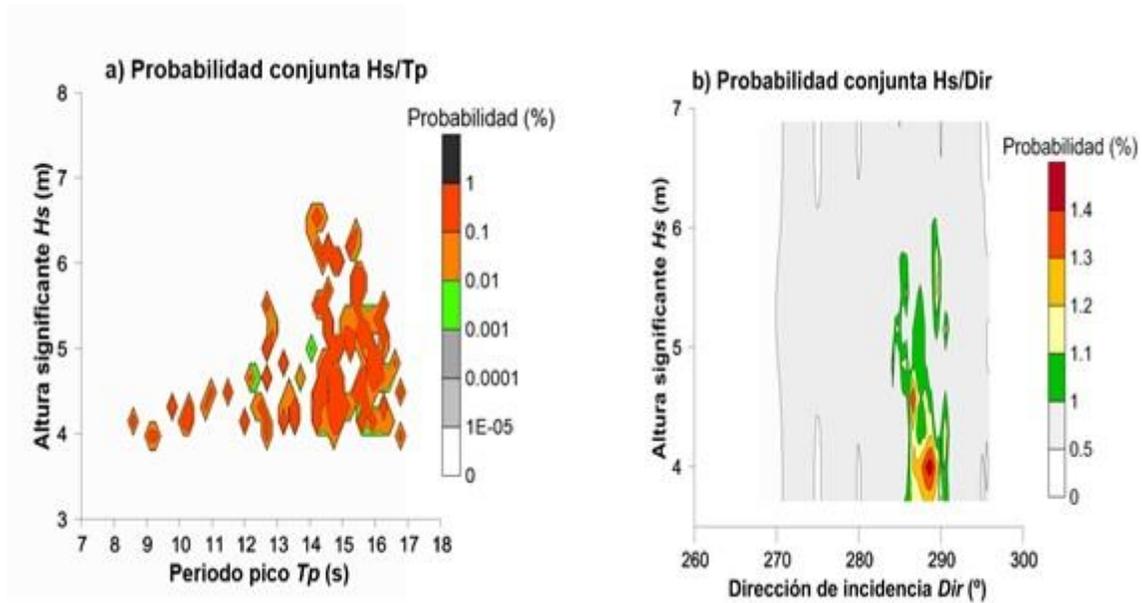


Figura 23. Probabilidad conjunta de altura significativa H_s , periodo pico T_p y dirección de incidencia Dir . Probabilidad conjunta H_s/T_p (izquierda) y probabilidad conjunta de H_s/Dir (derecha).

Mediante el software CAROL se caracterizó el régimen extremal para la altura de ola H_s . En este módulo, el CAROL ofrece dos métodos de caracterización: 1) método de máximos anuales utilizando las distribuciones Gumbel de Máximos y la función Distribución Generalizada de Valores Extremos (GVE); y 2) método POT (excedencias sobre un umbral) usando la función GVE.

La elección entre un método y otro, depende de la longitud de la serie de datos a analizar, de tal manera que, si se cuenta con una serie de datos larga, como es el caso de las series del Atlas de Clima Marítimo para las vertientes del Pacífico (Silva et al., 2007) y el Golfo de México, en donde se tienen series de datos de 60 años, es conveniente utilizar el método de máximos anuales; pero si la serie a analizar es corta, se recomienda utilizar el método POT. En este trabajo el análisis extremal se hizo con el método POT, ya que la serie de datos a analizar correspondía a 11 años. Se tiene que para un $Tr= 2.5$ años Los resultados se muestran en las figuras 23 y 24.

De tal manera que, los resultados de este capítulo se pueden resumir en la tabla V, altura de ola H_s y *velocidad del viento* asociados a periodos de retorno, y periodo pico y dirección de incidencia representativos en la zona de estudio.

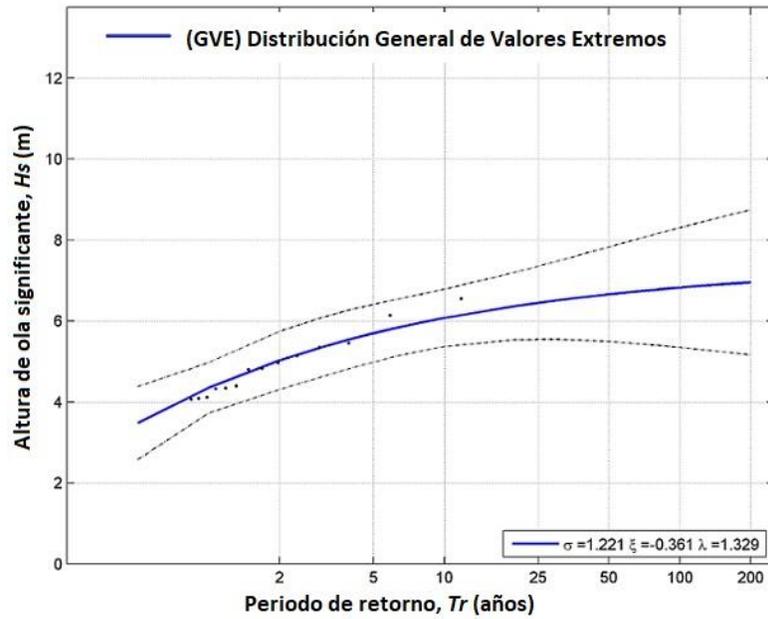


Figura 24. Análisis de valores extremos para H_s asociados a periodos de retorno T_r 2, 5, 10, 25 y 50 años, por el método POT (*Peak Over Threshold*) pico sobre un umbral a 99.5% con la función GVE.

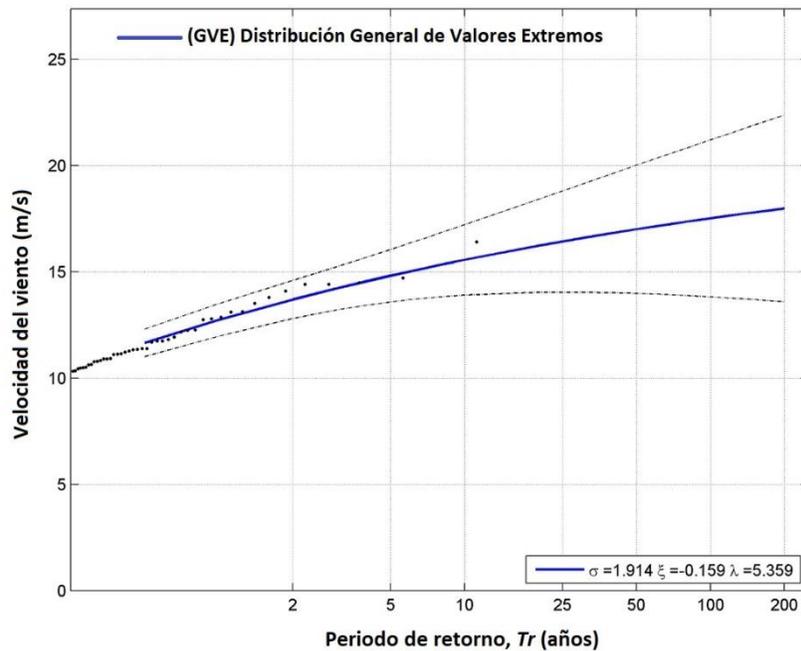


Figura 25. Análisis de valores extremos para la *velocidad del viento* asociados a periodos de retorno T_r 2, 5, 10, 25 y 50 años, por el método POT (*Peak Over Threshold*) pico sobre un umbral a 99.5% con la función GVE.

Tabla V. Resumen de resultados para el análisis de oleaje y viento

Periodo de retorno, T_r (años)	Altura de ola, H_s (m)	Velocidad viento (m/s)	Periodo pico, T_p (segundos)	Dirección de incidencia del oleaje y viento, Dir (°)
2	4.9	13.7	14 - 16	W - WNW 290-315
5	5.5	15		
10	6	15.7		
25	6.5	16.5		
50	6.7	17.2		

Como se muestra en la tabla V, el oleaje de tormenta en la bahía de Ensenada proviene con mayor frecuencia del cuadrante W - NW y las olas más altas se observan durante el invierno con alturas de 7 m, debido al paso de tormentas invernales asociadas a frentes fríos. El oleaje más energético tiene periodos que van de 14 a 16 segundos.

En estudios previos de otros autores, se establece que el oleaje más frecuente en la Bahía de Ensenada proviene del NW y las olas más altas se presentan en el invierno. Con menor frecuencia y de menor altura, se observa oleaje del SW principalmente durante el verano. Respecto al periodo, se reporta de 12 a 16, registrando incluso hasta 18 segundos durante el invierno (Cruz-Falcon & Jimenez-Perez, 1995; Martinez-Diaz-De-Leon et al., 2008; Martínez Díaz de León et al., 1998; Meillon-Menchaca & Álvarez-Borrego, 1997; Ortiz Figueroa, 2009).

Análisis de marea de tormenta en Ensenada

En el municipio de Ensenada, se tiene detectado que los eventos de peligro más recurrentes son la sequía, la sismicidad y las inundaciones, pero son precisamente estas últimas, las únicas que carecen de información detallada (UABC & IIO, 2012).

De acuerdo al Atlas de riesgos naturales del municipio de Ensenada (2012), se tiene como antecedente de daños por marea de tormenta, la tormenta invernal del 8 de marzo de 1978, en donde la marea de tormenta sumada al fuerte oleaje, provocó daños dentro de la rada del puerto de Ensenada, afectando principalmente a embarcaciones y patios de carga. Fue hasta 1985 cuando se construyó el espigón El Gallo, al sur de la rada portuario, con la finalidad de disminuir los efectos del oleaje y proteger el interior del puerto.

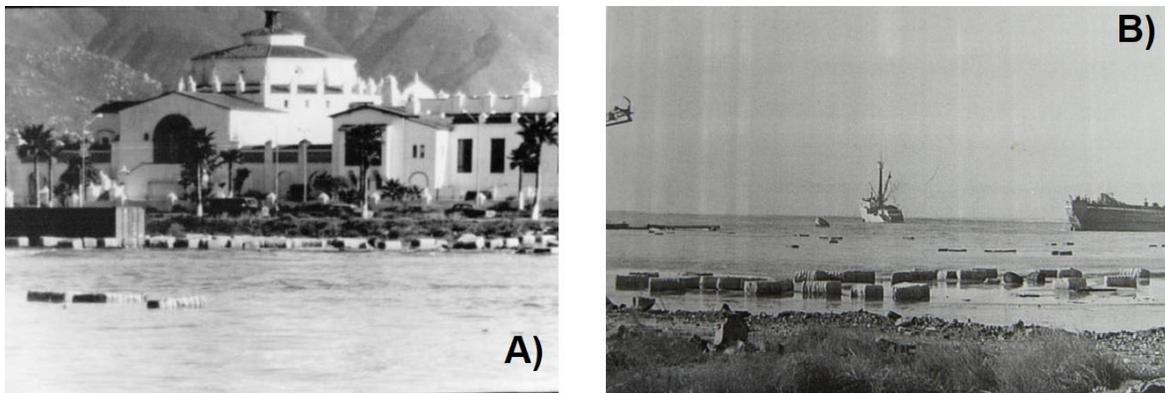


Figura 26. Pacas de algodón en la playa del Hotel Riviera (A) y en la playa de la rada portuaria (B) después de la tormenta invernal de 1978.

Respecto a la topografía, la parte continental de la Bahía de Ensenada está constituida por una morfología con sistema irregular, en la cual se localizan paisajes de montaña, pie de montaña, valles y planicies. El paisaje de montaña representa las cuencas altas con diferencias de altura entre los 200 y 1100 msnmm, este sistema de paisaje se distingue por relieves con rangos de pendientes que varían entre 10% a 33% y abarca más del 60% del área total. Los valles se localizan principalmente en la parte SE de la bahía y limitan con la planicie del estero de Punta Banda. El pie de montaña se ubica en la parte Este de la bahía los cuales forman lomeríos con pendientes poco pronunciadas con alturas de 40 a 700 msnmm. En este sistema de paisaje se encuentra gran parte de la ciudad de Ensenada. La planicie está ubicada en las inmediaciones del estero de Punta Banda con un área aproximada de 2200 ha (SEMAR, sf). Desde la zona costera hasta la mancha urbana, la pendiente varía desde 0 hasta 2%, considerándose como una pendiente poco pronunciada (Figura 22).

El aumento del nivel del mar producto de la marea de tormenta puede ser insignificante o de varios metros de altura, representando la mayor amenaza a las comunidades costeras situadas en zonas bajas. El nivel de alcance de la marea de tormenta en un área en particular, está relacionado en principio con la intensidad del viento y la pendiente de la placa continental. Es decir, si la costa tiene una pendiente plana y extensa los efectos suelen ser devastadores, por el contrario, si la pendiente es pronunciada, el efecto de la marea de tormenta se reduce debido a la resistencia que opone la pendiente del terreno sobre la ola (CENAPRED, 2014b). De manera que las mayores mareas de tormenta se producen en mares con una amplia plataforma continental, y, por lo tanto, una extensa región de aguas someras.

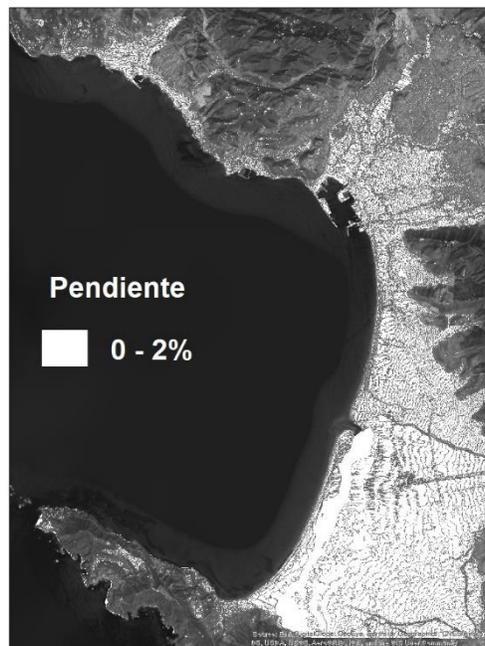


Figura 27. Mapa de pendientes para la zona costera de la Bahía de Ensenada. La pendiente va del 0 al 2%.

La marea de tormenta se puede calcular a partir de la magnitud y dirección de los vientos que actúan sobre la superficie del mar. El CENAPRED (2007) estableció una metodología para estimar la altura máxima de la marea de tormenta, la cual está diseñada para eventos como huracanes. En esta metodología se considera los radios máximos de vientos y los vientos máximos sostenidos, además de un factor correctivo que se obtiene a partir del ángulo que forma la dirección de desplazamiento del huracán con respecto a la línea de costa afectada, sin embargo, esta metodología es considerada por muchos como obsoleta o de poca precisión.

En este trabajo, la marea de tormenta se estimó en función de la velocidad y dirección del viento utilizando como base las curvas de elevación del nivel del mar generadas por el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, las cuales se obtuvieron mediante el modelo hidrodinámico MATO (Posada, 2007). El modelo se aplica bajo seis velocidades uniformes del viento, de 18 a 43 m/s (Figura 23) para cada una de las ocho posibles direcciones de incidencia del viento. Los valores de marea de tormenta se registran cuando se alcanza la estabilidad entre los resultados generados por el modelo y los parámetros de forzamiento (Posada et al., 2008).

Para la Bahía de Ensenada, el viento que proviene del NW es el que produce los mayores valores de marea de tormenta con base en las curvas de elevación del nivel del mar, alcanzando 1.8 m con una velocidad del viento de 43 m/s (155 km/hr).

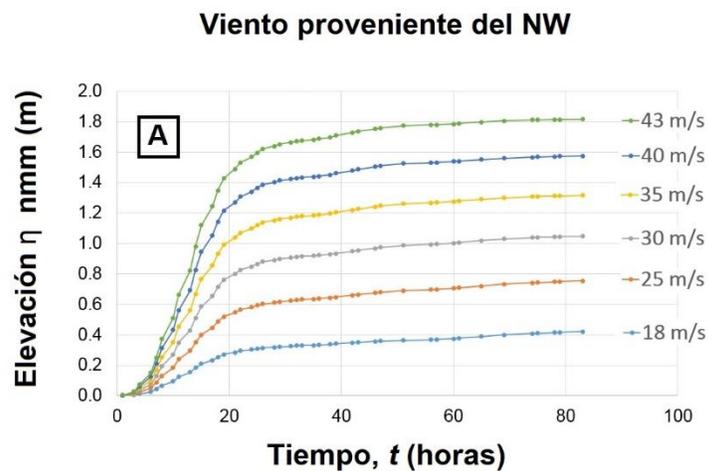


Figura 28. Estimación de los valores de marea de tormenta en función del tiempo.

Sin embargo, el análisis de viento muestra que los vientos asociados a periodos de retorno van de los 14 a los 17 m/s (50-61 km/hr), por lo que estarían provocando una elevación máxima del nivel del mar por marea de tormenta de 0.5 m.

Para conocer las elevaciones del nivel del mar para las velocidades menores a 17 m/s, se ajustó una polinomial de grado 2 a los datos de velocidad del viento (eje X) y máxima elevación del mar en función de la velocidad del viento (eje Y) mediante el software *Curve Expert Professional* (Figura 24).

Con este ajuste se obtuvo la ecuación de regresión polinomial de grado 2 y los ajustes para los coeficientes A y B, los cuales fueron sustituidos en la ecuación junto con la velocidad del viento (Figura 25).

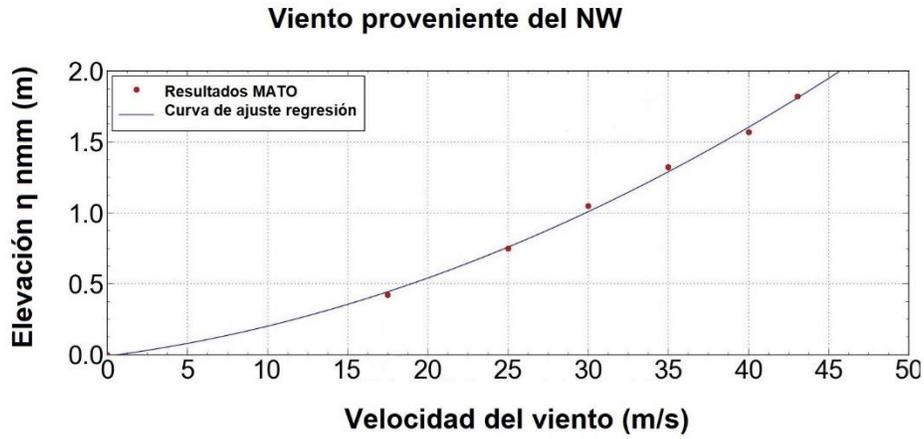


Figura 29. Estimación de los valores de marea de tormenta en función de la velocidad y la dirección NW del viento.

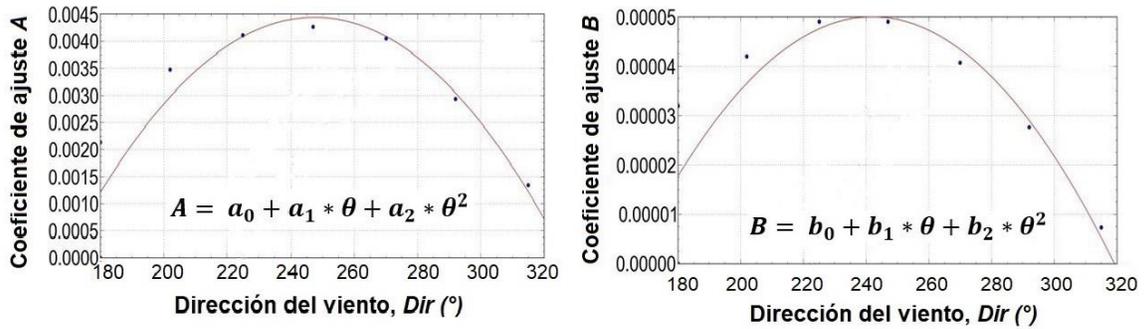


Figura 30. Coeficientes de ajuste A y B en función de la dirección NW del viento.

Los valores de marea de tormenta obtenidos se muestran en la tabla VI. Se presentan los valores para las direcciones de viento del IV cuadrante (Oeste a Norte).

Tabla VI. Valores estimados de marea de tormenta asociada a diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno, T_r (años)	Velocidad viento (m/s)	Marea de tormenta (m)				
		W	WNW	NW	NNW	N
2	13.7	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3
5	15	0.3	0.5	0.75	0.6	0.5
10	15.7	0.4	0.6	0.8	0.7	0.6
25	16.5	0.5	0.7	0.95	0.8	0.7
50	17.2	0.5	0.8	1	0.9	0.8

La marea de tormenta es, a escala mundial, la principal causa de pérdidas humanas asociada a eventos meteorológicos como huracanes. En México, no tiene la importancia que adquiere en otros países como Estados Unidos y Bangladesh. Esto se debe a que la plataforma continental es muy abrupta en la mayor parte de sus mares y el perfil costero adquiere rápidamente pendientes pronunciadas. Sin embargo, no siempre se da la situación anterior y se deben evaluar las condiciones locales para establecer el riesgo por marea de tormenta (CENAPRED, 2014b).

La marea de tormenta obtenida para la Bahía de Ensenada podría considerarse baja, esto se debe a que la velocidad del viento reportada por el WWIII para la zona, es también, relativamente baja, ya que las máximas velocidades obtenidas alcanzan apenas la categoría de una depresión tropical, de acuerdo a la Escala de Saffir-Simpson, la cual es una escala que clasifica los ciclones tropicales según la intensidad del viento (CENAPRED, 2014a). Según esta escala, los daños provocados por vientos de esa intensidad son mínimos.

La costa del Pacífico Mexicano, desde la frontera con Guatemala hasta Puerto Ángel, (Oaxaca), tiene un peligro moderado por marea de tormenta, porque la plataforma continental está ampliamente desarrollada, pero la topografía de la costa es relativamente abrupta. Desde Puerto Ángel hasta Cabo Corrientes (Jalisco) el peligro es bajo porque la plataforma continental es corta y abrupta. En la parte Península de Baja California, de sur a norte, se tiene un riesgo moderado hasta San Quintín, y riesgo bajo hacia el norte, pasando por Ensenada y hasta llegar a Tijuana (CENAPRED, 2007). Los valores obtenidos para la marea de tormenta producto del viento con dirección NW, se utilizaron como datos de entrada para las simulaciones numéricas de todos los factores descritos en este capítulo: marea astronómica, oleaje, viento y marea astronómica, que

son los considerados como generados de la variabilidad del nivel del mar en la zona de estudio.

CAPÍTULO IV:

Riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos
extremos

Capítulo IV: Riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos extremos

En términos de frecuencia estadística, las inundaciones costeras son uno de los riesgos naturales más comunes y ampliamente distribuidos en el mundo (Balica, 2012). Esto se debe, en parte, a que las costas son atacadas por diferentes fenómenos naturales, en su mayoría de origen hidrometeorológico, como el oleaje, el viento y la marea de tormenta causada por fuertes tormentas. Estos eventos extremos producen inundaciones costeras (derivadas del aumento del nivel del mar) y erosión de las playas (como resultado del incremento en la velocidad de la corriente y la energía del oleaje) (Villatoro et al., 2014).

Los riesgos causados por eventos extremos, a menudo se cuantifican para ayudar en la formulación de estándares de diseño de infraestructura costera, ubicación de edificios, gestión de emergencias, e indirectamente, al turismo (McInnes et al., 2003). Por lo tanto, es necesario identificar el riesgo de inundación en áreas propensas a inundaciones con la finalidad de ayudar en la planificación en todas las escalas. Sin embargo, la evaluación de las inundaciones costeras es compleja, debido a la amplia variedad espacial de la dinámica marina, los entornos urbanos en la costa y las medidas de defensa y protección que estén situadas en el área a evaluar (Escudero et al., 2014).

Los modelos hidrodinámicos son herramientas útiles que se han utilizado en varios estudios de caso para evaluar inundaciones costeras (Bates et al., 2005; Gallien, 2016; Gallien et al., 2014; Seenath, 2015; Seenath et al., 2016), ya que utilizan las leyes de la física para describir el flujo del agua en el entorno costero mediante la resolución de las ecuaciones gobernantes de Navier-Stokes. En el modelado hidrodinámico, estas ecuaciones se reducen a las ecuaciones de aguas someras, para hacerlas coincidir con las propiedades específicas del área costera que se estudia. Como resultado, los modelos hidrodinámicos pueden tomar en cuenta una serie de factores que influyen potencialmente en el flujo de agua que puede provocar inundación (fricción, fuerza de Coriolis, presión atmosférica, viento, oleaje, marea, barreras naturales y artificiales, etc.) proporcionando resultados más acertados sobre el peligro y la vulnerabilidad por inundación en una zona específica (Chen et al., 2011; Gallien et al., 2014; Kantha & Clayson, 2000).

Desde hace varias décadas, surgió la necesidad de una Gestión Integral de las Costas (GIC) en donde se incluyan evaluaciones de riesgo que permitan a la sociedad y a los tomadores de decisiones saber cuáles son los peligros que amenazan una localidad y

los aspectos ecológicos y socioeconómicos más importantes que se podrían ver afectados, permitiendo con esto que se apliquen las herramientas adecuadas para el buen manejo de la zona costera (UNESCO, 2001).

Recientemente, la prevención, evaluación y manejo de los eventos de inundación en la zona costera se ha convertido en un tema de gran interés, ya que ha incrementado la frecuencia e intensidad de las inundaciones extremas registradas en todo el mundo (EM-DAT, sf), debido a que nos encontramos en un momento de cambio en la frecuencia, magnitud y duración de los fenómenos climáticos (Nicholls, 2002). Sin embargo, es importante que las evaluaciones estén enfocadas en las características locales de la zona a evaluar, tomando en cuenta las características fisiográficas, los peligros, y el posible riesgo, sin asumir que todas las costas deben reaccionar igual ante fenómenos establecidos como peligrosos.

En Ensenada, se cuenta con un Atlas de Riesgos (UABC & IIO, 2012) que describe los peligros que amenazan al municipio y la vulnerabilidad del mismo. Sin embargo, la información sobre peligros de origen marino es prácticamente inexistente, ya que las inundaciones de las que se tiene registro, han sido principalmente de origen fluvial.

Debido a esto, surge la necesidad de evaluar la variabilidad del nivel del mar en la Bahía de Ensenada, para establecer zonas propensas a inundación costera y el posible riesgo físico y/o socioeconómico.

En este trabajo, el riesgo queda definido como la combinación de la probabilidad y las consecuencias de la ocurrencia de un peligro, expresado de la forma: $R = P * D$, donde: P, es la probabilidad de ocurrencia de un evento; y D, hace referencia a las consecuencias, en términos de daños o pérdidas, sobre las entidades físicas y socioeconómicas expuestas a la amenaza.

Como peligros o amenazas se considera la suma de aquellos fenómenos que hacen variar el nivel del mar a corto plazo (oleaje, viento, marea astronómica y marea de tormenta) durante eventos extremos asociados a periodos de retorno, los cuales fueron presentados en el capítulo III.

Evaluación del riesgo de inundación en Ensenada

Simulación numérica con MIKE 21/3 FM

Con la finalidad de establecer cuáles son las zonas de la costa que pudieran estar sujetas a inundación debido a la variación en el nivel del mar producto de los eventos hidrometeorológicos extremos presentados en el capítulo III, se aplicó el modelo numérico MIKE 21/3 acoplado FM (módulo hidrodinámico y módulo de oleaje espectral y de malla flexible sus siglas en inglés) para simular las condiciones de oleaje y viento asociadas a diferentes periodos de retorno.

El modelo numérico MIKE 21/3 acoplado FM, es una herramienta muy eficiente que ha sido usada exitosamente en cientos de estudios de inundación costera por más de 35 años. Utilizando MIKE 21/3 acoplado FM, es posible simular la interacción mutua entre el oleaje y los flujos de corrientes a través de sus módulos hidrodinámico y de oleaje.

Módulo hidrodinámico

En el módulo hidrodinámico se simula la variabilidad del nivel del mar y los flujos de agua en respuesta a los forzamientos que se presentan en la costa. El sistema de modelado se basa en la solución numérica de las ecuaciones bidimensionales para aguas someras RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). El modelo está conformado por las ecuaciones de continuidad y de momento, además considera temperatura, salinidad y densidad del agua. La discretización espacial de las ecuaciones se realiza utilizando un método de volumen finito centrado en la celda. El dominio espacial está discretizado por la subdivisión continua de celdas que no se superponen. En el plano horizontal, se usa una malla no estructurada conformada por triángulos sobre la cual se utiliza un solucionador aproximado de Riemann para el cálculo de flujos convectivos que permite manejar una solución discontinua. Dentro de este módulo se obtienen resultados de inundación, dispersión de momentum, estrés en el fondo, estrés por el viento, potencial de marea, etc. (DHI Water & Environment, 2017).

Módulo de oleaje

El módulo de oleaje simula el crecimiento, el decaimiento y la transformación de las olas en la costa, y el oleaje generado por el viento en aguas profundas. El sistema de modelado incluye dos formulaciones diferentes: i) *formulación paramétrica direccional desacoplada*, basada en una para parametrización de la ecuación de conservación de movimiento de la onda. La parametrización se realiza en el dominio de la frecuencia introduciendo el momento cero y el primer momento del espectro de acción de la onda como variables dependientes. ii) *formulación completamente espectral*, basada en la ecuación de conservación de movimiento de las olas, donde el espectro de acción de onda de frecuencia direccional es la variable dependiente. Dentro de este módulo, se

toman en cuenta fenómenos físicos como el crecimiento de las olas por acción del viento, efecto de la variación de la profundidad sobre la ola, inundación por oleaje, interacción no lineal onda-onda, entre otros (DHI Water & Environment, 2017).

Para las simulaciones de inundación, se requiere como datos de entrada, las condiciones hidrodinámicas y los parámetros de oleaje que se desea modelar, además de la topografía del terreno en la costa y la batimetría.

Para generar la batimetría, se utilizaron los datos de profundidad para la Bahía de Ensenada, proporcionados por la Secretaría de Marina (SEMAR), a partir de los cuales se generó un archivo raster utilizando herramientas de geoprocésamiento. La topografía del terreno se obtuvo mediante datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) otorgados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). A partir de los datos LiDAR y utilizando herramientas de geoprocésamiento, se generó un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución en la horizontal de 5 m y 1 m en la vertical. El raster generado para la batimetría y el MDE se unieron en un solo raster para generar la topobatimetría de la zona. Dicho raster se convirtió en un archivo xyz que contenía la información batimétrica y topográfica para la zona de estudio. Este archivo sirvió de entrada para la simulación de inundación (Figura 31).

Las condiciones hidrodinámicas y los parámetros del oleaje que se usaron como datos de entrada para la simulación, se resumen en la Tabla VII. Los valores de altura significativa (H_s), periodo pico de ola (T_p) y dirección de incidencia (Dir°) del oleaje; velocidad y dirección del viento correspondiente a los eventos extremos asociados a periodos de retorno $Tr= 2, 5, 10, 25$ y 50 años, los cuales se presentaron en los resultados de la caracterización del oleaje y viento del capítulo III.

Además de la caracterización del viento y el oleaje, se incluyó en la simulación, los valores de marea astronómica y marea de tormenta.

La marea astronómica se simuló como parte del módulo hidrodinámico, la serie de marea simulada con la herramienta *Tidal Prediction of Heights* del Global Tide Model, un módulo dentro del modelo MIKE que permite generar las series de tiempo de marea astronómica con resolución de $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ y considera 10 componentes de marea (semidiurna: M2,S2,K2,N2, diurna: S1,K1,O1,P1,Q1 y en aguas someras: M4) (DHI Water & Environment, 2017). Los datos de marea meteorológica que se utilizaron como datos de entrada para la simulación, se muestran en la tabla VIII. Estos datos fueron sumados a la marea astronómica para generar la marea de tormenta.

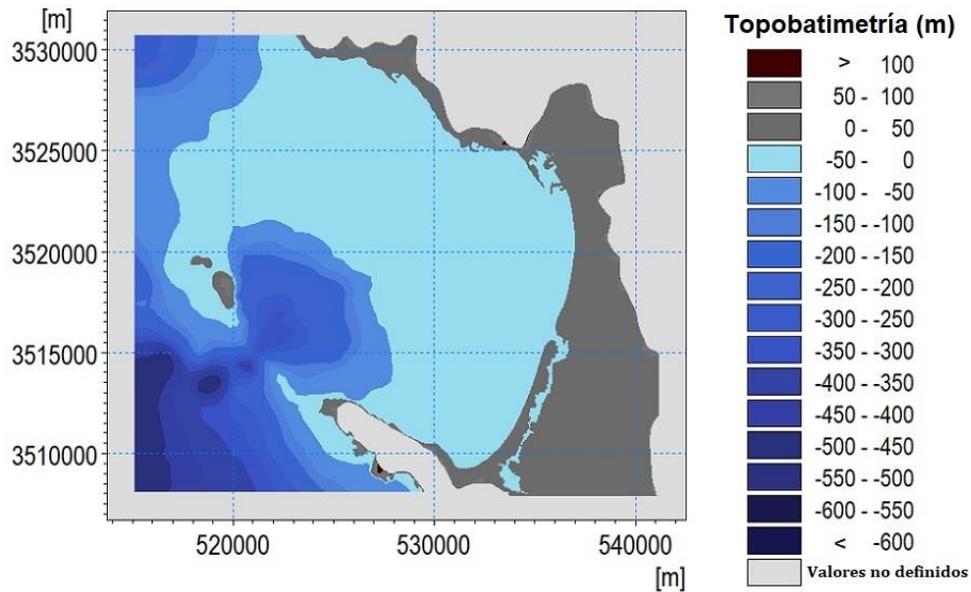


Figura 31. Configuración topobatemétrica de la Bahía de Ensenada. Cerca del 75% del área presenta una profundidad menor a 50 m y el 25% restante forma parte del cañón submarino de la bahía.

Tabla VII. Datos de entrada de oleaje y viento para la simulación numérica de inundación en la Bahía de Ensenada.

<i>Periodo de retorno (años)</i>	Hs (m)	Periodo pico (segundos)	Dirección de incidencia (Dir °)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección de incidencia del viento (Dir °)
2	4.9	15	WNW 290	13.7	NW 315
5	5.5			15	
10	6			15.7	
25	6.5			16.5	
50	6.7			17.2	

Tabla VIII. Valores de marea meteorológica utilizados como datos de entrada para la simulación de inundación. Los máximos niveles se presentan con los vientos procedentes del NW.

Periodo de retorno, <i>Tr</i> (años)	Velocidad viento (m/s)	Marea de tormenta (m)				
		W	WNW	NW	NNW	N
2	13.7	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3
5	15	0.3	0.5	0.75	0.6	0.5
10	15.7	0.4	0.6	0.8	0.7	0.6
25	16.5	0.5	0.7	0.95	0.8	0.7
50	17.2	0.5	0.8	1	0.9	0.8

Otras condiciones que se consideraron en la simulación fueron el tamaño de celda y la rugosidad. El tamaño de celda de la malla fue de 5 a 20 m, dependiendo del área de interés, por ejemplo, en la zona costera, la malla se refinó a 5 m, mientras que en aguas profundas se mantuvo un tamaño de celda de 20 m (Figura 32). La rugosidad se estableció por medio del coeficiente de Manning y el mapa de uso de suelo y vegetación del INEGI. Según el tipo de uso de suelo o vegetación, se aplica un valor al coeficiente de Manning, este valor se sacó de tablas de rugosidad (Chow, 1994). Para áreas vegetadas se utilizó $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, para el área agrícola de Maneadero $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, para el estero de Punta Banda $74 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, para áreas urbanas $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, para playas de arena $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, y $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para el mar.

Como resultado de la simulación numérica, el modelo arroja un archivo que contiene el campo de inundación considerando los factores que hacen variar el nivel del mar en la zona de estudio. Utilizando rutinas de MATLAB se obtuvieron los parámetros estadísticos (mínimos, máximos, promedios, desviación estándar, etc.) del nivel del mar como resultado de la simulación. Respecto a la inundación, el parámetro estadístico más importante a considerar es el valor máximo (DHI Water & Environment, 2017), por lo que, se generó un nuevo archivo que solo contenía los valores máximos de nivel del mar. Posteriormente, esos valores máximos se utilizaron para generar mapas de inundación mediante herramientas de geoprocésamiento.

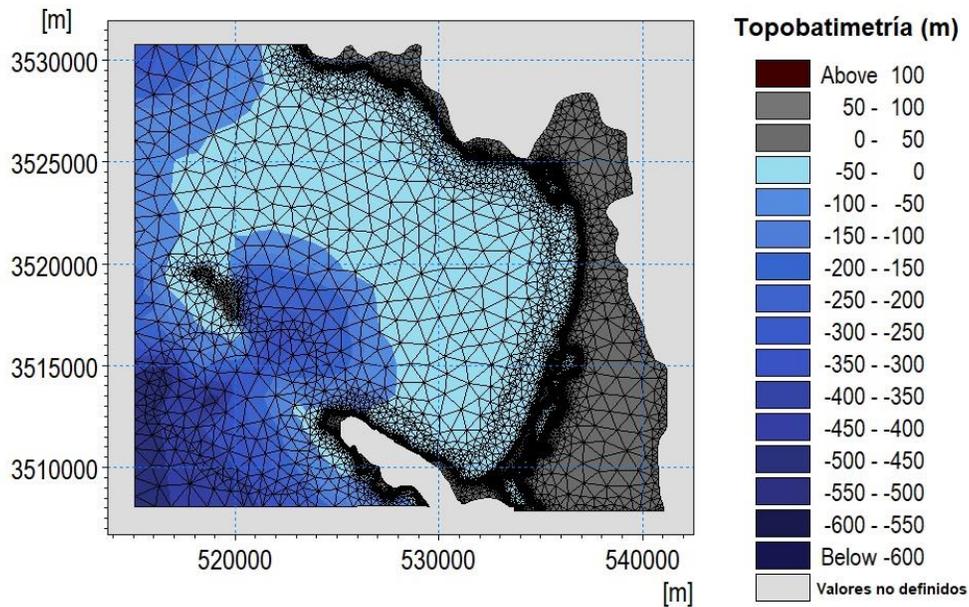


Figura 32. Topobatemetría y malla de celda triangular para la simulación en MIKE 21/3. En la línea de costa la malla se refinó hasta 5 m, mientras que en otras zonas se mantuvo que en 20 m.

Mapas de inundación costera

Para la presentación de los resultados de inundación, la zona de estudio se dividió en cuatro secciones (Figura 33). El área norte abarca desde San Miguel hasta la curva del Mosquito, al norte del puerto de Ensenada. Esta zona incluye el puerto de El Sauzal. El área centro se extiende desde el puerto de Ensenada hasta la boca del estero de Punta Banda. La zona sur comprende desde la boca del estero hasta playa La Jolla, una playa que se utiliza principalmente para acampar. La zona interior del estero de Punta Banda cubre desde la boca de acceso al canal hasta el área sujeta a inundación por el intercambio de la marea, además del área adyacente al Valle de Maneadero.

Se obtuvieron mapas de inundación para los periodos de retorno $Tr= 2, 5, 10, 25$ y 50 años. Los resultados para el $Tr= 2$ muestran que el área norte de la bahía no se ve afectada significativamente por la variabilidad del nivel del mar durante eventos extremos. Sin embargo, en el área centro (playas Coronado, Nueva España, Mona Lisa, El Faro y el hotel Estero Beach), la mancha de inundación afecta la infraestructura situada en primera línea de playa con láminas de inundación menores a un metro. Para el área sur, la zona más afectada por inundación es la barra de arena del estero de Punta Banda en la parte adyacente a la boca del estero, ya que el incremento del nivel del mar invade la barra y ocasiona pérdida de sedimento. Los desarrollos habitacionales situados sobre la barra de arena, no se ven afectados, ya que la elevación del nivel del

mar es menor a la cota topográfica en la que éstos se sitúan. Por último, para el área interior del estero de Punta Banda, la mancha de inundación cubre la planicie de marea y afecta la barra de arena presentando láminas de inundación cercanas a un metro de profundidad. A pesar de esto, la zona agrícola del Valle de Maneadero no se ve afectada directamente, sin embargo, la intrusión salina podría potenciarse debido a la extensión de agua marina producto de la inundación.



Figura 33. Secciones definidas en el área de estudio para la presentación y el análisis de los resultados de inundación.

Se hizo una comparación entre los resultados de inundación obtenidos para el $Tr= 2$ años y los resultados de inundación de los $Tr= 5, 10$ y 25 años, y no se presenta variación significativa en las zonas inundables. No obstante, los resultados correspondientes al $Tr= 50$ años muestra variaciones importantes comparado con $Tr= 2$ años. Por lo que, este capítulo está enfocado en presentar a detalle las comparaciones entre los resultados de inundación para el $Tr= 2$ y 50 años en las zonas en las que se muestran las mayores variaciones de inundación entre periodos para cada área en la que fue dividida la bahía.

Área norte

La geomorfología de esta área está dominada por cantiles que varían en altura y composición litológica, lo que se puede observar en las características de las playas de la bahía, ya que estos cantiles aportan sedimento al sistema. Los cantiles están conformados, principalmente, por sedimentos finos y poco consolidados además de gravas y cantos rodados (Cruz-Colín & Cupul-Magaña, 1997).

Para el $Tr=2$ años, no se presenta inundación en esta zona (Figura 34), en parte se debe a la altura de los cantiles que predominan en el área y los muros de protección que los habitantes de la zona han construido frente a sus casas para protegerse del embate de las olas, ya que muchos de los habitantes se han visto sorprendidos por la rápida erosión de los cantiles (Cruz-Colín & Cupul-Magaña, 1997). Por otro lado, hay zonas en donde se encuentran pequeñas playas de arena y cantos rodados que sirven como amortiguamiento del oleaje y protegen las bases de los cantiles.

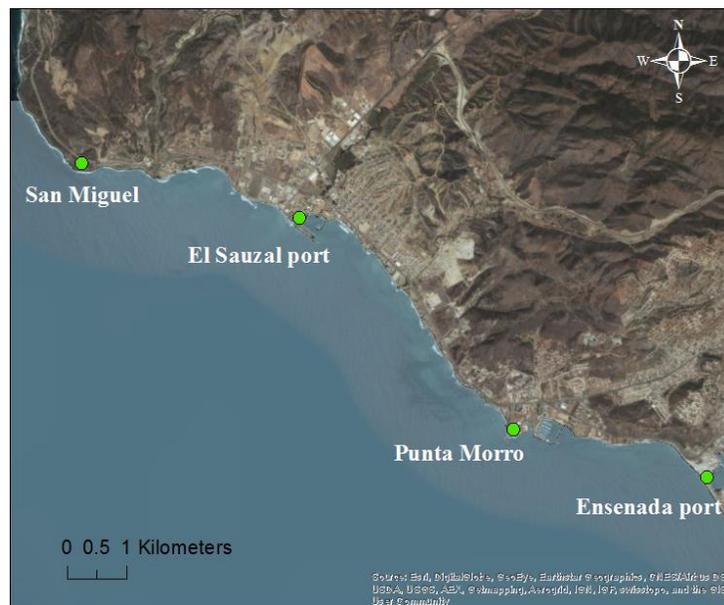


Figura 34. Área norte. Simulación de inundación para el $Tr=2$ años en San Miguel, El Sauzal, Punta Morro y la zona norte del puerto de Ensenada.

Una comparación entre los resultados de inundación para los $Tr=2$ y 50 años se muestra en la figura 35. Para el $Tr=2$ años no se presenta inundación, pero para $Tr=50$ años, la mancha de inundación se extiende hasta 15 m tierra dentro afectando algunas zonas en donde se localiza infraestructura habitacional.

El nivel máximo de inundación raramente alcanza 0.5 m, pero la mayoría de la infraestructura habitacional está localizada sobre los cantiles, los cuales están expuestos al embate de las olas, por lo que, la variabilidad del nivel del mar durante eventos extremos podría propiciar o incrementar la erosión en la base de los cantiles. Como es el caso del fraccionamiento residencial Santorini y la zona costera frente al fraccionamiento Colinas del Mar, en donde la mancha de inundación se extiende sobre la base del cantil alcanzando láminas de inundación de hasta 1.5 m.

Es importante mencionar que, debido a que los cantiles se componen de material fino y pobremente consolidado, los cantiles podrían ser propensos a deslizamientos debido a la erosión en la base durante eventos de inundación.

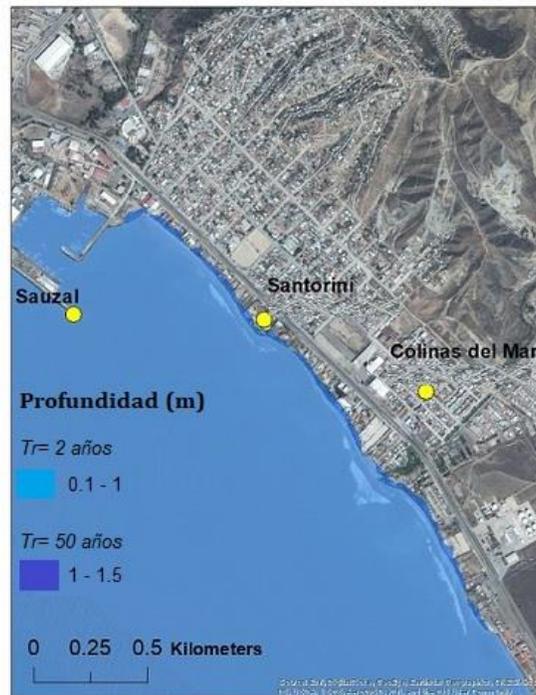


Figura 35. Mancha de inundación para un $Tr= 2$ y 50 años en la zona del fraccionamiento residencial Santorini y la franja costera frente al fraccionamiento Colinas del Mar, en el área norte de la bahía.

Área centro

El área centro de la Bahía de Ensenada incluye el puerto de Ensenada, playa Hermosa, una playa de arena que se utiliza con fines recreativos por el turismo local y sobre la cual se asienta infraestructura habitacional; las playas Corona, Nueva España, Mona Lisa y El Faro, estas cuatro playas también poseen infraestructura habitacional y estructuras de protección costera construida por los habitantes de la zona para proteger la base de los cantiles del embate de las olas. Esta área incluye también el hotel Estero Beach, uno de los hoteles más importantes de la ciudad, localizado en la boca del Estero de Punta Banda (Figura 33).

Se presenta una lámina de inundación menor a 1 m para un $Tr= 2$ años. Sin embargo, debido a que la infraestructura habitacional está asentada sobre la cota topográfica de 4 m, no presentan riesgo de inundación. Utilizando herramientas de geoprocésamiento se trazó un perfil A-B para mostrar la relación entre el nivel cero (línea punteada), la lámina de inundación y la elevación topográfica de la zona (Figura 34). La lámina de

inundación alcanza la cota topográfica de los 2 m, mientras que la infraestructura se localiza en la cota de los 4 m, por lo que no se tiene riesgo de inundación.

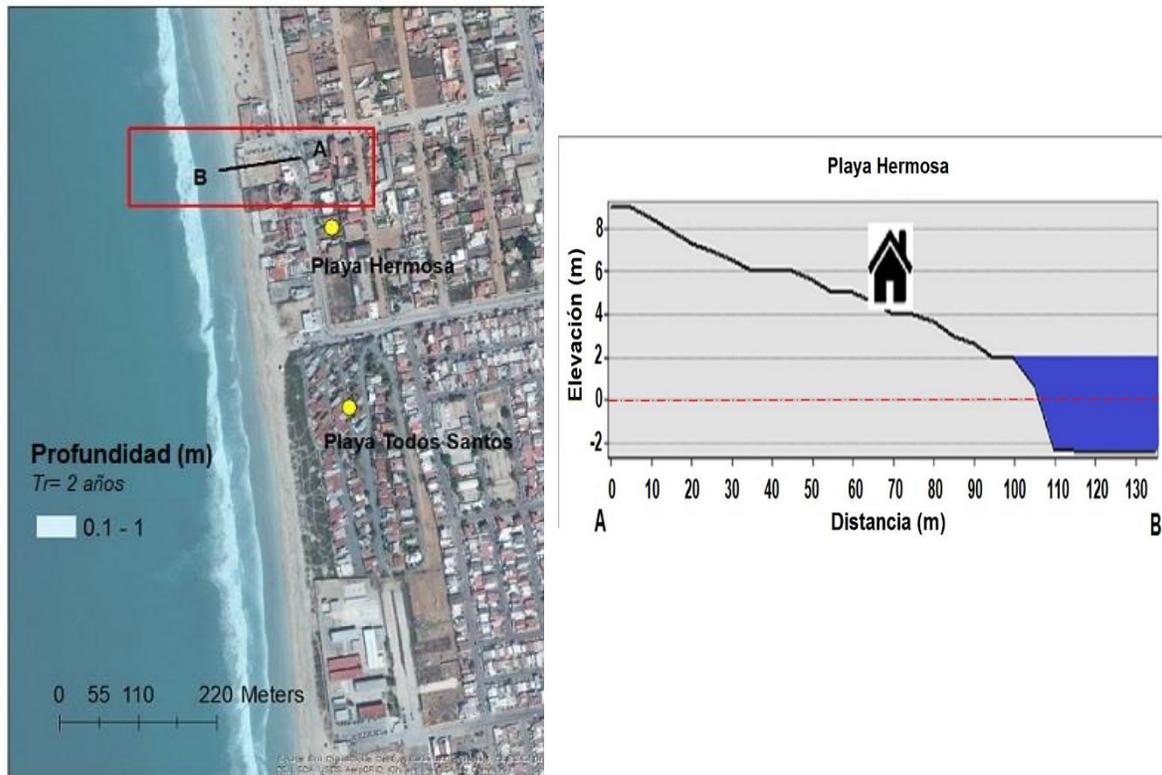


Figura 36. Playa Hermosa. El perfil A-B muestra el nivel de inundación que alcanza y elevación topográfica con respecto al nivel cero. El nivel del mar alcanza la cota topográfica.

Comparando los resultados de los $Tr= 2$ y 50 años se observa que para 50 años la mancha de inundación penetra tierra adentro hacia el sur de playa Hermosa, provocando quizá pérdida de sedimento. A pesar de esto, el nivel del agua no muestra variaciones, manteniéndose en 0.5 m de profundidad. No se presenta daño a la infraestructura debido a que el nivel del agua no alcanza la elevación topográfica de 4 m que es en donde ésta se sitúa (Figura 37). Adicionalmente, los efectos de erosión podrían significar un peligro para la zona durante eventos extremos.



Figura 37. Área de playa Hermosa. La mancha de inundación para el $Tr= 50$ años se extiende sobre la playa (particularmente hacia el sur de playa Todos Santos), pero se mantiene por debajo del nivel topográfico sobre el que se ubica la infraestructura habitacional.

Playas Corona, Nueva España y Mona Lisa

En esta zona la inundación es un problema crítico. Para un $Tr= 2$ años, la lámina de inundación alcanza la elevación topográfica de los 4 m, donde se sitúa la infraestructura habitacional, con una profundidad alrededor de 0.5 m decreciendo hasta 0.2 m mientras avanza tierra adentro.

Para un $Tr= 50$ años la mancha de inundación también se extiende tierra adentro sobre la cota de elevación de 4 m con profundidades que decrecen hasta 0.3 m mientras avanza tierra adentro (Figura 38).

Igual que en los casos anteriores, se trazaron tres perfiles A-B para mostrar la relación entre el nivel del agua y la topografía de la zona. Se puede observar que las tres playas son rebasadas por el incremento del nivel del mar durante eventos extremos siendo la más afectada la playa Mona Lisa (Figura 39).



Figura 38. Comparación entre los resultados de inundación $Tr= 2$ y 50 años para las playas Corona, Nueva España y Mona Lisa. El nivel del agua alcanza la cota topográfica de 4 m con una lámina de inundación que se extiende tierra adentro para ambos periodos de retorno con profundidades menores a 0.5 m.

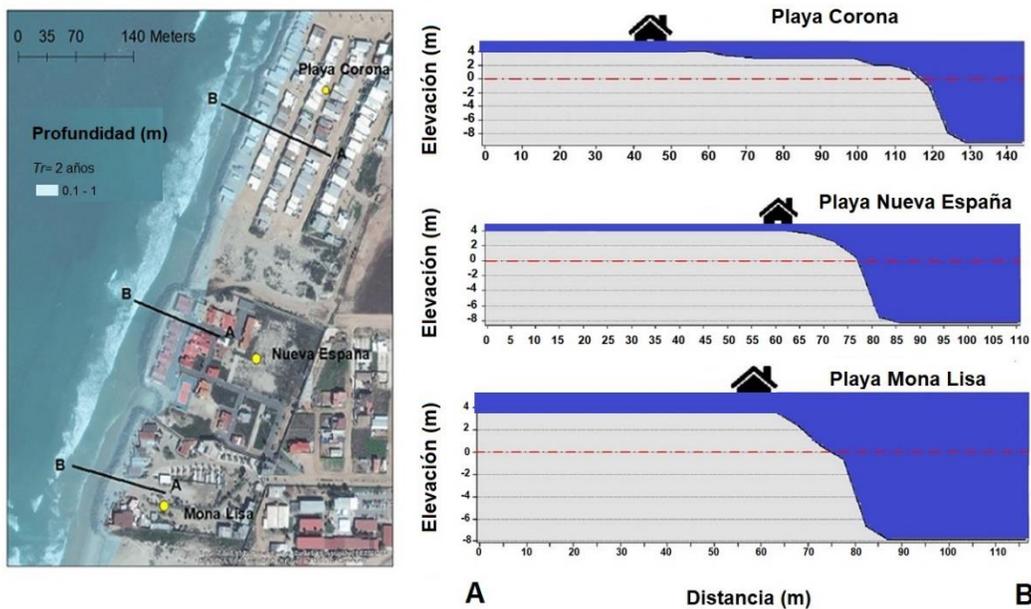


Figura 39. Perfiles A-B para las playas Corona, Nueva España y Mona Lisa para un $Tr= 2$ años. El nivel del agua alcanza la elevación topográfica de 4 m generando inundación con profundidades de hasta 1 m en las tres playas.

Montoya et al., (1991) realizaron un estudio donde definieron las zonas propensas a erosión e inundación debido al aumento del nivel del mar en la franja de playa arenosa ubicada en el centro de la bahía. El método que siguieron fue el cálculo del retroceso de la línea de costa según una adaptación a la Regla de Bruun.

De acuerdo a las diferentes simulaciones que generaron, el máximo retroceso de la línea de costa podría ser de 203.2 m en el año 2100 con un aumento del nivel medio del mar de 1.5 m produciendo un proceso erosivo que se sumaría al aumento del nivel medio del mar. Además, mencionan que las zonas de playa con poca altura como Corona y Mona Lisa podrían ser susceptibles a inundación. Esto coincide con los resultados aquí presentados, aunque los métodos utilizados sean completamente diferentes.

Playa El Faro

En la playa conocida como El Faro, para un $Tr= 2$ años, el nivel del agua alcanza la cota topográfica de 3 m, pero no genera inundación ya que la infraestructura de la zona se sitúa sobre la cota de 4 m, por lo que no se presenta daño por inundación. Sin embargo, para el $Tr= 50$ m, el nivel del agua excede la cota de 3 m generando una lámina de inundación de 0.5 m (Figura 40).

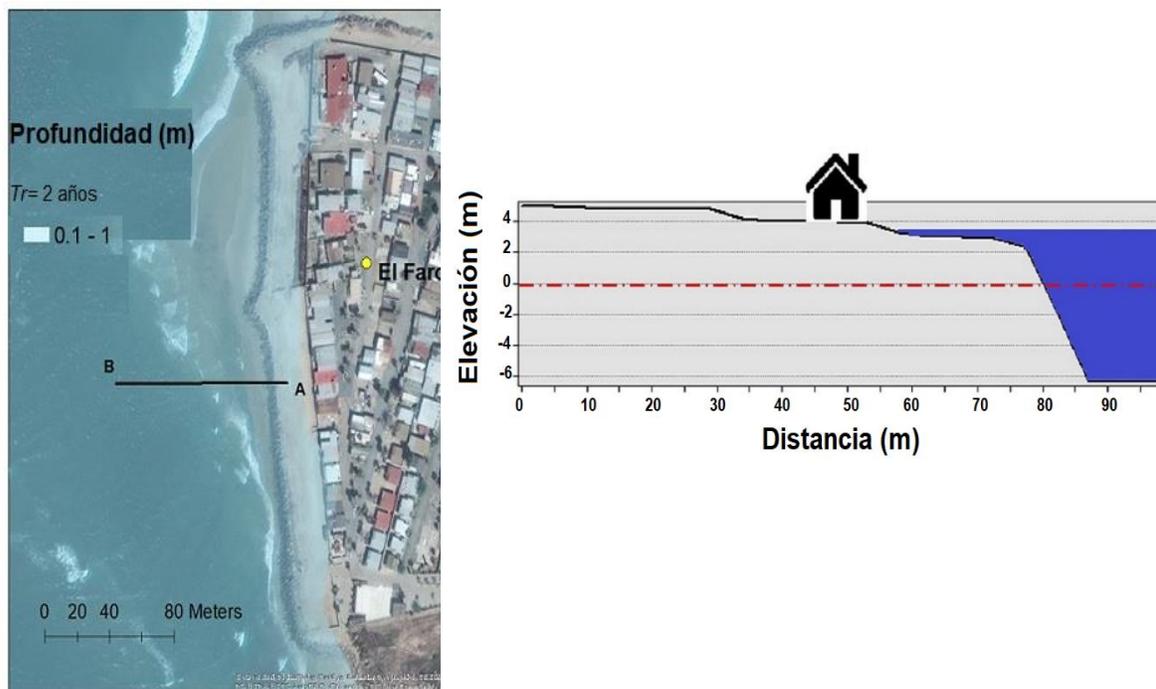


Figura 40. Playa El Faro, resultados de inundación para un $Tr= 2$ años muestran que el nivel del agua no alcanza la cota de 4 m sobre la que se sitúa la infraestructura.

Hotel Estero Beach

El hotel Estero Beach es uno de los principales hoteles de la ciudad de Ensenada. Se localiza en la boca del estero de Punta Banda frente a la barra del mismo nombre. Para esta zona, los resultados de inundación para el $Tr= 2$ años muestran que el nivel del agua excede la cota topográfica de 3 m sobre la que se sitúa el hotel, pero la lámina de inundación raramente alcanza 0.4 m de profundidad (Figura 41).

Para el $Tr= 50$ años, la lámina de inundación alcanza 0.6 m de profundidad en algunas zonas del hotel cercanas al mar y decrece hasta 0.2 m tierra adentro (Figura 42). Por lo tanto, se puede esperar daño por inundación en el hotel para ambos periodos de retorno, ya que durante eventos extremos el incremento del nivel del mar se extiende tierra adentro.

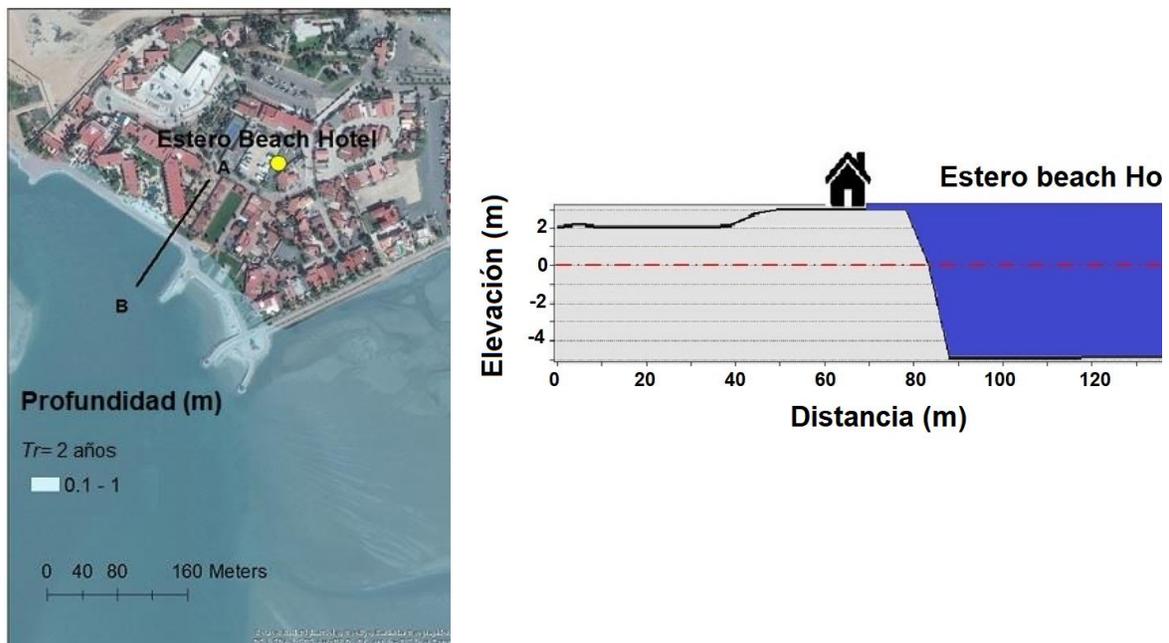


Figura 41. Hotel Estero Beach, el nivel del agua alcanza la cota topográfica de 3 m generando una lámina de inundación de 0.4 m para un $Tr= 2$ años.



Figura 42. Mancha de inundación para la zona del hotel Estero Beach para el $Tr= 50$ años. La mancha de inundación se extiende tierra adentro con profundidades entre 0.2 y 0.6 m, siendo más crítico que para el $Tr= 2$ años.

Área sur

El área sur de la bahía fue dividida en tres zonas para la mejor presentación de los resultados (Figura 43). *Zona 1:* corresponde a la parte norte de la barra de arena cercana a la boca del estero de Punta Banda, conocida como Punta Estero. Esta barra mide 8 km de largo y 1 km de ancho, que lo separa de la bahía. Constituida de arenas de cuarzo bien clasificadas cuyo diámetro medio es de 2Φ , la barra cuenta con numerosas dunas y presenta hacia el mar una playa moderadamente ancha de ~250 m de ancho de pendiente suave (2%) lo que la hecho sumamente atractiva para actividades recreativas y la construcción de infraestructura turística (Martinez-Diaz-De-Leon et al., 2008). *Zona 2:* es la región de playa sobre la barra frente al mar en la cual se sitúa la infraestructura turística. *Zona 3:* playa la Jolla, una playa de arena que se usa como zona para acampar, principalmente.

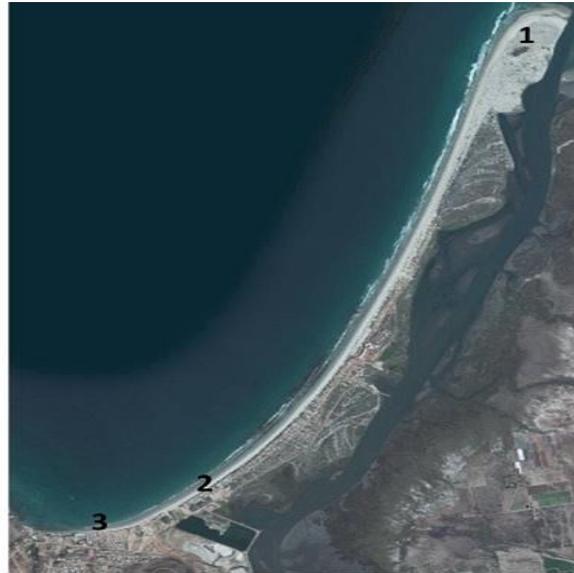


Figura 43. Área sur de la bahía de Ensenada dividida en tres secciones: 1) Punta Estero, 2) infraestructura habitacional y 3) playa La Jolla.

Zona 1: Punta Estero

La barra de arena, la cual separa al estero de Punta Banda del mar, se formó (junto con el estero) durante la última variación del nivel del mar y ha evolucionado como consecuencia de los procesos oceanográficos que ocurren en el área (Aranda & Guardado, 1990). Esta barra ha crecido en la parte norte en tiempos recientes, incluso, ha llegado a cerrar el canal de entrada en la boca del estero en el pasado, sin embargo, parece haber alcanzado el equilibrio en los últimos años (Martinez-Diaz-De-Leon et al., 2008).

La figura 44 muestra el nivel del mar bajo condiciones normales (izquierda), condiciones extremas para $Tr= 2$ años (centro) y condiciones extremas $Tr=50$ años (derecha). Para ambos periodos de retorno, el nivel del mar cubre la barra de arena en Punta Estero con láminas de inundación entre 0.1 y 1 m, sin embargo, la mancha de inundación se extiende sobre un área mayor en condiciones extremas de $Tr= 50$ años. Esto podría ocasionar pérdida de arena debido al incremento del nivel del mar y erosión crítica.



Figura 44. Comparación entre condiciones normales y la mancha de inundación producto de condiciones extremas para $Tr= 2$ y 50 años. La mancha de inundación se extiende sobre la barra hasta con 1 m de profundidad.

Zona 2: área de infraestructura turística

Aproximadamente el 70% de la longitud de la barra de arena del estero de Punta Banda se encuentra ocupada por infraestructura habitacional/vacacional (CONANP, 2017a). La mayoría de las propiedades que aquí se sitúan pertenecen a extranjeros, los cuales habitan el área durante temporadas vacacionales (IMIP, 2015), por lo que la mayor parte del año se encuentran desocupadas. De hecho, en esta área, se encuentran desarrollos habitacionales que están abandonados en su totalidad. Para el $Tr= 2$ años, el nivel del mar genera una lámina de inundación de hasta 1 m de profundidad, pero esto no afecta a la infraestructura debido a que se encuentran asentados sobre la cota de elevación de 5 m (Figura 45).

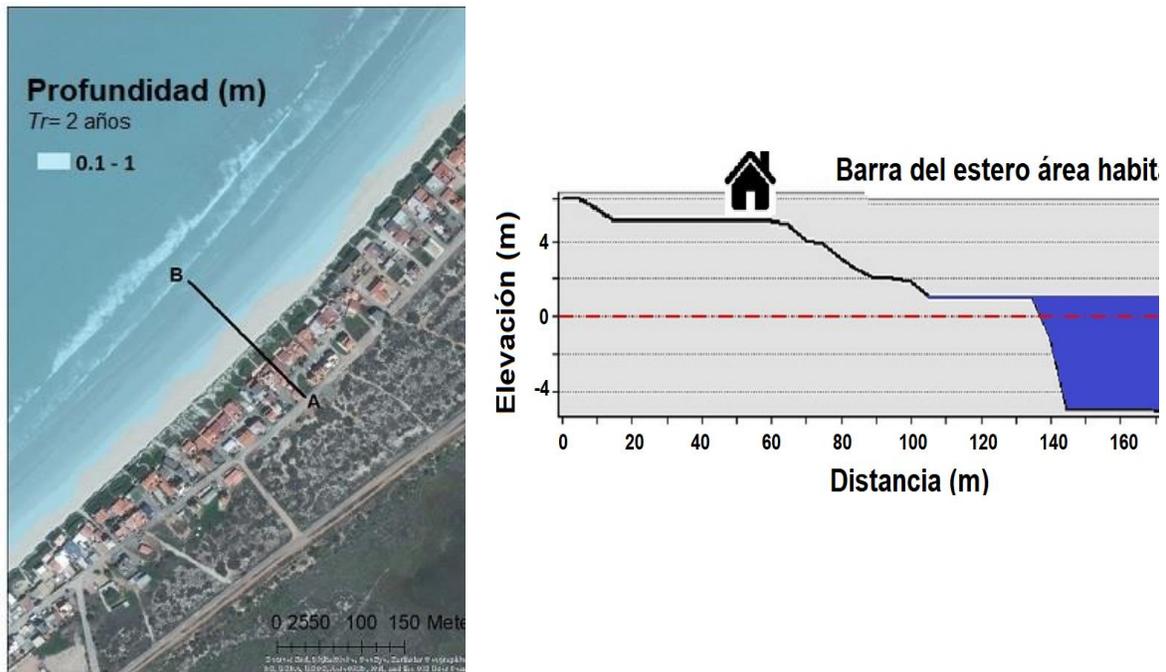


Figura 45. Desarrollos turísticos sobre la barra del estero de Punta Banda. El nivel del mar genera una lámina de inundación de 1 m de profundidad, insuficiente para provocar daño a la infraestructura asentada sobre la cota topográfica de 5 m.

A diferencia de los resultados $Tr= 2$ años, la lámina de inundación para $Tr= 50$ años excede la cota topográfica de 5 m en algunas zonas con profundidades cercanas a 1 m. Con las condiciones extremas de 50 años, aproximadamente el 80% de la barra se inunda debido al incremento del nivel del mar. De tal manera que, la afectación causada por la lámina de inundación, incrementa significativamente si se considera el potencial erosivo producto del incremento del nivel del mar sobre las dunas en Punta Estero (A) principalmente, ya que la parte central de la barra no se ve afectada por dicho incremento (B), pero hacia el sur de la barra, el nivel del mar incluso sobre pasa la barra con láminas de inundación de 0.5 m de profundidad, siendo esta parte la más estrecha de la barra, por lo que sería posible que la barra se “rompiera” como consecuencia de las condiciones hidrodinámicas y el oleaje extremo para $Tr= 50$ años (Figura 46).

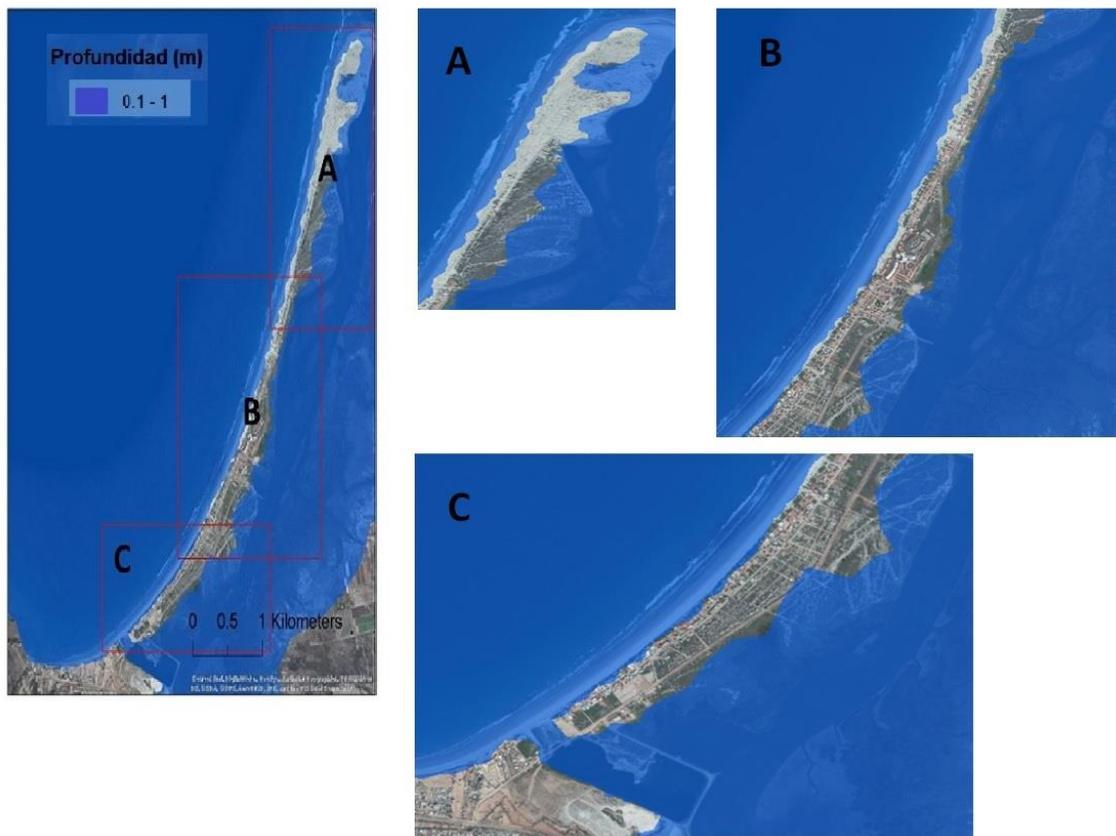


Figura 46. Lámina de inundación para eventos extremos en la barra del estero de Punta Banda. A) Punta Estero presenta el mayor potencial erosivo; B) la zona centro no se perjudica debido a la topografía; y C) es el área mayormente inundada debido a las condiciones hidrodinámicas y oleaje para $Tr= 50$ años.

Zona 3: Playa La Jolla

La Jolla es una playa utilizada con fines recreativos por turistas locales y extranjeros, ubicada al sur de la barra de arena del estero de Punta Banda y en las inmediaciones de la península de Punta Banda.

Para esta zona, los resultados de inundación $Tr= 2$ años muestran una lámina de inundación que se extiende sobre la cara de la playa alcanzando la cota topográfica de 1 m, sin invadir la cota de 2 m en donde se sitúan algunos desarrollos turísticos (Figura 47). Para el $Tr= 50$ años, la lámina de inundación excede la cota de 2 m generando una lámina de inundación de hasta 0.6 m de profundidad sobre la infraestructura cercana a la costa (Figura 48).

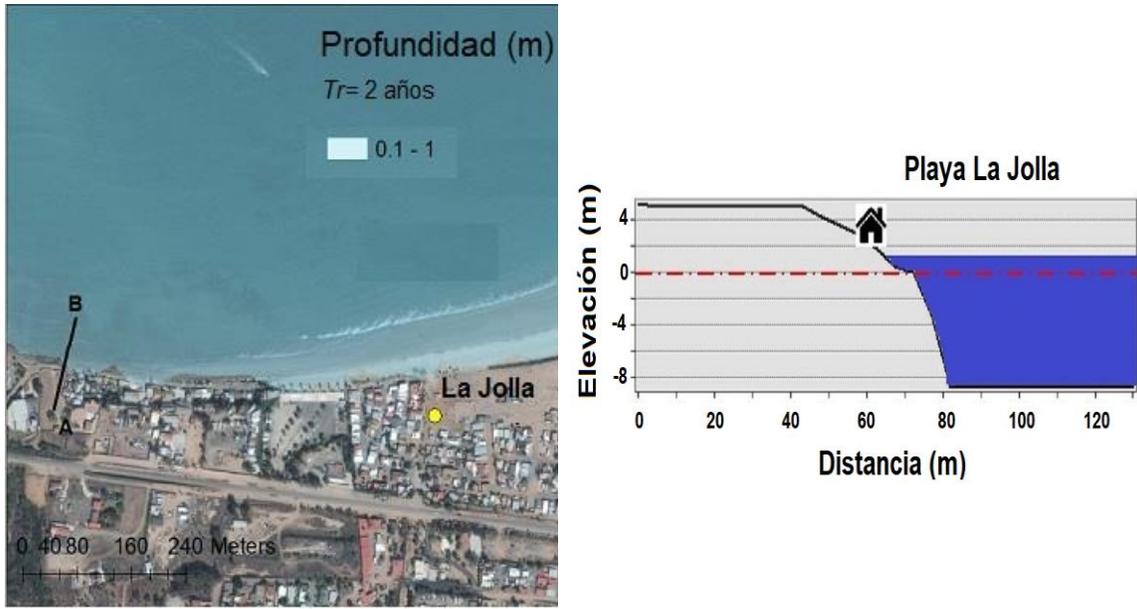


Figura 47. Playa La Jolla. El nivel del mar genera una lámina de inundación que alcanza la cota topográfica de 1 m, quedando por debajo de la cota de 2 m sobre la cual se sitúa la infraestructura.

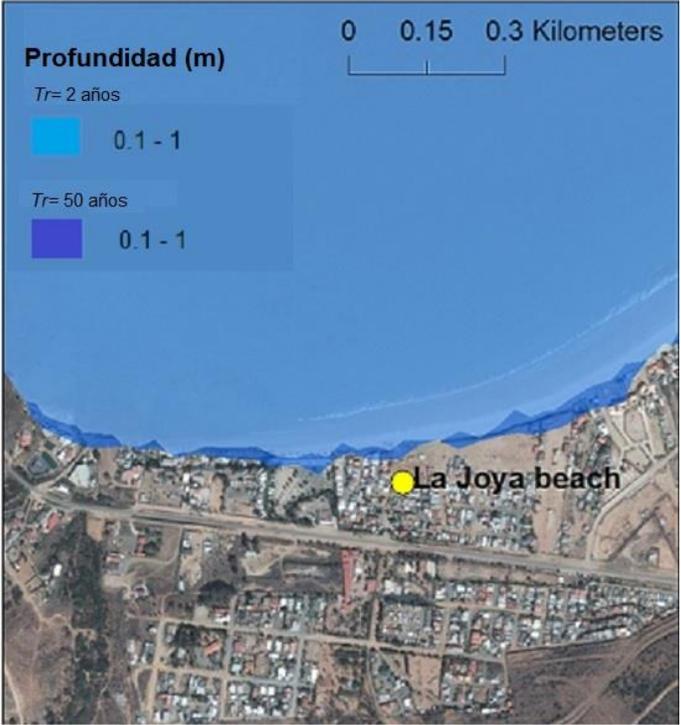


Figura 48. Comparación entre la mancha de inundación para los $Tr= 2$ y 50 años en playa La Jolla. Para 50 años la mancha de inundación sobrepasa la cota de 2 m extendiéndose tierra adentro.

Estero de Punta Banda

El estero de Punta Banda es un humedal reconocido como sitio RAMSAR (humedal de importancia internacional) desde febrero de 2006. Es una laguna costera en forma de L de 8 km de longitud y en promedio 0.35 km de ancho (CONANP, 2017a). En esta área no se observan diferencias significativas entre las láminas de inundación para $Tr= 2$ y 50 años, ya que, para ambos periodos, la profundidad de inundación es menor a 1 m extendiéndose sobre la planicie de inundación resultado del intercambio de la marea. En algunas zonas, al sur del estero, la mancha de inundación apenas alcanza área de cultivos (Figura 49 y 50).

Es importante considerar que, aunque no se presenta inundación significativa en el Valle de Maneadero, los acuíferos presentan contaminación por intrusión salina debido a la sobreexplotación del subsuelo, por lo que esta contaminación podría agravarse producto de la inundación provocada por el incremento del nivel del mar durante eventos extremos.

Condiciones normales



$Tr= 2$ años



Figura 49. Comparación entre condiciones normales y condiciones extremas $Tr= 2$ años para la zona del estero de Punta Banda. Se muestra que la mancha de inundación se extiende sobre la planicie de inundación con profundidades menores a 1 m.

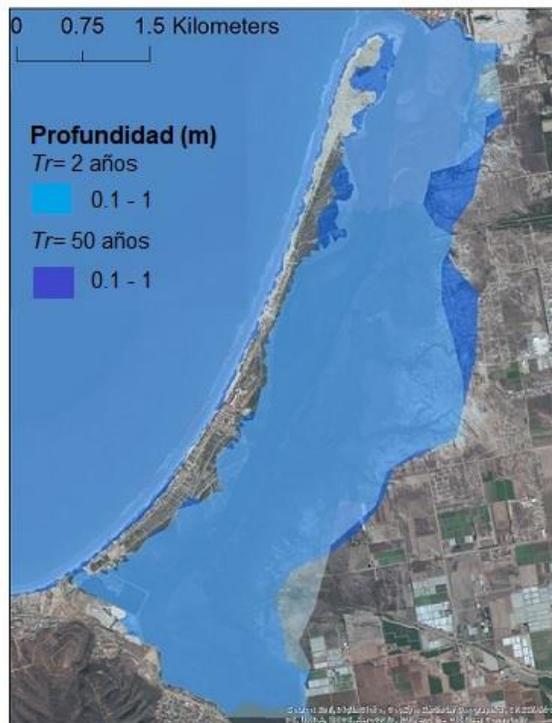


Figura 50. Mancha de inundación para el estero de Punta Banda, no se presenta diferencia significativa entre periodos de retorno.

El área con menor riesgo de inundación es el norte de la bahía, por la predominancia de cantiles de mayor altura sobre los cuales se sitúa la infraestructura de la zona. Por el contrario, la zona de mayor riesgo de inundación es el área centro y sur de la bahía, principalmente las playas Corona, Nueva España, Mona Lisa y El Faro, y la barra de arena de Punta Banda, pero bajo condiciones extremas de $Tr= 50$ m.

En el estero de Punta Banda, el incremento del nivel del mar podría agravar en el problema de intrusión salina que se presenta en la zona y repercutir disminuyendo el área agrícola disponible.

Con base en los resultados presentados en este capítulo, se puede establecer que el riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos extremos de origen de marino en la Bahía de Ensenada es bajo, entendiendo como riesgo la combinación de la probabilidad y las consecuencias de la ocurrencia de un peligro, ya que, en la zona de estudio, las consecuencias no son representativas y las entidades físicas que se ven afectadas no son áreas socioeconómicas importantes para la ciudad. Además, la topografía de la zona juega un papel sumamente importante en el riesgo por inundación, ya que la mayor parte de los asentamientos o infraestructura habitacional y/o vacacional están situados sobre las cotas de 3 a 5 m, por lo que no se considera un

riesgo potencial. Sin embargo, debido al tipo de sedimento que predomina en la costa, los efectos de la erosión podrían ser considerables.

Es importante considerar que estos resultados están basados en datos históricos y proyecciones estadísticas, por lo que no se considera ningún efecto producto del cambio climático. Adicionalmente, se consideran las características fisiográficas actuales de la línea de costa en la bahía, así que, mientras la costa no se modifique, estos resultados servirán de referencia durante los próximos 50 años para ayudar en el manejo de la costa en Ensenada considerando como peligro el incremento del nivel del mar por eventos hidrometeorológicos extremos. Cualquier futura modificación antrópica o natural podría afectar la estabilidad natural del sistema e incrementar el riesgo de inundación.

CAPÍTULO V:

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Capítulo V: Conclusiones y futuras líneas de investigación

Conclusiones

Las conclusiones que se derivan de este trabajo son:

- Con base en los datos del nivel del mar de los mareógrafos de la SEMAR y el SMN, se establece que no hay incremento del nivel del mar en la bahía de Ensenada producto del cambio climático.
- El oleaje de tormenta en la Bahía de Ensenada proviene con mayor frecuencia del cuadrante W – NW y las olas más altas se observan durante el invierno con alturas de 7 m, debido al paso de tormentas invernales asociadas a frentes fríos. El oleaje más energético tiene periodos que van de 14 a 16 segundos.
- La marea meteorológica obtenida para la Bahía de Ensenada es provocada por el viento del NW con valores de 14 a 17 m/s y marea meteorológica de 0.5 a 1 m, por lo que podría considerarse como baja. Esto se debe a que las máximas velocidades obtenidas alcanzan apenas la categoría de una depresión tropical, que de acuerdo a la Escala de Saffir-Simpson, los daños provocados por vientos de esta intensidad son mínimos.
- El área con menor riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos de origen marino es el norte de la bahía, debido a la altura de los cantiles que predominan en la zona sobre los cuales se asienta la población local.
- El área con mayor riesgo de inundación por eventos hidrometeorológicos de origen marino es el centro y sur de la bahía, principalmente las playas Corona, Nueva España, Mona Lisa y El Faro, en el centro, y la barra de arena de Punta Banda, en el sur, y bajo condiciones extremas de $Tr= 50$ años.
- En el estero de Punta Banda, aunque no presenta riesgo grave de inundación, el incremento del nivel de mar podría agravar la contaminación por intrusión salina y repercutir disminuyendo el área agrícola disponible.
- Los efectos erosivos en el área norte, centro y sur de la bahía producto del incremento del nivel del mar durante eventos extremos significaría un riesgo potencial.
- Los resultados aquí presentados no consideran efectos del cambio climático de ningún tipo.

- Los resultados que se presentan sirven como referencia de apoyo en el manejo de la costa de Ensenada durante los próximos 50 años, siempre y cuando las características físicas del medio se mantengan igual a las actuales.
- Cualquier futura modificación antrópica o alteración del medio físico, podría afectar la estabilidad natural del sistema e incrementar el riesgo de inundación en la Bahía de Ensenada.

Futuras líneas de investigación

- Simular numéricamente la variabilidad del nivel del mar considerando ahora condiciones de cambio climático establecidas en reportes de proyecciones de incremento para Baja California.
- Establecer nuevos mapas de peligro por incremento del nivel del mar considerando dichas proyecciones.
- Analizar la dinámica sedimentaria en la zona de estudio
- Analizar el efecto erosivo en la costa de la bahía como resultado del incremento del nivel del mar mediante simulación numérica.
- Dependiendo de los resultados que se obtengan, desarrollar un análisis de riesgo y vulnerabilidad para la Bahía de Ensenada.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- ADAPT. (2010). *Towards and integrated decision tool for adaptation measures - case study: floods*. Brussels. Recuperado de: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/55925/1/FinalReport_complete_v4.13.pdf
- Almazán, J. L., & Palomino, M. del C. (2000). *Descripción, medida y análisis de oleaje*.
- API-Ensenada. (2017). Recuperado de: <https://www.puertoensenada.com.mx/>
- Aranda, F., & Guardado, R. (1990). Síntesis de conocimientos sobre geología marina de la laguna costera estero Punta Banda, Baja California, México. *VIII Congreso Nacional de Oceanografía*.
- Arnott, R. D. (2009). *Introduction to Coastal Processes & Geomorphology*. Cambridge University Press. Cambridge, UK: Cambridge University Press. [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2006\)22\[1589:BR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2006)22[1589:BR]2.0.CO;2)
- Balica, S. F. (2012). *Applying the flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment*. Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Ballesteros Carral, M. (2016). *Estudio de la variabilidad del nivel del mar en el Atlántico Norte a partir de medidas altimétricas de proyecto CCI Sea Level*. Universidad de Vigo.
- Bana e Costa, C. A., Antão da Silva, P., & Nunes Correia, F. (2004). Multicriteria evaluation of flood control measures: The case of Ribeira do Livramento. *Water Resources Management*, 18(3), 263–283. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043163.19531.6a>
- Bates, P. D., Dawson, R. J., Hall, J. W., Horritt, M. S., Nicholls, R. J., Wicks, J., & Ali Mohamed Hassan, M. A. (2005). Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. *Coastal Engineering*, 52(9), 793–810. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.06.001>
- Bellomo, D. (2008). *Flood maps modernization and FEMA levee policy*. Department of Homeland Security. Hyattsville. Recuperado de: https://www.oig.dhs.gov/assets/Mgmt/OIG_05-44_Sep05.pdf
- Bonanata, R., Medina, R., Silveira, L., & Benedet, L. (2009). Metodología para la caracterización del clima marítimo en un punto cerca de la costa a partir de una serie de datos en aguas profundas. *VI Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria Seminario Latinoamericano “ Desarrollo Sustentable de la Infraestructura Portuaria Marítima y Fluvial en América Latina*, 1–14.
- Bowen, R. E., & Riley, C. (2003). Socio-economic indicators and integrated coastal management. *Ocean and Coastal Management*, 46(3–4), 299–312. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(03\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(03)00008-5)
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (No. 38). Noruega.

- Brouwer, R., & Van Ek, R. (2004). Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands. *Ecological Economics*, 50(1–2), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.01.020>
- Burzel, A., Dassanayake, D. R., & Oumeraci, H. (2012). *Development of a spatial loss-of-life model for Hamburg-Wilhelmsburg*. Braunschweig, Alemania.
- Cadena, M. C. (2012). *Nivel del mar y régimen de marea en las estaciones mareográficas de Colombia*. Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Carmona Enríquez, R. M. (2013). *Modelo de riesgo de inundación costera causada por variaciones del nivel del mar, aplicado a la ciudad de Ensenada, B.C., México*. Universidad Autónoma de Baja California.
- CENAPRED. (2007). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica*. Ciudad de México.
- CENAPRED. (2014a). *Ciclones tropicales, Serie Fascículos*. Recuperado de: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/5-FASCCULOCICLONESTROPICALES.PDF>
- CENAPRED. (2014b). *Inundaciones, Series Fascículos*. Recuperado de: http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/183201446._FASCICULO_INUNDACIONES.pdf
- Chen, X., Navon, I. M., & Fang, F. (2011). A dual-weighted trust-region adaptive POD 4D-VAR applied to a finite-element shallow-water equations model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. <https://doi.org/10.1002/flid.2198>
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGraw Hill.
- COMET. (sf). Forecasting tropical cyclone storm surge. Recuperado de: www.comet.ucar.edu
- CONAGUA. (sf). Frentes fríos. Recuperado de: www.gob.mx/conagua
- CONANP.(2017a). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conanp>
- CONANP. (2017b). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conanp>
- Crichton, D. (2008). *Urban flood risk management - A tool for integrated flood management*. Geneva. Recuperado de: https://library.wmo.int/pmb_ged/ifmts_6.pdf
- Cruz-Colín, M. E., & Cupul-Magaña, L. A. (1997). Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la bahía de Todos Santos, Baja California, en el periodo de 1970 A 1991. *Ciencias Marinas*, 23(3), 303–315.
- Cruz-Falcon, A., & Jimenez-Perez, M. (1995). Analisis de perfiles frente al rompeolas de Ensenada, B.C. *Ciencias Marinas*, 21(1), 13–24. <https://doi.org/10.7773/cm.v21i1.984>

- Dassanayake, D., Burzel, A., & Oumeraci, H. (2012). COASTAL FLOOD RISK: THE IMPORTANCE OF INTANGIBLE LOSSES AND THEIR INTEGRATION. *Coastal Engineering 2012*.
- Dassanayake, D. R., Burzel, A., & Oumeraci, H. (2015). Methods for the Evaluation of Intangible Flood Losses and Their Integration in Flood Risk Analysis. *Coastal Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1142/S0578563415400070>
- De La Cruz-Reyna, S. (2003). Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, (2), 6–8.
- Deltares Research Institute. (2017). Delft 3D. Recuperado de: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>
- DHI Water & Environment. (2017). Danish Hydraulic Institute. Recuperado de: <https://www.dhigroup.com/>
- Dhondia, J. ., & Stelling, G. . (2010). SOBEMK one dimensional-two dimensional integrated hydraulic model for flood simulation-its capabilities and features explained. In *Proceedings of the 6th International Conference* (p. 24).
- EM-DAT, O. (n.d.). International Disaster Database. Recuperado de: www.cred.be/emdat
- Escudero Castillo, M., Mendoza Baldwin, E., Silva Casarin, R., Posada Vanegas, G., & Arganis Juaréz, M. (2012). Characterization of Risks in Coastal Zones: A Review. *Clean - Soil, Air, Water*, 40(9), 894–905. <https://doi.org/10.1002/clen.201100679>
- Escudero, M., Mendoza, E., Silva, R., & Villatoro, M. (2014). Comparative risk assessment at isla del Carmen and Cancun, Mexico. In *Proceedings of the Coastal Engineering Conference* (Vol. 2014–Janua).
- Escudero, M., Silva, R., & Mendoza, E. (2014). Beach Erosion Driven by Natural and Human Activity at Isla del Carmen Barrier Island, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 71(1994), 62–74. <https://doi.org/10.2112/SI71-008.1>
- FAO. (2008). Manejo de riesgos climáticos. Recuperado de: <http://www.fao.org/climatechange/49376/es>
- FLOODsite. (sf.-a). FLOODsite EU Integrated Project. Recuperado de: www.floodsite.net
- FLOODsite. (sf.-b). What is floodrisk?. Recuperado de: www.floodsite.net
- FLOODsite. (2007). *GIS-based Multicriteria Analysis as Decision Support in Flood Risk Management. Contract*.
- Gallien, T. W. (2016). Validated coastal flood modeling at Imperial Beach, California: Comparing total water level, empirical and numerical overtopping methodologies. *Coastal Engineering*, 111, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.014>
- Gallien, T. W., Sanders, B. F., & Flick, R. E. (2014). Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.007>
- Gouldby, B., & Samuels, P. (2005). *Language of Risk - Project Definitions*. Oxfordshire, UK.

- Granger, K., Jones, T., Leiba, M., & Scott, G. (2003). Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, (2), 6–8.
- Hallegatte, S. (2008). An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. *Risk Analysis*, 28(3). <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x>
- Hallegatte, S., Henriot, F., & Corfee-Morlot, J. (2011). The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: A conceptual framework. *Climatic Change*, 104(1), 51–87. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9976-5>
- 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>
- Huyer, A., & Pattullo, J. . (1997). A comparison between wind and current observation over the continental shelf off Oregon, summer 1970. *Journal of Geophysical Research*, 77(18).
- IMIP. (2015). Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada. Recuperado de: <http://imipens.org/>
- Instituto Nacional de Ecología, UNAM, S. (2008). *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos*. Ciudad de México.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: informe de síntesis. Quinto informe de evaluación AR5 (Vol. 4)*. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- J. Adams. (2003). *Vulnerability, risk and adaptation : A conceptual framework*. Tyndall Centre for Climate Change Research (Vol. 38). Norwich. <https://doi.org/Yes>
- Kantha, L., & Clayson, C. (2000). *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes. International Geophysics* (Vol. 66). [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(00\)80027-3](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(00)80027-3)
- Kelman, I. (2003). Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, (2), 6–8.
- Kirby, J. ., & Dalrymple, R. . (1994). *Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, v2.5: Documentación y Manual del usuario*.
- Lichter, M., & Felsenstein, D. (2012). Assessing the costs of sea-level rise and extreme flooding at the local level: A GIS-based approach. *Ocean and Coastal Management*, 59, 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.12.020>
- Martinez-Diaz-De-Leon, A., Lizarraga-Arciniega, R., Delgado-Gonzalez, O., Galindo-Bect, L., Torres-Navarrete, C. R., Blanco-Betancourt, R., ... Cano-Cetina, R. (2008). Influence of winter waves on the longitudinal growth of the Punta Banda Estuary sandbar, Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 34, 69–76.
- Martínez Díaz de León, A., Nava Button, C., & Javier, O. T. F. (1998). Estadística del oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C., de septiembre de 1986 a agosto de 1987. *Ciencias Marinas*,

- 24(2), 211–224. Recuperado de:
<http://rcmarinas.ens.uabc.mx/index.php/cmarinas/article/viewArticle/744>
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1), 17–37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- McInnes, K., Walsh, K., Hubbert, G., & Beer, T. (2003). Impact of sea level rise and storm surges on a coastal community. *Natural Hazards*, 30, 187–207. <https://doi.org/10.1023/A:1026118417752>
- Meillon-Menchaca, O., & Álvarez-Borrego Josué. (1997). SPATIAL WAVE BEHAVIOR ANALYSIS IN TODOS SANTOS BAY, BY MEANS OF IMAGES OF THE SEA SURFACE. *Ciencias Marinas*, 23(1), 23–41.
- Montoya Turrillas, F. J., & Gómez-Morín Fuentes, L. (1991). Definición de zonas de riesgo por erosión e inundación en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 17(2), 25–36.
- Morgan, M. G., & M. Henrion. (2003). Vulnerability , risk and adaptation : A conceptual framework. *Tyndall Centre for Climate Change Research*, 38.
- NHC-NOAA. (n.d.). Introducción a la marejada ciclónica. Recuperado de:
http://www.nhc.noaa.gov/surge/marejadaCiclonica_intro.pdf
- Nicholls, R. J., Hoozemans, F. M. J., & Marchand, M. (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 9, S69–S87. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00019-9)
- Nicholls, R. J., & J, R. (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(32–34), 1455–1466. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00090-6](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00090-6)
- Nicholls, R. J., & Lowe, J. A. (2004). Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change*, 14(3), 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.04.005>
- NOAA. (2000). *Tide and current glossary*. Silver Spring, MD: NOAA National Ocean Service. National Oceanic and Atmospheric Administration National Ocean Service Center for Operational Oceanographic Products and Services.
- Ortíz-Figueroa, M. (2008). El nivel del mar como indicador del cambio climático global: historia, tendencias regionales y perspectivas en México. In M. Polioptro & A. Aguilar (Eds.), *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México* (1a edición, p. 120).
- Ortíz-Figueroa, M., & González-Navarro, J. . (2008). *El nivel del mar como indicador del cambio climático global: historia, tendencias regionales y perspectivas en México*.
- Ortiz Figueroa, M. (2009). Agitación por oleaje en el puerto de Ensenada, Baja California, México: medidas de atenuación. *Geos*, 29(2), 240–249.
- Peynador, C., & Méndez-Sánchez, F. (2010). Managing coastal erosion: A management proposal for

- a littoral cell in Todos Santos Bay, Ensenada, Baja California, Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 53(7), 350–357. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.04.016>
- PNUD. (2010). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado de: www.undp.org
- Pons, J. (2009). *La medición del nivel medio del mar: principios y métodos*.
- Posada-Vanegas, G., Silva-Casarín, R., & Medina-Santamaría, R. (2008). Three-dimensional numerical model for the transport of a conservative contaminant | Modelo numérico tridimensional para transporte de un contaminante conservativo. *Ingeniería Hidráulica En México*, 23(1).
- Posada, G. (2007). *Modelo Numérico Hidrodinámico Tridimensional para la Predicción de la Evolución de una Descarga de una Substancia Conservativa de un Emisor Submarino*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rivera-Arriaga, E., Azuz-Adeath, I., L., A., & G.J., V.-Z. (2010). *Cambio Climático en México: un enfoque costero y marino*.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). *Descripción del modelo Xbeach y manual del usuario*.
- Safecoast. (2008). *Coastal flood risk and trends for the future in the north sea region, synthesis report*. Repository.Tudelft.Nl. Recuperado de: <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:4e00e31a-fdda-45b2-82f5-dbb9c76e7fe3/safecoast.pdf>
- Seenath, A. (2015). Modelling coastal flood vulnerability: Does spatially-distributed friction improve the prediction of flood extent? *Applied Geography*, 64, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.09.010>
- Seenath, A., Wilson, M., & Miller, K. (2016). Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: Which is better for guiding coastal management? *Ocean and Coastal Management*, 120, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.019>
- SEMAR. (sf). Secretaría de Marina. Recuperado de: www.semar.gob.mx
- Silva, R., Borthwick, A., & Taylor, R. E. (2005). Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. *Coastal Engineering*, 52(5), 391–407.
- Silva, R., Ruíz, G., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Espinal, J., & Mendoza, E. (2007). *Atlas de clima marino de la vertiente Pacífica Mexicana*.
- Smith, K. (2003). Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, (2), 6–8.
- SMN. (sf.). Frentes fríos. Servicio Mareográfico Nacional.
- Snoussi, M., Ouchani, T., & Niazi, S. (2008). Vulnerability assessment of the impact of sea-level rise and flooding on the Moroccan coast: The case of the Mediterranean eastern zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(2), 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.09.024>
- SO/EC. (2005). *Language of Risk - Project Definitions*. Comunidad Europea, Bruselas.

- Stenchion, P. (2003). Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, (2), 6–8.
- Sterr, H. (2008). Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. *Journal of Coastal Research*, 242(242), 380–393. <https://doi.org/10.2112/07A-0011.1>
- Stolper, D., List, J. H., & Thielert, E. R. (2005). Simulating the evolution of coastal morphology and stratigraphy with a new morphological-behaviour model (GEOMBEST). *Marine Geology*, 218(1–4), 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.02.019>
- Tolman, H. . (2014). *Manual del usuario y documentación del modelo WAVEWATCH III*.
- UABC, & IIO. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Ensenada*.
- UNESCO. (2001). Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencias y la cultura, medio ambiente y desarrollo en regiones costeras e islas pequeñas. Recuperado de: <http://www.unesco.org/csi/wise/wise6s.htm>
- UNFCCC. (n.d.). *Materiales de Capacitación del GCE sobre Evaluaciones de Vulnerabilidad y Adaptación, Capítulo 5: Recursos Costeros*. Recuperado de: <http://www.oceanografosinfronteras.org>
- United Nations Department of Humanitarian Affairs. (1992). Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. *United Nations*, (Diciembre 1992), 81.
- Villatoro, M., Silva, R., Méndez, F. J., Zanuttigh, B., Pan, S., Trifonova, E., ... Eftimova, P. (2014a). An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 50–76. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.11.009>
- Villatoro, M., Silva, R., Méndez, F. J., Zanuttigh, B., Pan, S., Trifonova, E., ... Eftimova, P. (2014b). An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.11.009>
- Wallingford, R. (2005). *Language of Risk - Project Definitions*. Bruselas.
- WPC, & NOAA. (sf). National Weather Service. Recuperado de: www.wpc.ncep.noaa.gov
- Yoo, G., Hwang, J. H., & Choi, C. (2011). Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities. *Ocean & Coastal Management*, 54(7), 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.04.001>