

**DEVELOPMENT OF A MARINE DYNAMICS DATABASE FOR THE
PANAMANIAN COASTS TO ASSESS VULNERABILITY AND CLIMATE**

CHANGE IMPACTS TO SEA LEVEL RISE

UN RFP NUMBER: 3100004805

Entregable 3.1.b

**“REVISIÓN Y MAPEO DE LAS CONDICIONES DEL CLIMA EN LA COSTA,
CONSIDERANDO LOS EVENTOS EXTREMOS MET-OCEÁNICOS HISTÓRICOS”**

Tarea 3: Desarrollo de datos numéricos de las dinámicas marinas a alta resolución

ÍNDICE

ANTECEDENTES	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
1. INTRODUCCIÓN	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN PANAMÁ	6
2.1. Climatología de Panamá	6
2.1.1. Fenómenos met-oceánicos extremos	7
2.1.2. Fenómenos de variabilidad climática interanual	9
2.2. Caracterización de las dinámicas marinas.....	10
2.2.1. Oleaje	11
2.2.2. Nivel del mar	12
2.3. Riesgos y Vulnerabilidad de las costas panameñas.....	13
3. RECOPIACIÓN DE LAS BASES DE DATOS HISTÓRICAS DISPONIBLES RELACIONADAS CON LAS VARIABLES DE PELIGROSIDAD Y EXPOSICIÓN DE LAS COSTAS.....	16
3.1. Recopilación y evaluación de los productos de reanálisis global disponibles.....	16
3.2. Búsqueda de información batimétrica	19
3.3. Revisión y evaluación de bases de datos de dinámicas marinas disponibles	21
3.3.1. Oleaje	21
3.3.2. Nivel del mar	26
3.4. Revisión y evaluación de datos hidrológicos.....	33
4. CAMBIO CLIMÁTICO Y ESCENARIOS DE ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR A NIVEL NACIONAL.....	35
4.1. Modelos Climáticos Globales/Regionales	35
4.1.1. Modelos climáticos globales (GCMs)	35
4.1.2. Modelos climáticos regionales (RCMs)	36
4.2. Escenarios de cambio climático	36
4.1.3. Proyecciones del nivel medio del mar.....	37
4.1.4. Proyecciones de cambio climático de oleaje y marea meteorológica y cambios futuros en la frecuencia de eventos extremos	40
5. ESTUDIO HISTÓRICO DE LAS CONDICIONES EXTREMAS DE LAS VARIABLES MET-OCEÁNICAS EN LAS COSTAS DE PANAMÁ	42
5.1. Eventos extremos asociados a situaciones ciclónicas.....	44
5.2. Eventos extremos asociados a situaciones anticiclónicas.....	46
5.3. Eventos extremos causantes de inundaciones	48
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXO I. FIGURAS	60
ANEXO II. BASES DE DATOS DISPONIBLES	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Posición de la Zona de Convergencia Intertropical durante el invierno (azul) y verano (rojo) boreal. Fuente: Mats Halldin, dominio público.....	6
Figura 2. Trayectorias de los ciclones tropicales del Pacífico Este y del Atlántico Norte desde 1851 a 2017. Fuente: NOAA National Hurricane Centre (NHC).....	8
Figura 3. Origen y fecha de los tsunamis registrados en Panamá. Fuente: Natural Hazards Viewer.	9
Figura 4. Imágenes de inundaciones asociadas con mareas altas o fuertes oleajes el 1 de Octubre de 2015, (izquierda) en Barrio Boca La Caja (en Ciudad de Panamá) y (derecha) en Puerto Caimito. Fuente: EFEverde y Agencia EFE, respectivamente.....	14
Figura 5. (Izquierda) Localización de las boyas del NDBC y (derecha) de las estaciones meteorológicas de ETESA, con los que se han validado los datos de velocidad del viento procedente de los reanálisis globales.	17
Figura 6. Comparación de los datos de velocidad del viento en superficie procedente de ERA5 (izquierda) y CFS (derecha) con los medidos por las tres boyas del NDBC.	18
Figura 7. Comparación de los datos de velocidad del viento en superficie procedente de ERA5 (arriba) y CFS (abajo) con los medidos por las tres estaciones meteorológicas de ETESA.	19
Figura 8. (Izquierda) Zoom de la topobatemetría de GEBCO (2021) en la zona de estudio. (Derecha) Zonificación de la batimetría de la costa panameña realizada por el IGNTG a partir de la digitalización de cartas náuticas.....	20
Figura 9. (Izquierda) Puntos batimétricos e (derecha) imágenes ráster de los modelos batimétricos de las costas Caribe y Pacífico panameñas generadas en el marco del proyecto “Evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica.	21
Figura 10. Comparación de los datos de altura de ola de los hindcast GOW- ERA5 (izquierda) y GOW2 (CFS) (derecha) con los medidos por las tres boyas del NDBC.....	23
Figura 11. Localización de los puntos para la validación de las bases de datos de hindcast con datos de altimetría. En rojo se muestran los datos de satélite disponibles en un radio de 0.2°.	24
Figura 12. Comparación de los datos de altura de ola de los hindcast GOW- ERA5 (izquierda) y GOW2 (CFS) (derecha) con los de satélite de ESA-CCI SeaState v1.	25
Figura 13. Energía acumulada (m ²) para cada periodo de pico (Tp) y dirección media (θm).	26
Figura 14. Localización de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá. El de Bocas del Toro se ha descargado del EC-WSL mientras que los demás de GESLA3.	28
Figura 15. Series temporales de nivel del mar (m) registradas por los 6 mareógrafos disponibles en Panamá.....	28
Figura 16. Series temporales de marea astronómica (en rojo) y marea meteorológica (en azul) derivadas de la descomposición armónica del nivel del mar medidos por los 6 mareógrafos disponibles en Panamá. Unidades: metros.	29
Figura 17. (Izquierda) mareógrafo de Cristóbal y (Derecha) de Balboa. Valores medios ± desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual.	30
Figura 18. Variación espacial de la PMVE (m) en Panamá obtenida a partir de la base de datos GOT.	31
Figura 19. Series temporales de marea meteorológica obtenidas de los registros de los mareógrafos disponibles en Panamá.....	32
Figura 20. Valor del percentil del 99% de la marea meteorológica en los mareógrafos analizados	32
Figura 21. Precipitación mínima, media y máxima medidas por las estaciones que mantiene la ACP a lo largo del Canal de Panamá. Fuente de los datos: Paton (2019)	33
Figura 22. Caudales mínimos, medios y máximos medidas por las estaciones que mantiene la ACP a lo largo del Canal de Panamá. Fuente de los datos: Paton (2019)	34

Figura 23. Localización de los puntos donde se han analizado las proyecciones de aumento del nivel medio del mar	39
Figura 24. Proyecciones de aumento del nivel del mar publicados en el AR5 (líneas negras) y en el AR6 (líneas azules y rojas) bajo dos escenarios climáticos: (arriba) de estabilización media (RCP4.5 y SSP2-4.5) y (abajo) de altas emisiones (RCP8.5 y SSP5-8.5), en un punto en el Caribe (paneles izquierdos) y en otro en el Pacífico (paneles derechos).	39
Figura 25. Mapas de aumento del nivel medio del mar (SLR) en el año 2100, para los escenarios de estabilización media (izquierda) y de altas emisiones (derecha), de acuerdo a los datos publicado en el AR5 (paneles superiores) y en el AR6 (paneles inferiores)	40
Figura 26. Series temporales de altura de ola significativa con los valores iguales o superiores al percentil del 99% marcados en rojo en las 4 localizaciones mostradas en la Figura 23.....	43
Figura 27. Distribución a lo largo del año de los eventos extremos ($H_s \geq P99\%$) de altura de ola en las 4 localizaciones analizadas.....	43
Figura 28. Trayectoria de los ciclones tropicales que han pasado en los últimos 32 años (desde 1990) en un radio de 100 km en torno a las costas de Panamá. Fuente: NOAA Historical Hurricane Tracks (https://coast.noaa.gov/hurricanes/).	44
Figura 29. (Arriba-izquierda) Trayectoria de los ciclones tropicales causantes de oleajes extremos en Panamá y localización del punto donde se ha analizado la altura de ola frente a la costa Caribe occidental de Panamá (punto azul). (Arriba-derecha y abajo-izquierda y derecha) Evolución de la altura de ola y dirección media en el punto objetivo tras el paso del huracán Joan-Miriam (1988), Bret (1993) y Otto (2016), respectivamente.	45
Figura 30. Serie temporal de marea meteorológica registrada por los mareógrafos durante los ciclones tropicales de (arriba-izquierda) Joan-Miriam (en octubre de 1988) y (arriba-derecha y abajo) huracán Otto (en noviembre de 2016).....	46
Figura 31. (Izquierda) Diferencia de presión atmosférica entre Texas y Yucatán (mbar). (Derecha) Evolución de la altura de ola y de la dirección media del oleaje en el punto mostrado en la figura anterior en los días posteriores al comienzo del evento Norte.....	47
Figura 32. Series temporales desde el 27 de agosto al 7 de septiembre de 2011 de (arriba) velocidad del viento en superficie (m/s) y presión atmosférica a nivel del mar (mbar), (centro) nivel del mar registrado por el mareógrafo de Balboa y (abajo) altura de ola (m) y periodo de pico(s) del oleaje en el nodo del hindcast de GOW2 más cercano a la zona de Puerto Caimito (Panamá Oeste, costa Pacífico). En magenta se ha marcado el periodo en el que se produjeron inundaciones.....	49
Figura 33. Series temporales desde el 27 de abril al 8 de mayo de 2015 de (arriba) velocidad del viento en superficie (m/s) y presión atmosférica a nivel del mar (mbar), (centro) nivel del mar registrado por el mareógrafo de Balboa y (abajo) altura de ola (m) y periodo de pico(s) del oleaje en el nodo del hindcast de GOW2 más cercano a la zona de Río Hato (Coclé, costa Pacífico). En magenta se ha marcado el periodo en el que se produjeron inundaciones.	49
Figura 34. Rosas de oleaje en un punto offshore frente al Golfo de Panamá (-79.1º,6.9713º) de las series temporales desde (izquierda) el 27 de agosto al 7 de septiembre de 2011 y (derecha) desde el 27 de abril al 8 de mayo de 2015.	50
Figura 35. Series temporales desde el 13 al 24 de enero de 2020 de (arriba) velocidad del viento en superficie (m/s) y presión atmosférica a nivel del mar (mbar), (centro) nivel del mar registrado por el mareógrafo de El Porvenir y (abajo) altura de ola (m) y periodo de pico(s) del oleaje en el nodo del hindcast de GOW2 más cercano a la región de Gobeá (Colón, costa Caribe). En magenta se ha marcado el periodo en el que se produjeron inundaciones.	50

Figura 36. Mareógrafo de Bocas del Toro. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual..... 60

Figura 37. Mareógrafo de El Porvenir. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual..... 61

Figura 38. Mareógrafo de Naos. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual..... 61

Figura 39. Mareógrafo de Puerto Armuelles. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual. 62

Figura 40. Mapas de aumento del nivel medio del mar (SLR) en el año 2050, para los escenarios de estabilización media (izquierda) y de altas emisiones (derecha), de acuerdo a los datos publicado en el AR5 (paneles superiores) y en el AR6 (paneles inferiores) 62

Figura 41. Proyecciones de aumento del nivel del mar publicados en el AR5 (líneas negras) y en el AR6 (líneas azules y rojas) bajo dos escenarios climáticos: (arriba) de estabilización media (RCP4.5 y SSP2-4.5) y (abajo) de altas emisiones (RCP8.5 y SSP5-8.5), en un punto en el Caribe (paneles izquierdos) y en otro en el Pacífico (paneles derechos). 63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Noticias publicadas en la prensa nacional sobre eventos de inundaciones asociadas a mareas altas o fuertes oleajes	15
Tabla 2. Características de los reanálisis globales más recientes.	16
Tabla 3. Altímetros integrados en la base de datos Sea State CCI v1.	22
Tabla 4. Características de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá.....	27
Tabla 5. Comparación de los valores de PMVE (m) derivada de los mareógrafos y del modelo GOT..	31
Tabla 6. Características de los huracanes que causaron alturas de ola extremas en la costa Caribe panameña.....	45
Tabla 7. Bases de datos de hindcast de oleaje disponibles en las costas panameñas.....	64
Tabla 8. Bases de datos instrumentales de oleaje disponibles en las costas panameñas	65
Tabla 9. Bases de datos de las variables de nivel del mar procedentes de modelos disponibles en las costas panameñas	66
Tabla 10. Bases de datos instrumentales de nivel del mar disponibles en las costas panameñas.....	67
Tabla 11. Bases de datos de proyecciones de las dinámicas marinas disponibles en las costas panameñas	68

ANTECEDENTES

En agosto de 2021, Naciones Unidas publicó, a través del Climate Technology Centre and Network (CTCN), la solicitud de propuesta (Request for Proposal, RFP) para la asistencia técnica en el “Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar”. El objetivo principal de dicho proyecto consiste en aumentar la resiliencia presente y futura de las zonas costeras de Panamá frente a eventos extremos y al cambio climático (concretamente, al aumento del nivel medio del mar). Para ello, se van a generar unas bases de datos de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar a escala regional (nacional). Además, se pretende, por un lado, elaborar unas herramientas y guías prácticas para la evaluación del riesgo costero utilizando la información generada, así como establecer unas recomendaciones de medidas de adaptación costeras basadas en la naturaleza. Por otro lado, busca formar y capacitar a los expertos de la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente para que sean capaces de utilizar los datos generados y llevar a cabo el análisis de riesgos.

Este proyecto ha sido concedido al Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria, España) que, junto con el Ministerio de Ambiente de Panamá, va a trabajar en el desarrollo de las distintas tareas (productos) previstas.

Este documento en concreto se enmarca dentro del producto 3 “Desarrollo de datos numéricos de las dinámicas marinas a alta resolución” y, específicamente, corresponde a la actividad 3.1 que se basa en la “revisión y mapeo de las condiciones extremas de clima marítimo y atmosférico”. El contenido de este informe describe los resultados de las siguientes subtareas contempladas en la propuesta:

Subtarea 3.1.2. Revisión bibliográfica sobre las condiciones de clima marítimo en Panamá.

Subtarea 3.1.3. Recopilación de las bases de datos históricas disponibles relacionadas con las variables de peligrosidad y exposición en las costas.

Subtarea 3.1.4. Revisión de datos de Cambio Climático y escenarios de aumento del nivel del mar a nivel nacional.

Subtarea 3.1.5. Estudio histórico de las condiciones extremas, de origen ciclónico y no-ciclónico, de viento, oleaje y nivel del mar en las zonas costeras de Panamá.

RESUMEN EJECUTIVO

El clima de Panamá está condicionado por la presencia de las dos grandes masas oceánicas y por la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Además, debido a la latitud en la que se sitúa y a su localización, Panamá se ve afectada por fenómenos met-oceánicos como los ciclones tropicales, los eventos Nortes, los tsunamis, el fenómeno de El Niño/La Niña, etc. susceptibles de causar condiciones extremas en las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar y, por consiguiente, provocar impactos en la zona costera, tales como la inundación y la erosión. De hecho, las inundaciones son uno de los principales desastres que afectan a Panamá y, aunque la mayor parte de éstas están asociadas, directa o indirectamente, con las lluvias torrenciales, las mareas altas y los fuertes oleajes se consideran importantes amenazas.

Debido a la gran extensión de su costa, a la baja topografía de ésta, al alto grado de asentamientos humanos en la zona costera y al elevado índice de pobreza de esta población, Panamá se considera un país especialmente vulnerable al aumento del nivel medio del mar. De hecho, el análisis de los registros históricos del nivel del mar en la vertiente caribeña del Canal de Panamá indica un aumento de 1.4 mm/año en el periodo 1909-1979. De acuerdo al Sexto informe del IPCC (AR6), el nivel medio del mar va a aumentar 0.79 m y 0.89 m en la costa Pacífico y Caribe, respectivamente, a finales del siglo XXI y bajo un escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (SSP5-8.5), respecto a su valor en el periodo de referencia 1995-2014. Este aumento provoca un incremento en la frecuencia de los eventos de inundación, además del retroceso de la línea de costa, la necesidad de reubicación de parte de la población (por ejemplo, la comunidad indígena de Guna Yala), la pérdida de agua potable por intrusión de la cuña salina, entre otros aspectos. Por otro lado, aunque existe bastante incertidumbre al respecto, se espera un aumento en la frecuencia de fenómenos de El Niño, en los eventos Nortes de intensidad media, así como en la intensidad y frecuencia de los ciclones tropicales más intensos como consecuencia del cambio climático. Respecto a los cambios esperados en las dinámicas marinas de oleaje y de marea meteorológica (o marea de tormenta), estudios recientes coinciden en una disminución en las condiciones medias y extremas del oleaje en la costa Caribe, y en un aumento de éstas en la costa Pacífico de Panamá a finales de siglo y bajo un escenario de altas emisiones. La marea meteorológica, por su parte, tiende a disminuir. Con el objetivo de aumentar la resiliencia presente y futura en la zona costera de Panamá frente a los eventos extremos y al cambio climático, se necesita caracterizar correctamente las principales amenazas y sus impactos asociados, a fin de reducir el riesgo y proponer medidas de adaptación al cambio climático. Panamá carece de bases de datos de oleaje y de nivel del mar a las escalas temporales y espaciales necesarias para llevar a cabo este tipo de estudios (es decir, series horarias de, al menos, 30 años de duración con resolución espacial de pocos kilómetros). Además, no existen estudios cuantitativos a escala nacional ni de las principales amenazas costeras ni de los impactos asociados. Sin embargo, hay disponibles bases de datos globales (con una resolución espacial grosera) de buena calidad de las variables atmosféricas de viento y presión y de las variables oceánicas de oleaje y nivel, que sirven como forzamiento y como condición de contorno, respectivamente, en la generación de las bases de datos de dinámicas marinas específicas para Panamá. Además, la información batimétrica disponible en Panamá se va a incorporar en las mallas numéricas. Por su parte, los registros históricos de nivel del mar medidos por distintos mareógrafos en las costas panameñas, los datos de viento registrados por las estaciones meteorológicas costeras, así

como los datos de altura de ola medidos por los satélites serán de gran utilidad para validar las bases de datos generadas.

1. INTRODUCCIÓN

La República de Panamá se localiza en el istmo centroamericano, entre las latitudes 7.2° y 9.646°N, rodeada por los océanos Pacífico y Atlántico. Estas características condicionan el clima del país, ya que está fuertemente influenciado por el acceso a las dos grandes masas oceánicas y por los desplazamientos de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Además, por su localización, Panamá está expuesto a una serie de eventos met-oceánicos extremos tales como ciclones tropicales, tsunamis, fuertes vientos, eventos de El Niño/La Niña, lluvias torrenciales y fuertes sequías, etc. A estas amenazas, se unen los efectos del Cambio Climático que, de acuerdo con los estudios publicados, tendrán un efecto más intenso en algunas áreas de Latinoamérica y del Caribe que en otras partes del mundo (IPCC, 2014; Stern 2013).

Teniendo en cuenta la tendencia actual en los niveles de emisión, muchos de los efectos adversos del cambio climático van a ser inevitables y se van a experimentar en las próximas décadas. Por ello, es necesario desarrollar, de forma urgente, políticas y estrategias de adaptación para mitigar y reducir dichos efectos adversos.

El desarrollo e implementación de estas medidas a nivel nacional requiere de un conocimiento previo sobre las principales variables generadoras de impactos, su variabilidad espacial y temporal (intra- e interanual), su tendencia y sus previsiones de cambio a futuro debido al Cambio Climático.

Esta caracterización es especialmente importante en las zonas costeras, que se ven sometidas a un incremento de los procesos de inundación por efecto del cambio climático, principalmente como consecuencia del aumento del nivel medio del mar (Wong et al., 2014). Esta subida del nivel del mar conllevará, además, un aumento en la frecuencia de los eventos extremos. Además, se prevé que el Cambio Climático intensifique y aumente la frecuencia de los eventos de El Niño en el Océano Pacífico.

La peligrosidad asociada a la inundación y a la erosión costera depende esencialmente del oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica y al aumento en el nivel medio del mar. La precipitación y el caudal fluvial pueden contribuir también a la inundación costera (Muis et al., 2015). Por ello, un correcto análisis de estos riesgos requiere de información de las variables mencionadas a alta resolución espacial (local), temporal (horaria) y durante largos periodos de tiempo (del orden de varias décadas) (Stockdon et al., 2006). Además, la evaluación del aumento de dicho riesgo como consecuencia del Cambio Climático implica conocer los cambios estimados en estas variables en el futuro y bajo varios escenarios climáticos.

La costa panameña tiene una extensión de ~3000 km, de los cuales 1700 km corresponden al litoral Pacífico y 1288 km al litoral caribeño. La costa del Pacífico panameño es irregular, con una plataforma continental amplia (200 m de profundidad promedio) y con un declive gradual. Por el contrario, la costa caribeña es regular y presenta una plataforma continental angosta (5-35 Km) (Rodríguez and Windevoxhel, 1998). De acuerdo con el Ministerio de Economía y Finanzas, la zona costera de Panamá se considera un sector clave para el desarrollo económico, la disponibilidad de alimentos, los asentamientos humanos, etc. Tiene un alto valor socio-económico, ya que alberga importantes actividades como el turismo, la agricultura, la pesca, el transporte marítimo y la industria (textil, química, cueros, papel y metalmecánica). Además, destaca su elevado valor ambiental, por la gran variedad de ecosistemas (de manglares, corales, estuarios, playas, lagunas costeras, etc.) y la alta

biodiversidad de especies. Por último, en esta zona se estima que reside alrededor de un 50% de la población nacional (Rodríguez and Windevoxhel, 1998), la mayoría en condiciones de extrema pobreza. Todo ello implica un alto grado de vulnerabilidad a los eventos extremos y a los cambios en las condiciones climáticas. En particular, la costa se ve gravemente amenazada por los impactos directos asociados con el aumento del nivel del mar, los cuales ya se están experimentando en ciertas regiones del país (por ejemplo, la comarca de Guna Yala (PNUD, 2018)). Por todos estos motivos, es una prioridad para el gobierno de Panamá desarrollar políticas de gestión de riesgo de inundación y de adaptación al cambio climático en la costa. No obstante, la alta variabilidad espacial tanto en la morfología de la costa como en las condiciones de las dinámicas marinas y en los fenómenos climatológicos extremos, conlleva la necesidad de realizar estudios a nivel de cada región. Esto permite definir las condiciones de riesgo a escala más local y así establecer y priorizar medidas de adaptación específicas.

Sin embargo, entre las fuentes consultadas, no se ha encontrado información de las dinámicas marinas a nivel nacional o regional a la resolución necesaria. Además, los estudios publicados sobre estas dinámicas o sobre los impactos costeros de inundación asociados a eventos extremos en Panamá son escasos y están dispersos (por ejemplo, Wang et al., 2007; PNUD, 2018). En relación a estudios de cambio climático, la mayoría de las fuentes consultadas que tratan los riesgos de inundación, se centran en el análisis de variables como la precipitación, el caudal de los ríos o el aumento del nivel medio del mar, sin tener en cuenta las demás variables de nivel o el oleaje (por ejemplo, IDB, 2016; BIOMARCC-GIZ, 2013; MiAmbiente, 2019). En la biografía consultada, tan sólo se han encontrado menciones a eventos de inundaciones asociadas a fuertes oleajes, mareas altas o aguajes, sin estudios específicos sobre el origen e intensidad de estos eventos o sobre la magnitud de dichas inundaciones (por ejemplo, PNUD, 2018). Por estos motivos, el presente documento se estructura en 4 subapartados, que persiguen alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- 1) Recopilar toda la información existente sobre estudios de clima marítimo y eventos extremos, así como los impactos asociados y la vulnerabilidad de las costas panameñas.
- 2) Recopilar las bases de datos históricas disponibles sobre datos meteorológicos, dinámicas marinas y topo-batimetría a fin de definir los datos que se van a utilizar en la generación de las bases de datos para Panamá.
- 3) Definir y caracterizar los escenarios y proyecciones de cambio climático en Panamá, con especial interés en las proyecciones de aumento del nivel medio del mar.
- 4) Caracterizar las condiciones extremas de las variables met-oceánicas a lo largo de las costas panameñas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LAS CONDICIONES DEL CLIMA MARÍTIMO EN PANAMÁ

En este apartado se describe el estado del arte sobre estudios relacionados con el clima marítimo, fenómenos meteorológicos extremos y sus impactos en la costa, así como sobre informes acerca de la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Panamá. Se ha recogido la información más actualizada posible de diferentes fuentes, desde artículos científicos a informes técnicos. Abarcan desde estudios específicos para ciertas regiones de Panamá, estudios regionales a nivel del Caribe, Centroamérica o Pacífico tropical, hasta estudios realizados a nivel global.

2.1. Climatología de Panamá

El clima de Panamá se caracteriza por ser un clima tropical controlado, principalmente, tanto por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) como por el de ciclones tropicales y Ondas del Este (Pérez et al., 2000). La ZCIT es la zona donde convergen los vientos alisios del noreste y del sureste y se caracteriza por la presencia de nubes de desarrollo vertical y por un aumento de la inestabilidad atmosférica. Esta Zona se desplaza latitudinalmente a lo largo del año, desde los 5°S y los 11°N en el Pacífico oriental y sobre los 10°S y los 8°N sobre el continente (Armenta, 2013) (Figura 1). Los vientos alisios, a su vez, son vientos que soplan de manera regular de este a oeste desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales y están afectados por el efecto de la fuerza de Coriolis. Por otro lado, las Ondas del Este son ondas en forma de vaguada invertida, con eje orientado de sur a norte y que se mueven de este a oeste en la zona intertropical a una velocidad entre 20-40 km/h. En la parte trasera del eje de cada onda suele haber convergencia y abundante nubosidad. Suelen formarse entre mayo y noviembre y, tanto en el Pacífico como en el Atlántico, pueden ser el origen de ciclones tropicales. En concreto, más del 80% de los ciclones tropicales son generados por este tipo de Ondas (Landsea, 1993).

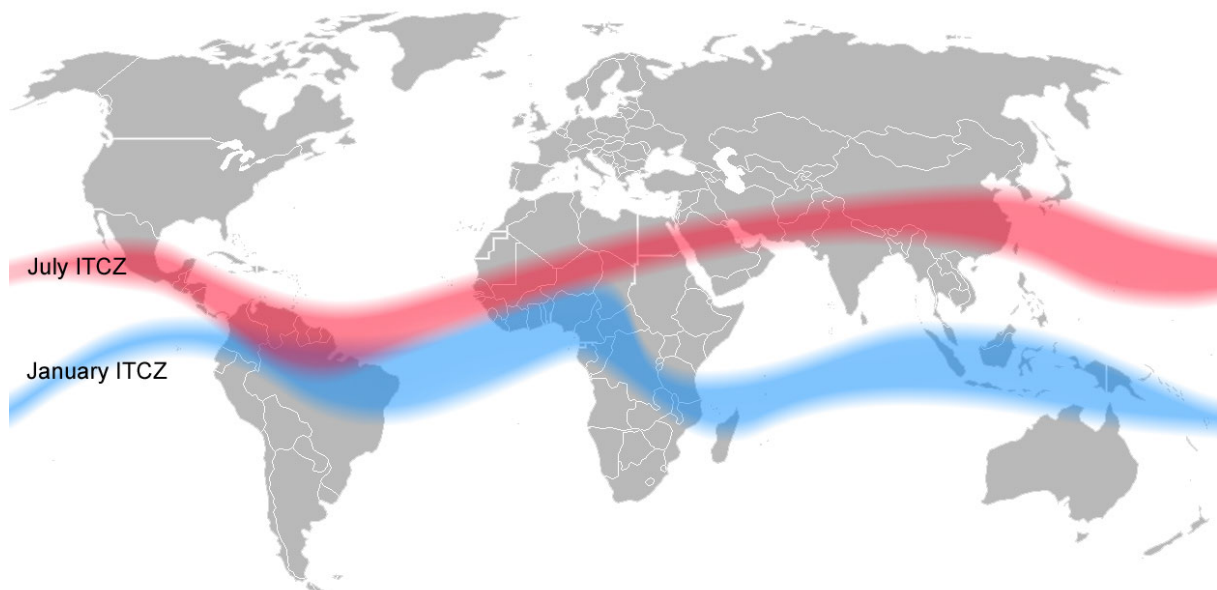


Figura 1. Posición de la Zona de Convergencia Intertropical durante el invierno (azul) y verano (rojo) boreal. Fuente: Mats Halldin, dominio público.

En ambas cuencas se distinguen corrientes en chorro superficiales. Por un lado, la corriente superficial en chorro del Caribe (CLLJ) es un fenómeno meteorológico derivado de la influencia de la circulación subtropical en niveles altos, la cual genera un arrastre (intensificación) de los vientos alisios en los niveles bajos de la troposfera con velocidades superiores a los 13 m/s. Esta corriente fluye entre la costa norte de Sudamérica y las islas del Caribe y presenta sus máximos en febrero y julio y los mínimos en mayo y octubre (Wang, 2007).

Respecto a la cuenca del Pacífico, destaca el denominado Panama Jet, que es una de las tres corrientes en chorro producidas por el paso del viento a través de las depresiones en la Cordillera de América Central. Esta corriente atraviesa el istmo de Panamá y penetra en la cuenca Pacífica, con vientos predominantes del noroeste, norte y noreste. Sucede durante el primer trimestre del año, coincidiendo con la época en la que la ZCIT se sitúa más al sur (Chelton et al., 2000; Willett et al. 2006; Martínez, 2020).

Por su localización en la zona intertropical, la República de Panamá está expuesta a una serie de fenómenos met-oceánicos extremos, tales como los ciclones tropicales, los tsunamis, los eventos Nortes y los eventos de El Niño/La Niña. Estos fenómenos son susceptibles de causar importantes impactos costeros de inundación y erosión debido al oleaje y a las sobreelevaciones del nivel del mar que producen. Por ello, a continuación, se detallan estas amenazas especificando su ocurrencia, su frecuencia, así como las características del oleaje y de la marea meteorológica que generan. Es importante mencionar que además existen otros fenómenos meteorológicos extremos como las lluvias intensas, las sequías o las tormentas eléctricas que no se van a describir en este estudio.

2.1.1. Fenómenos met-oceánicos extremos

La temporada de **ciclones tropicales** del Atlántico tiene lugar desde el 1 de junio al 30 de noviembre, ocurriendo con mayor frecuencia entre los meses de agosto y septiembre. En el Pacífico este, los ciclones tropicales se producen entre el 15 de mayo y el 30 de noviembre (NWS/Climate Prediction Center, http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Epac_hurr/background_information.html). Panamá se localiza al sur del denominado cinturón de huracanes (Figura 2). Debido a su baja latitud y a una temperatura superficial del mar relativamente fresca, tan sólo un huracán (el huracán Martha, en noviembre de 1969) ha tocado tierra en Panamá desde que existen registros (base de datos de IBTrACS, Schreck et al. (2013)). A pesar de ello, y dada su cercanía, se ve fuertemente afectada por la influencia de estos. Por ejemplo, el huracán Otto (en noviembre de 2016) produjo intensos vientos y lluvias que causaron inundaciones en Panamá, lo que conllevó a seis fallecimientos e importantes daños en la agricultura y la ganadería (NHC Otto report, 2017). Los huracanes Beta y Nate (en octubre de 2005 y 2017, respectivamente) también causaron intensas lluvias. El segundo de ellos provocó el fallecimiento de ocho personas (NHC Hurricane Nate report, 2018).

Sin embargo, no se ha encontrado información sobre las condiciones de oleaje ni de las sobreelevaciones del nivel del mar (storm surge) asociadas a estos ciclones tropicales. Respecto a los impactos asociados a dichos ciclones destacan, en primer lugar, los deslizamientos de tierra y, en segundo lugar, las inundaciones asociadas a las intensas lluvias.

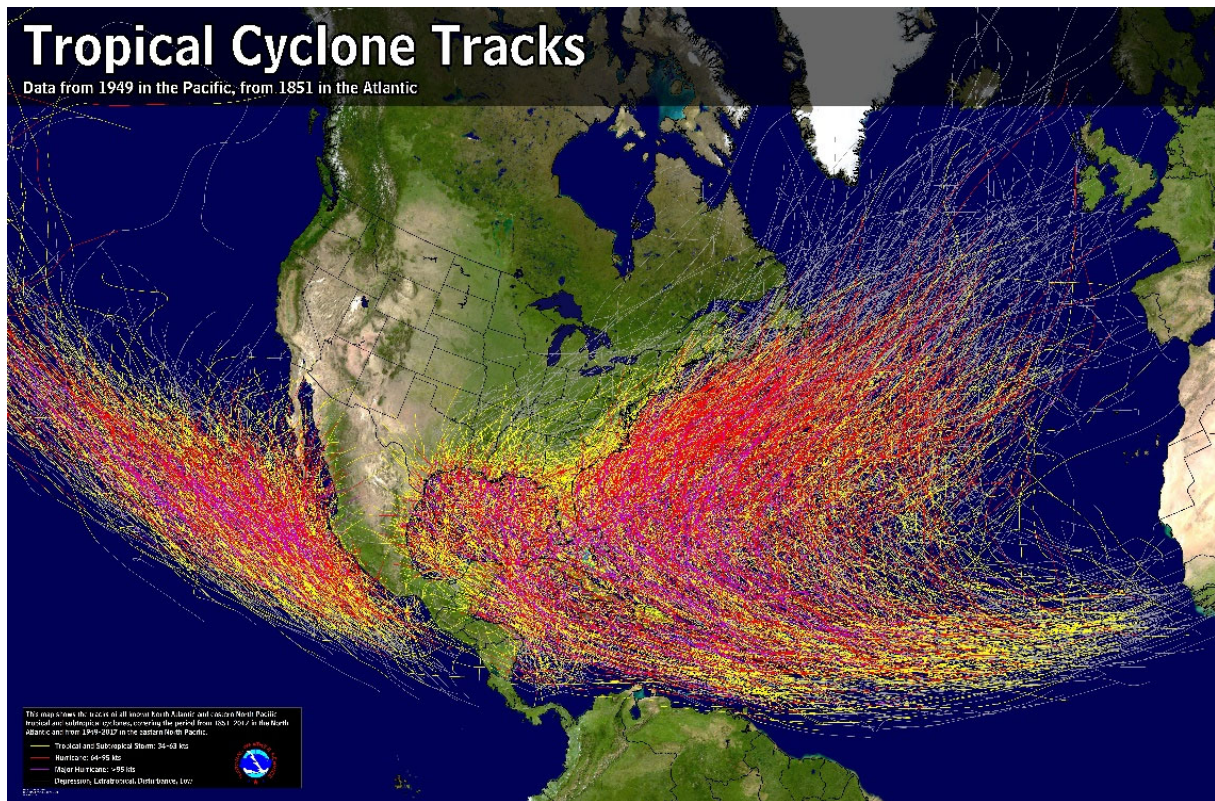


Figura 2. Trayectorias de los ciclones tropicales del Pacífico Este y del Atlántico Norte desde 1851 a 2017. Fuente: NOAA National Hurricane Centre (NHC)

Otro fenómeno meteorológico susceptible de causar condiciones extremas de oleaje son los frentes fríos anticiclónicos, conocidos como **eventos “Norte”**. Se trata de aire frío que circula por la vertiente este de las Montañas Rocosas desde el sur de Canadá hasta el Golfo de México. Se producen entre noviembre y abril, y generalmente están asociados con fuertes vientos de dirección norte e intensidades superiores a los 20 m/s. Además, provocan fuertes descensos en la temperatura y la presión, del orden de 20-30°C y 15-30 mb, respectivamente, en un intervalo de 24 horas (Colle and Mass, 1995). Se trata de eventos a escala sinóptica que pueden provocar que las alturas de ola se dupliquen en el Golfo de México y Caribe (Ortiz et al., 2014). Estos oleajes no son tan extremos como los provocados por los ciclones tropicales, pero son más frecuentes (ocurren de 11 a 21 veces al año, de acuerdo a Ojeda et al., 2017). Sin embargo, existen varios tipos de Nortés y sólo algunos de ellos afectan a las costas fuera del Golfo de México (Appendini et al., 2018). En cuanto a su influencia en la costa Caribe panameña, existen estudios que se remontan al S.XIX en los que ya se hace referencia a estos eventos. Es el caso de The Monthly Weather Review (notas del Editor 1898) o de Frankenfield (1917), que mencionan cómo afectan estos eventos a la navegación de los barcos en el Canal de Panamá. Éste último, además, describe los Nortés como los principales temporales que afectan a esta zona entre noviembre y abril.

Por otro lado, Panamá es un país vulnerable a las amenazas por **tsunamis**, ya que históricamente se ha visto amenazada por estos eventos en varias ocasiones, tanto en la costa Caribe como en la Pacífico. En concreto, de acuerdo con los datos de la NOAA/NCEI Natural Hazards (<https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/>), se han registrado 11 eventos en los últimos ~150 años

(Figura 3). De hecho, de los 50 tsunamis que han afectado a América Central en los últimos 5 siglos, sólo unos pocos han llegado a Panamá. Entre los tsunamis históricos registrados, destaca el del 7 de septiembre de 1882, que fue el más fuerte que se haya registrado y acabó con la vida de un centenar de personas en San Blas (norte de Panamá) (Camacho, 1994). El del 2 de octubre de 1913 provocó grandes destrucciones. En noviembre de 1884, en julio de 1934 y marzo de 1962 llegaron otros tsunamis a Panamá. El último registrado fue el 22 de abril de 1991 que provocó inundaciones y daños, sin pérdidas de vidas humanas (Martinez&Toulkeridis, 2020). La Figura 3 muestra la localización de la causa (terremotos) que generó el tsunami y fecha de los tsunamis registrados.

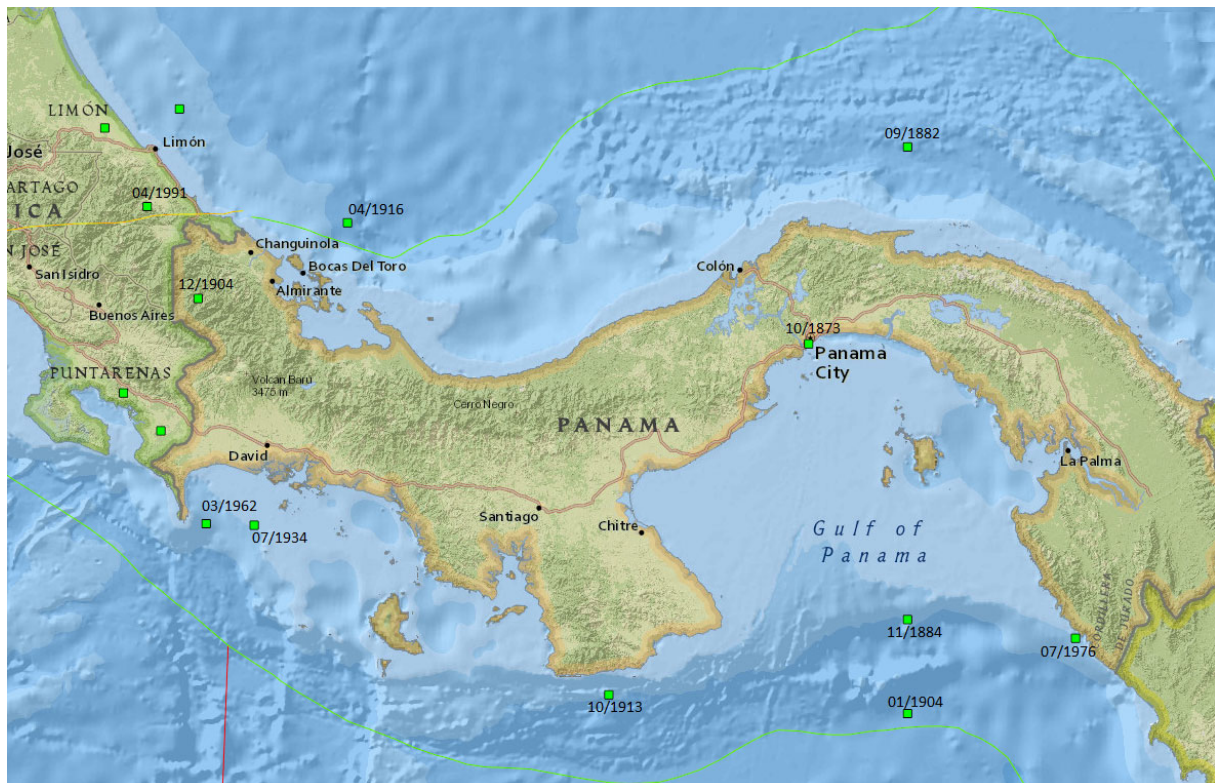


Figura 3. Origen (es decir, localización de la causa que lo generó) y fecha de los tsunamis registrados en Panamá. Fuente: Natural Hazards Viewer.

2.1.2. Fenómenos de variabilidad climática interanual

El fenómeno ENSO (El Niño - Oscilación Sur) es la fuente de variabilidad climática interanual más dominante en Centroamérica y, en general, en todo el Trópico (Fernández y Ramírez, 1991). Acopla dos componentes: el componente oceánico, conocido como la corriente de El Niño, que es una corriente costera y cálida que anualmente se desplaza a lo largo de la costa de Ecuador y Perú (Vega y Stolz 1997); y el componente atmosférico, correspondiente a los cambios interanuales de las condiciones atmosféricas sobre el océano Pacífico ecuatorial (Fernández y Ramírez, 1991). ENSO presenta dos fases: (1) La cálida o El Niño, caracterizada por un calentamiento anormal de las aguas del Pacífico Ecuatorial, acoplado a una disminución de la Oscilación del Sur. (2) La fase fría o La Niña, caracterizada por la presencia de aguas más frías de lo normal en el Pacífico Ecuatorial y por un aumento de la Oscilación del Sur.

Cada fenómeno ENSO es diferente y afecta de distinta manera al territorio nacional. De acuerdo con el informe de ETESA del 2015 sobre el fenómeno de El Niño en Panamá, durante la fase de El Niño existe mayor probabilidad de que toda la vertiente Pacífica experimente condiciones de sequía, mientras que en el Caribe, existe mayor probabilidad de escenarios de intensas lluvias (Olmedo, 2015). Es importante mencionar que existen variaciones locales (tanto espaciales como temporales) asociadas a la orografía y a la intensidad del evento. Estas variaciones en los patrones de precipitación se deben a un desplazamiento hacia el sur de la ZCIT, que puede alcanzar los 5° de latitud sur durante eventos de El Niño extremos (León et al., 2000).

En cuanto a la influencia de este fenómeno en las dinámicas marinas, esta oscilación es la responsable de importantes anomalías en el nivel medio del mar (por ejemplo, Barnard et al., 2015; Becker et al., 2012). Durante El Niño, los vientos débiles ecuatoriales causan un afloramiento en el pacífico oeste tropical y un hundimiento hacia el este, provocando una variación del nivel del mar. Estas variaciones fueron muy pronunciadas durante fuertes eventos de El Niño, como en los años 1982-1983 y 1997-1998 (Widlansky et al., 2015). Por tanto, este fenómeno origina una sobrelevación del nivel del mar tanto en la costa Pacífico como Atlántica de Panamá (CEPAL, 2011). Muis et al. (2018) observaron un aumento en el percentil del 95% tanto de la marea meteorológica como de la componente estérica del nivel medio del mar (asociada a la expansión térmica) durante eventos de El Niño en la costa este del Pacífico. Esto indica que la variabilidad en el nivel del mar inducida por este fenómeno no sólo se debe a los efectos estéricos sino también a las alteraciones en los temporales.

Por otro lado, el Niño intensifica los movimientos convectivos y causa un aumento en la inestabilidad en el pacífico este ecuatorial, lo que resulta en temporales más intensos y frecuentes, fuertes vientos y, consecuentemente, oleaje más energético (Timmerman et al., 1999; Jin et al., 2014). De hecho, hay numerosos estudios que demuestran la influencia de este patrón climático en las condiciones extremas de oleaje en el mundo (por ejemplo, Izaguirre et al., 2011).

Además, estos eventos pueden inducir cambios en la intensidad, frecuencia y trayectoria de las tormentas. Así, varios estudios muestran su influencia en la actividad de los ciclones tropicales (ej., Toores&Tsimplis, 2014) y extratropicales (ej., Eichler&Higgins, 2006).

Otros índices de variabilidad climática relevantes en la costa Pacífico son la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la oscilación del Antártico (AAO) y la Oscilación anular del sur (SAM). Mientras, en la costa Caribe tienen influencia, además de los índices para caracterizar el ENSO, la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Stopa et al., 2013).

2.2. Caracterización de las dinámicas marinas

Esta sección contiene una revisión del estado del arte de las dinámicas marinas (oleaje y nivel del mar) en Panamá. Para ello, se han consultado estudios realizados a escala global y regional, principalmente. También se incluyen las aportaciones más relevantes procedentes de estudios a escala local o nacional, aunque estos son escasos y se centran en dos componentes del nivel del mar, el nivel medio y la marea astronómica.

Los litorales Pacífico y Atlántico panameño se caracterizan por presentar unas condiciones de clima marítimo muy diferentes. Por ello, en las siguientes subsecciones se describen las condiciones de oleaje y nivel del mar para ambas cuencas por separado.

2.2.1. Oleaje

En la **región Caribe**, el oleaje está generado por cinco tipos de viento. Harris (2018) los clasifica como mares de fondo (swell) locales, producidos por campos de vientos generados en el Caribe o como mares de fondo remotos, generados por campos de viento fuera de la zona de estudio. Los vientos locales son las corrientes superficiales de chorro del Caribe (Caribbean Low-Level Jet, CLLJ) y los frentes fríos, conocidos como Nortes. Por otro lado, los vientos remotos son los vientos alisios y las transiciones extratropicales (ET) de los ciclones tropicales. Los ciclones tropicales, por su parte, producen ambos tipos de oleaje, dada su variabilidad espacial. Una transición extratropical es simplemente la transformación de un ciclón tropical, de núcleo cálido y simétrico, en un ciclón extratropical, de núcleo frío y asimétrico.

De acuerdo a este autor, en el mar Caribe en general, los oleajes más energéticos son los asociados a los ciclones tropicales, seguidos por los Nortes. En cuanto a la frecuencia, dominan los oleajes generados por el CLLJ, seguidos por los alisios. En concordancia con este estudio, Appendini et al. (2014) indican que las condiciones medias del oleaje en el mar Caribe están controladas por el CLLJ. Estos vientos presentan sus mínimos anuales entre septiembre y noviembre, lo que se traduce en menores alturas de ola media en estos meses. Devis-Morales et al. (2017) encontraron que los mayores extremos de oleaje se producen en la estación seca (entre diciembre y marzo) y en los meses junio-julio y su variabilidad se debe a la influencia de la CLLJ y de los frentes fríos.

En cuanto a los valores de los estadísticos, la altura de ola media alcanza los 2 m, mientras que la de 50 años de periodo de retorno oscila entre los 4-5 m en el mar Caribe (CEPAL, 2011). De acuerdo con ARAP (2010), la altura de ola en el Caribe oscila entre los 0 o unos pocos centímetros hasta los 4 m.

El oleaje del **Pacífico** este tropical se genera, principalmente, por tormentas extratropicales que ocurren entre los 30° y 60° en ambos hemisferios, especialmente durante los meses de invierno (Amador et al., 2006). Más del 90% de la energía del oleaje en esta región procede de mar de fondo, tanto del Océano Pacífico Sur como del Océano Sur (Semedo et al., 2011). Parte de este mar de fondo procedente del Pacífico Sur puede aumentar su energía al interactuar con las condiciones locales y los vientos alisios al oeste de Sudamérica. Sin embargo, estas alturas de ola disminuyen a medida que se acercan a las costas de Centroamérica. Por otro lado, se distingue un mar de viento estacional generado por la corriente “Panama Jet” que atraviesa el istmo de norte a sur. En general, la energía del oleaje es menor en verano que en invierno (Fiedler and Lavin, 2016). Por último, los ciclones tropicales tanto del Pacífico Norte como del Caribe, generan oleajes más energéticos en la región este del Pacífico Tropical (Amador et al., 2006).

De acuerdo con ARAP (2010), la altura de ola en el Pacífico oscila entre los 0 - 2.5 m, aunque se han reportado olas de hasta 7 m en zonas muy concretas, como la playa Santa Catalina (en Veraguas).

2.2.2. Nivel del mar

2.2.2.1. Nivel medio del mar

De acuerdo con el estudio de CEPAL (2011), existen importantes variaciones estacionales en el nivel medio del mar en la costa Pacífica de Centroamérica. Según este estudio y en concordancia con los resultados obtenidos por Losada et al. (2013), hay una tendencia de aumento en el nivel medio del mar de 2 mm/año en la costa Atlántica Norte de América del sur y costa Caribe, mientras que en el Pacífico ecuatorial (hasta Centroamérica) este valor es de 1-1.5 mm/año.

2.2.2.2. Marea astronómica

La marea astronómica presenta un comportamiento radicalmente distinto entre la costa del Caribe y la del Pacífico. Mientras que en la primera el régimen de marea es micromareal, con amplitudes máximas inferiores a los 0.5 m, en la costa Pacífico supera los 3 m (CEPAL, 2011). De hecho, en el litoral Pacífico, este valor alcanza los 3-4 m, de acuerdo con Martínez (2020) y los 6-7 m, según ARAP (2010). Sin embargo, en este último estudio creemos que estos valores de 6-7 m no sólo corresponden a la contribución de la marea astronómica, sino que se deben además a otras variables de nivel del mar.

En la costa caribeña de Centroamérica, la onda de marea presenta un régimen micromareal de comportamiento variable en función de la latitud y/o cuenca. En el caso de Panamá, la marea presenta un comportamiento mixto semidiurno. El rango de marea medio oscila entre 0.21 m en Cristóbal y 0.24 m en Bocas del Toro, mientras que las pleamares vivas alcanzan valores entre 0.33-0.36 m (Lizano, 2006). Según ARAP (2010), la amplitud máxima es de unos 50 cm y existe un desfase de 1 hora y 50 minutos desde su llegada a Bocas del Toro hasta Puerto de Caledonia en Guna Yala.

El comportamiento de la marea astronómica en la costa Pacífico panameña es semidiurna pura, con ciclos de marea de aproximadamente 12 horas. El rango medio de marea en esta costa oscila entre los 2.31 m en Puerto Armuelles a 3.84 m en Balboa, mientras que las pleamares máximas varían entre 2.92 y 4.99 m en ambas localizaciones (Lizano, 2006). Los rangos de marea son superiores en zonas costeras semi-abiertas o semi-cerradas, alcanzándose los valores más altos dentro del Golfo de Panamá.

Por otro lado, diferentes autores han estudiado el efecto de los movimientos tectónicos y la deriva continental en las variaciones a largo plazo en la marea y sus constituyentes (Müller, 2012; Woodworth, 2010). Esto se debe a que las propiedades de la marea en una cuenca determinada vienen condicionadas por la configuración tectónica, ya que ésta determina su longitud y profundidad y, por tanto, sus períodos resonantes (Haigh et al., 2019; Green et al., 2018).

2.2.2.3. Marea meteorológica

Se han encontrado pocos estudios que analicen las condiciones de marea meteorológica (o también llamada marea de tormenta o *storm surge*) en las costas de Centroamérica. En el estudio llevado a cabo por CEPAL (2011) para Latinoamérica y Caribe, se obtuvo un valor del cuantil de 0.99 inferior a 0.2 m en ambas costas de Centroamérica. Por otro lado, Losada et al. (2013) obtuvieron un valor del percentil del 99% del storm surge de 0.3-0.4 m en el Pacífico y de 0.1-0.2 m en el Caribe. Muis et al. (2020) analizaron los valores extremos de nivel del mar a nivel global, incluyendo la contribución de la

marea astronómica y meteorológica. En este caso, el nivel del mar de 100 años de periodo de retorno es de 0.3 m y de 2-3.5 m en las costas Caribe y Pacífico panameñas, respectivamente.

2.3. Riesgos y Vulnerabilidad de las costas panameñas

El IPCC (2014) describe el riesgo de impactos relacionados con el clima como el resultado de la interacción de la peligrosidad asociada al clima (incluyendo la variabilidad climática a diferentes escalas temporales) con la vulnerabilidad y exposición de los sistemas humanos y naturales. Los cambios en el sistema climático y los procesos socioeconómicos, incluidas la adaptación y mitigación, son impulsores de cambios en la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.

En el apartado anterior se han descrito las variables de peligrosidad en la zona costera panameña. A continuación, se presenta un resumen de los principales estudios relacionados con los riesgos y la vulnerabilidad, principalmente de la zona costera.

Debido a sus características geofísicas y climáticas, Panamá cuenta con abundantes recursos hídricos que suponen un factor clave para su desarrollo socioeconómico y ambiental. Por este motivo, existen numerosos estudios relacionados con la gestión del recurso hídrico en Panamá (por ejemplo, Castillo, 2011; Escalante et al. (2011), Sabet-Rasekh&Saavedra (2016)), y su papel en la economía nacional (por ejemplo, CEPAL, 2009; Garcimartin et al., 2020). Sin embargo, la abundancia relativa de este recurso se ve seriamente amenazada por la variabilidad climática y los fenómenos hidrometeorológicos extremos (como son las sequías o las lluvias torrenciales) que, además, están aumentando como consecuencia del Cambio Climático (Fundación Natura, 2018). El aumento del nivel medio del mar, por su parte, provoca la salinización de los acuíferos comprometiendo la seguridad hídrica de la población (PNUD, 2018). Todo esto conlleva que Panamá se considere un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático. De acuerdo con el Programa de reducción de la vulnerabilidad por desastres naturales y cambio climático (BID, 2012), un escenario futuro de altas emisiones sin medidas de mitigación, podría suponer una pérdida de más del 14% de PIB nacional para el año 2100, a la vez que un posible agudizamiento de problemas sociales existentes, tales como la pobreza, la desigualdad o la desnutrición. Por ello, en los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios de análisis de la vulnerabilidad y riesgos asociados a desastres naturales y cambio climático centrados, especialmente, en aquellos aspectos que afectan a la seguridad hídrica (Mora et al., 2010; UNISDR - Las Américas/CEPRENAC, 2014; ONU, 2015; Global Water Partnership, 2015). Otros estudios de este tipo, pero a nivel local, los han realizado entidades nacionales tales como el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM) y la Autoridad del Canal de Panamá (ACP). Por estos motivos, el Gobierno de Panamá se ha visto en la necesidad de proponer y llevar a cabo acciones para reducir esta vulnerabilidad, tal y como se presenta en la Estrategia Nacional de Cambio Climático 2050 (MiAmbiente, 2019).

En cuanto a estudios relacionados con la vulnerabilidad y riesgos en la zona marino-costera panameña, destacan los llevados a cabo por IDB (1998), BIOMARCC-GIZ (2013) o PNUD (2017). La Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático en Panamá (PNUD, 2018) identifica como principales amenazas en esta zona a la elevación del nivel del mar, los fuertes vientos, las inundaciones y sequías, los deslizamientos de suelo y los sismos.

Cinglio et al. (2021) identifica las zonas más vulnerables al aumento del nivel medio del mar, que son: el Archipiélago de las Perlas y Guna Yala, los Golfos de Los Mosquitos, San Miguel, Parita y Chiriquí; Punta Chame, Punta Mala, Boca Chica y las costas de Colón.

La herramienta de DesInventar Senai de la UNDRR (United Nations office for Disaster Risk Reduction) contiene un inventario de los desastres (naturales y antropogénicos) causantes de impactos en distintos países de América Latina. Para Panamá, hay registros desde 1933 hasta 2020 llevados a cabo por DG_SINAPROC. De acuerdo a esta base de datos, las inundaciones son el principal desastre registrado en Panamá (un 25% del total de registros). Dichas inundaciones se deben principalmente a las lluvias intensas, tanto por sus efectos directos como indirectos, tales como alcantarillados obstruidos, saturación del suelo, desbordamiento de quebradas, etc. Otra causa importante de inundaciones, aunque menos frecuente (con 69 registros en los últimos 30 años), son los fuertes oleajes y/o las mareas altas, que provocan daños en infraestructuras y la evacuación de personas (Figura 4). Entre las zonas más afectadas destacan Puerto Caimito (en La Chorrera, Panamá Oeste) y Río Hato (en Antón, Coclé), seguidos por Puerto Armuelles (Barú, Chiriquí), Puerto Vidal (Las Palmas, Veraguas), Tonosí (Tonosí, Los Santos) y Llano Bonito (Chitré, Herrera). Estos datos concuerdan con el estudio de la ONU (2015), que identifica que las provincias más expuestas a las amenazas hidrometeorológicas son Chiriquí, Coclé, Panamá y Colón. De acuerdo con el estudio de PNUD (2018), los lugares con mayor susceptibilidad a inundaciones son aquellos ubicados en las costas del Caribe, destacándose distritos localizados en las provincias de Panamá y Bocas del Toro, mientras que en el Pacífico destaca el distrito de Tonosí, en la Provincia de Los Santos. Además, existen otros sitios susceptibles a inundaciones, al combinarse con factores de exposición ante crecidas de los ríos y aumento de las mareas o nivel del mar.

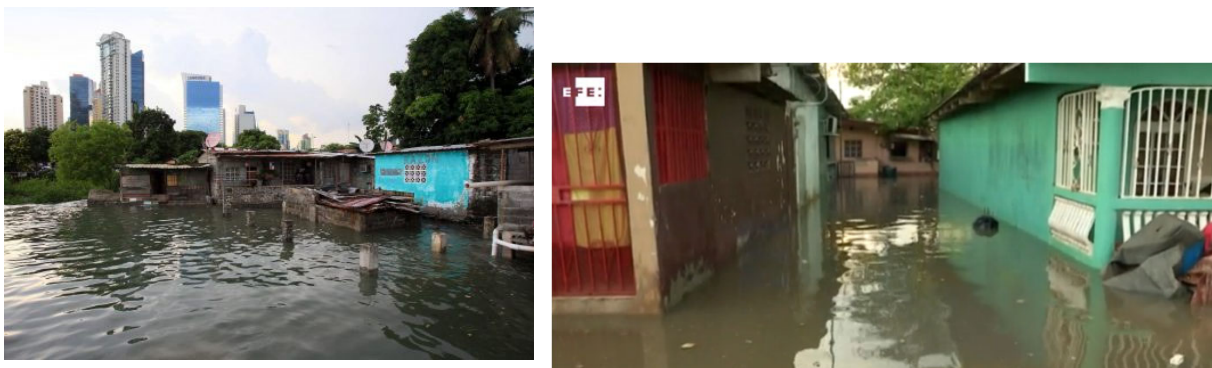


Figura 4. Imágenes de inundaciones asociadas con mareas altas o fuertes oleajes el 1 de Octubre de 2015, (izquierda) en Barrio Boca La Caja (en Ciudad de Panamá) y (derecha) en Puerto Caimito. Fuente: EFEverde y Agencia EFE, respectivamente.

La Tabla 1 recoge alguna de las noticias publicadas en la prensa nacional de eventos de inundaciones asociados con mareas altas y fuertes oleajes.

Fecha	Fuente	Información
1 Octubre 2015	Redacción EFEverde	Inundaciones en la costa del Pacífico de Panamá a causa de la marea alta, que superó los 5.4 m.
18 Octubre 2016	Radiopanama.com.pa	La coincidencia de lluvias con marea alta deja inundaciones en la provincia de Panamá Oeste
7 Noviembre 2017	TVN noticias	Mar de fondo en las costas del Pacífico entre el 8 y 12 de noviembre. Se esperan marejadas con presencia de olas de 1-2.5 m y periodos de 16-22s
12 Septiembre 2018	Panamá América	Se esperan niveles de 2-3 m y periodos de oleaje de 19-20 s. Inundaciones en Puerto Caimito, Kosovo y Astillero.
17 Mayo 2019	Ensegundos.com.pa	En alerta distintas zonas costeras del pacífico por la coincidencia de mar de fondo con fuertes lluvias y marea alta. Se alcanzarán hasta los 5.18 m entre el 17 y 22 de mayo

Tabla 1. Noticias publicadas en la prensa nacional sobre eventos de inundaciones asociadas a mareas altas o fuertes oleajes

De acuerdo con la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático en Panamá (PNUD, 2018), las zonas más expuestas a las amenazas tanto de ascenso del nivel del mar como a eventos de mareas altas son: Bocas del Toro, Costa Abajo de Colón y Arco Seco, en la región Caribe occidental y Limones y Puerto Armuelles, en la región Pacífico occidental.

Respecto a la erosión costera, existe un estudio realizado por Wetlands International (2020) en la zona de la comunidad de Garachiné (distrito de Chepigana, en Darién). Esta zona sufre un importante retroceso de la línea de costa debido a los fuertes oleajes y al aumento del nivel medio del mar. En promedio retrocede 0.94 m/año y ha perdido una importante superficie de manglar (2.8 ha), lo que aumenta su grado de exposición. De hecho, dada la importancia que tienen los arrecifes coralinos y los manglares en Panamá como medida de protección costera, existen varios estudios relacionados con este tema (por ejemplo, ANAM-ARAP, 2013; Díaz et al., 2004; Breedy, 2008).

3. RECOPIACIÓN DE LAS BASES DE DATOS HISTÓRICAS DISPONIBLES RELACIONADAS CON LAS VARIABLES DE PELIGROSIDAD Y EXPOSICIÓN DE LAS COSTAS

3.1. Recopilación y evaluación de los productos de reanálisis global disponibles

Las variables meteorológicas de viento y presión atmosférica a nivel del mar son los principales forzadores de las dinámicas marinas. Durante los últimos años, el número de observaciones medidas de estas variables se ha incrementado notablemente. Sin embargo, las medidas provenientes de instrumentos in-situ, pese a ser las más fiables, carecen de la resolución espacial necesaria para acometer estudios a escala global y regional. Desde los años 80, las medidas satelitales proporcionan buena cobertura espacial, pero con medidas temporales discontinuas. Ante estos problemas, la solución más apropiada son los datos procedentes de los reanálisis globales, que proporcionan un conjunto de variables atmosféricas espacial y temporalmente consistentes para un largo período de tiempo. Estos productos de reanálisis combinan datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos. La Tabla 2 detalla las características de los productos de reanálisis internacionales más recientes.

Nombre	Institución	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura temporal
ERA5	ECMWF	0.25 x 0.25	1 -hora	1950 - presente
MERRA2	NASA	0.625 x 0.5	3 - horas	1980 - presente
JRA-55	JRA	0.5625 X 0.5625	3 - horas	1958 - presente
CFSR / CFSv2	NOAA	0.3 x 0.3 (v1) y 0.2 x 0.2 (v2)	1 -hora	1979 - 2009 (v1) y 2009 - presente (v2)

Tabla 2. Características de los reanálisis globales más recientes.

De los cuatro productos mencionados en la tabla anterior, los que mayor resolución espacial y temporal tienen son ERA5 (Hersbach et al., 2020), procedente del centro europeo ECMWF, y CFSR, procedente de los centros de EEUU NCEP y NCAR.

El reanálisis global CFSR (Saha et al., 2010) es un producto de tercera generación ejecutado con el modelo acoplado atmósfera-océano Climate Forecast System (CFS), que representa la interacción global entre los océanos, la tierra y la atmósfera. Proporciona estimaciones del estado de la atmósfera y el océano en el período 1979-2010, con una resolución de espacial de 0.3° y datos horarios. El producto CFSv2 (Saha et al., 2014) proporciona información desde 2010 hasta la actualidad, con una resolución de espacial de 0.2° y se puede considerar una continuación de CFSR.

ERA-5 es la última base de datos de reanálisis global generada por el Centro Europeo de Predicciones Climáticas a Medio Plazo (ECMWF, Dee *et al.*, 2011), después de sus antecesores FGGE, ERA-15, ERA-40 y ERA-Interim. El sistema de asimilación de datos que utiliza ERA-5 es el IFS Cycle 41r2 4D-Var. Cubre

el periodo desde 1950 hasta el presente, con una resolución espacial de 0.25°. Contiene información de multitud de variables no sólo atmosféricas, sino también de los estados de mar. Las principales ventajas que presenta esta base de datos con respecto a su predecesor ERA-Interim son: mayor resolución temporal y espacial; mejor representación de la troposfera y de los ciclones tropicales; mejor balance global de precipitación y evaporación; y mayor consistencia entre la temperatura superficial del océano y el hielo marino. Los datos de ERA-5 están disponibles para descarga en: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>.

A continuación, se desea seleccionar la base de datos de reanálisis más adecuada para este proyecto, que servirá de forzamiento en los modelos numéricos de generación de las bases de datos en Panamá. Para ello, se han comparado ambos reanálisis con los datos instrumentales disponibles en la zona de estudio. En mar abierto, sólo se han encontrado los datos procedentes de las boyas del NDBC de la NOAA (<https://www.ndbc.noaa.gov/>). Aunque estas boyas están muy alejadas de las costas de Panamá, se han utilizado para determinar la pericia de estos modelos tanto en el Océano Pacífico oriental como en el Mar Caribe. Además, se han utilizado los datos de la velocidad del viento medidos por tres estaciones meteorológicas instaladas por ETESA, dos de ellas en la zona costera a ambos lados del Canal de Panamá y la tercera, en Bocas del Toro (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>). La Figura 5 muestra la localización tanto de las boyas del NDBC (izquierda) como de las estaciones meteorológicas (derecha) seleccionadas para la validación. Los resultados muestran que, en todos los casos, la correlación es mayor para ERA5 que para CFS. Además, el BIAS y el RMSE es inferior en todas las estaciones, salvo en la boya del Pacífico (Figura 6 Figura 7). No se ha podido validar la presión atmosférica a nivel del mar porque no hay datos in situ de esta variable. Por estos motivos, se decide utilizar el reanálisis de ERA5 para la generación de las bases de datos de Panamá. La alta dispersión de los datos en las estaciones meteorológicas se debe a que el viento en esas zonas tan costeras está afectado por las condiciones locales, que no son capturadas por los reanálisis globales.

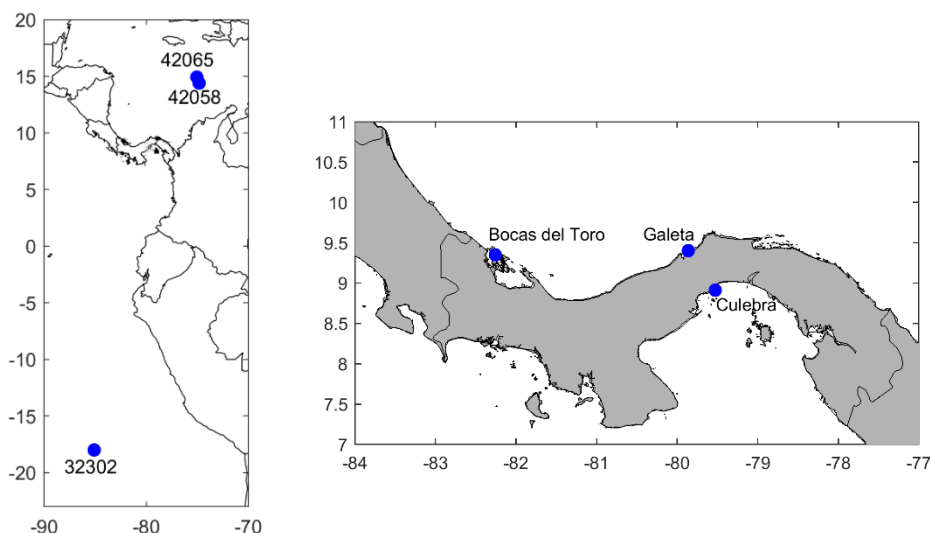


Figura 5. (Izquierda) Localización de las boyas del NDBC y (derecha) de las estaciones meteorológicas de ETESA, con los que se han validado los datos de velocidad del viento procedente de los reanálisis globales.

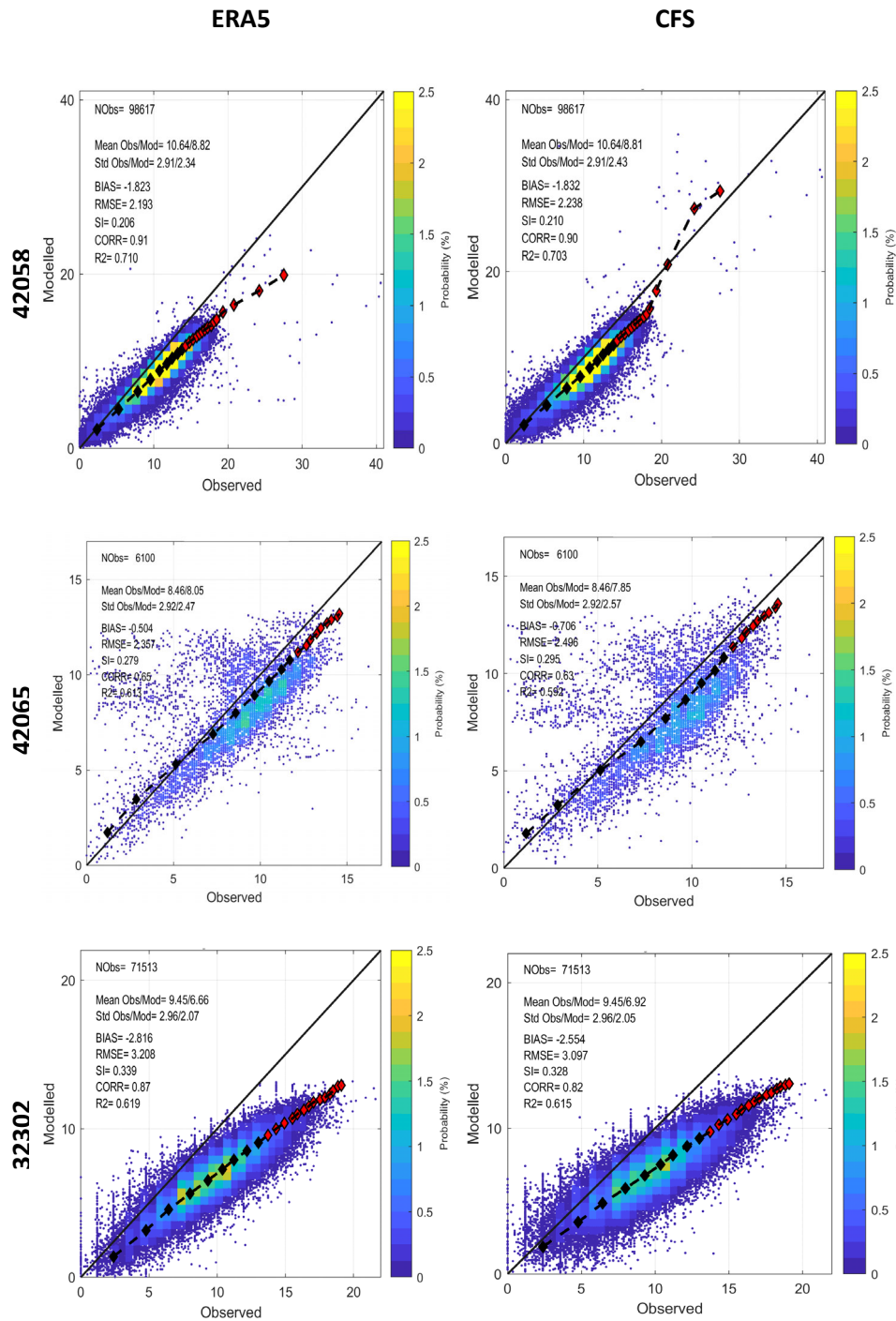


Figura 6. Comparación de los datos de velocidad del viento en superficie procedente de ERA5 (izquierda) y CFS (derecha) con los medidos por las tres boyas del NDBC.

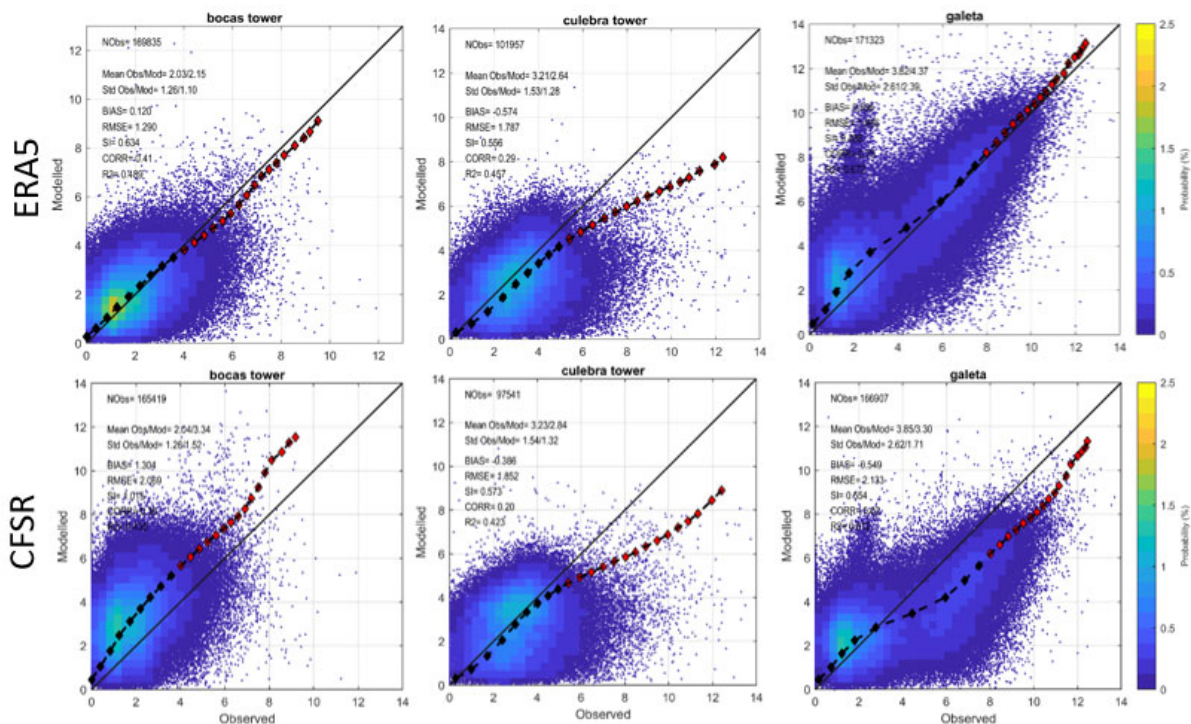


Figura 7. Comparación de los datos de velocidad del viento en superficie procedente de ERA5 (arriba) y CFS (abajo) con los medidos por las tres estaciones meteorológicas de ETESA.

3.2. Búsqueda de información batimétrica

Los modelos numéricos tanto de generación y propagación de oleaje como de circulación requieren de información batimétrica. Las mallas de cálculo no sólo abarcan la zona de la plataforma continental panameña, sino que se extienden centenas de kilómetros mar adentro. Por este motivo, se necesitan dos tipos de batimetría: (1) una general que ofrezca información lejos de costa; y (2) una batimetría regional, específica para la zona de estudio, que aporte información detallada de la plataforma continental y de la morfología costera.

La batimetría general se suele extraer de las bases de datos globales, como ETOPO (NOAA National Geophysical Data Center, 2006) o GEBCO (Beker et al., 2009). En este caso, se ha optado por utilizar la base de datos GEBCO (2021), por ser la más actualizada y de mayor resolución (Figura 8-izquierda). Esta base de datos tiene una cobertura global y una resolución espacial de 15 arco-segundos (~460 m). Contiene información no sólo de la profundidad, sino también de la elevación sobre la tierra y sobre el hielo. Combina distintas fuentes de datos desde medidas directas, tales como datos de sondas mono- y multihaz, sensores lidar, sensores ópticos, etc.; y medidas indirectas, como datos recogidos mediante vuelos aéreos, de satélite, de cartas náuticas, datos interpolados, etc. El nivel de referencia de esta base de datos es el nivel medio del mar.

Respecto a la batimetría regional, se ha hecho una revisión de los datos batimétricos disponibles a nivel nacional. La base de datos más actualizada y completa procede de la digitalización de las cartas náuticas a escala 1:250000, llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG) en 2019 y disponible para descarga en el portal de datos GIS del STRI (<https://stridata->

si.opendata.arcgis.com/datasets/bathymetry-of-the-republic-of-panama/explore) (Figura 8-derecha). Esta base de datos contiene una zonificación para las profundidades de 10, 20, 50, 100 y 200 m. En concreto, se trata de polígonos que delimitan zonas con estas profundidades, sin haber una transición entre ellos. Por tanto, no se trata de una batimetría con formato [x,y,z] ni de isolíneas correspondientes a las distintas isobatas, que permitan una reconstrucción suave y homogénea el fondo marino. Por este motivo, esta base de datos no es adecuada para la generación de las mallas numéricas.

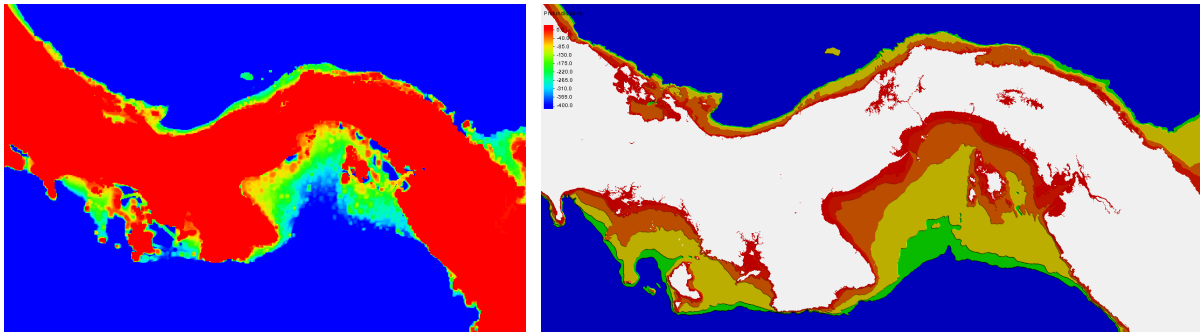


Figura 8. (Izquierda) Zoom de la topobatimetría de GEBCO (2021) en la zona de estudio. (Derecha) Zonificación de la batimetría de la costa panameña realizada por el IGNTG a partir de la digitalización de cartas náuticas.

Por otro lado, en el marco del proyecto Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica (TNC, 2008), se generaron batimetrías y líneas de costa para ambas costas panameñas (Figura 9). Estas batimetrías proceden de la digitalización de cartas náuticas (1:25000 a 1:300000), combinado con el resto de información cartográfica disponible en la región. Dada su alta resolución, principalmente cerca de costa (Figura 9- izquierda), se van a incorporar como batimetría regional en la siguiente fase del proyecto, para la generación de las mallas numéricas necesarias en los modelos hidrodinámicos y de generación y propagación del oleaje.

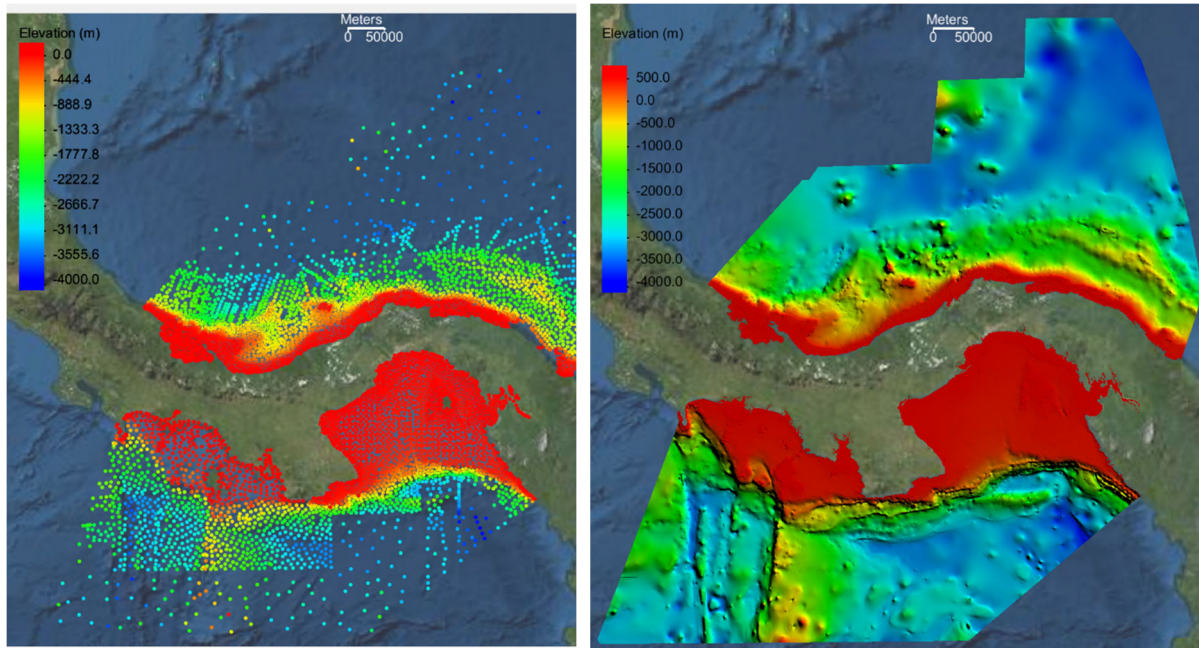


Figura 9. (Izquierda) Puntos batimétricos e (derecha) imágenes ráster de los modelos batimétricos de las costas Caribe y Pacífico panameñas generadas en el marco del proyecto "Evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica".

3.3. Revisión y evaluación de bases de datos de dinámicas marinas disponibles

Se ha hecho una revisión exhaustiva de las bases de datos de dinámicas marinas disponibles en ambas costas de Panamá. Se han buscado datos tanto instrumentales como procedentes de modelos numéricos (hindcast). En este apartado y en el Anexo II se presentan las bases de datos más actualizadas y relevantes para la zona de estudio.

3.3.1. Oleaje

Las bases de datos de hindcast de oleaje más relevantes para la zona de estudio se presentan en la Tabla 7. No se han encontrado bases de datos a nivel nacional o local. Las de mayor resolución espacial son bases de datos a nivel regional que abarcan el Caribe y Golfo de México o la costa del Pacífico Este. Por otro lado, no se dispone de datos de boyas para la región marino-costera panameña, por lo que sólo se usarán los datos de altimetría como fuente de información instrumental. Aunque las boyas del NDBC de la NOAA se localizan lejos de la zona de estudio (Figura 9-izquierda), se han utilizado para validar los datos de hindcast en aguas profundas. Entre las distintas bases de datos de hindcast, en este estudio se van a evaluar dos de ellas: GOW2 y GOW-ERA5. Estas bases de datos se han desarrollado en IHCantabria y cuentan con datos horarios obtenidos a partir de reanálisis punteros.

GOW2 es la versión más reciente de GOW (Global Ocean Waves), una reconstrucción histórica mundial del oleaje con resolución temporal horaria (Perez et al. 2017). Esta base de datos está generada con el modelo WaveWatchIII (WW3), cuyos forzamientos proceden del reanálisis global CFSR y de su continuación CFSv2. Cuenta con una cobertura global de resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, y una resolución mayor ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) en las regiones próximas a la costa continental y alrededor de las islas oceánicas. El periodo histórico disponible de GOW2 cubre más de 40 años (desde 1979 hasta 2021).

El hindcast GOW-ERA5 es una base de datos a nivel global con resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y temporal horaria, en el periodo comprendido entre 1985 y 2021. Ha sido generada con el modelo WW3 forzado con el reanálisis de ERA5. La ventaja de esta base de datos es que dispone de información del espectro del oleaje (de 3 particiones) en cada uno de los nodos.

La Tabla 8 recoge las fuentes de datos instrumentales de oleaje disponibles en la zona de estudio. La base de datos de altimetría satelital que se va a utilizar para validar los hindcast pertenece a la Iniciativa de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea. En junio de 2019 se publicó la primera versión de ESA Sea State CCI v1. Los datos se pueden descargar de forma gratuita en <https://climate.esa.int/en/projects/sea-state/data/>. Dicha base de datos abarca un periodo de 28 años (de 1992 a 2018) e integra medidas intercalibradas procedentes de 10 altímetros: Topex-Poseidón, Jason1, Jason2, ERS-1, ERS-2, Envisat, CryoSat-2 y SARAL. Más detalles sobre esta base de datos se describen en la Tabla 3. Los datos empleados en este estudio corresponden con el nivel 2 de procesamiento (L2p), caracterizado por medidas de altura de ola significativa a una frecuencia de 1 Hz, que han pasado un control riguroso de calidad y de validación (Dodet et al., 2020).

Misión	Instrumento	Periodo observado
ERS-1	RA	1991 - 2000
TOPEX	NRA	1992 - 2006
ERS-2	RA	1995 - 2011
GFO	GFO-RA	1998 - 2008
JASON-1	Poseidon-2	2001 - 2013
ENVISAT	RA-2	2002 - 2012
JASON-2	Poseidon-3	2008 - 2019
CRYOSAT-2	SIRAL	2010 - presente
SARAL	AltiKa	2013 - presente

Tabla 3. Altímetros integrados en la base de datos Sea State CCI v1.

De forma análoga a como se hizo en el apartado 3.1 para el viento, se han comparado los datos de altura de ola procedente de los hindcast GOW2 (CFS) y GOW-ERA5 con los medidos por las boyas del NDBC mostradas en la Figura 5-izquierda. Aunque las diferencias no son muy significativas, en los tres casos GOW-ERA5 presenta una mejor correlación y unos valores menores del RMSE y del BIAS que GOW2 (Figura 10).

ERA5

CFS

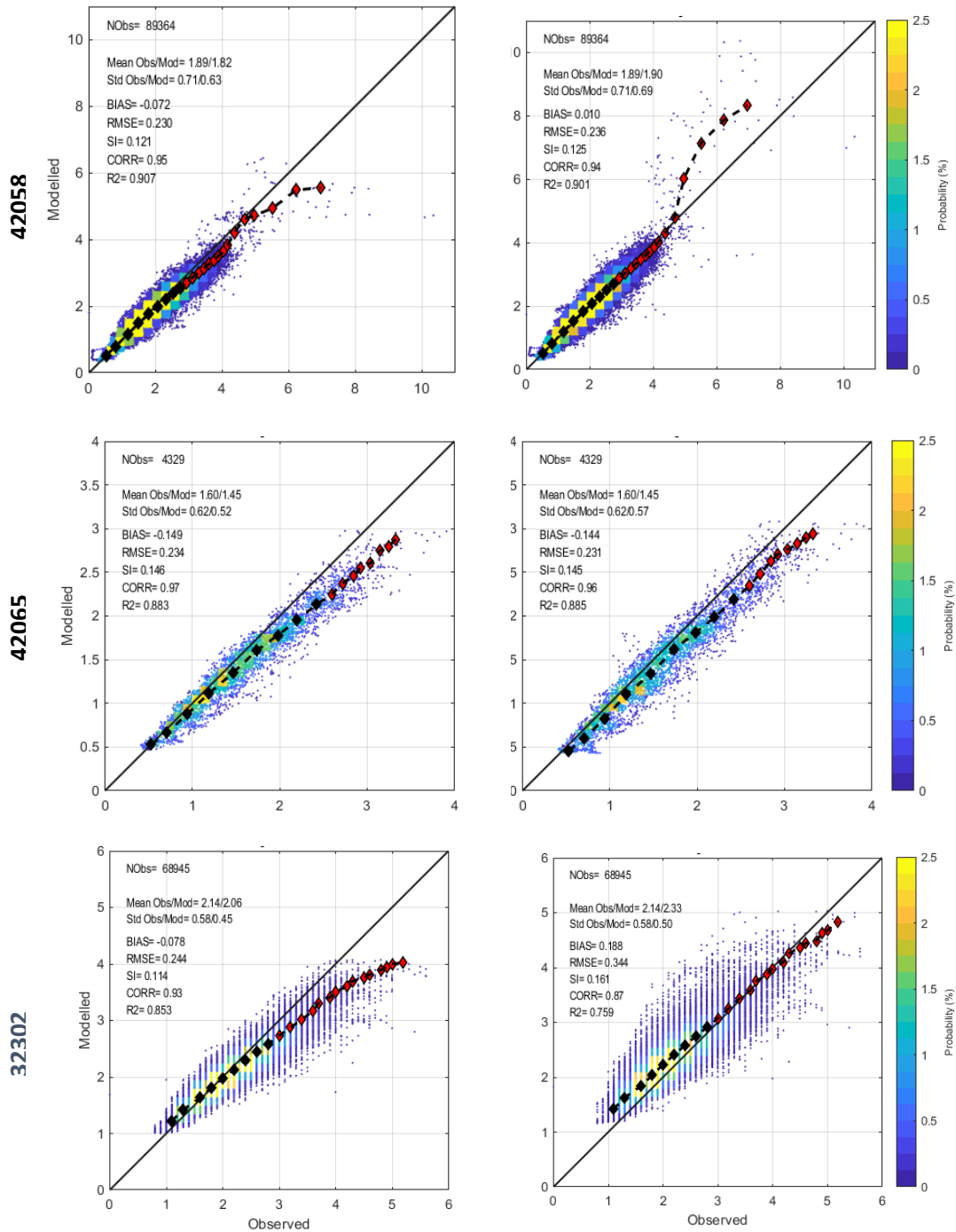


Figura 10. Comparación de los datos de altura de ola de los hindcast GOW- ERA5 (izquierda) y GOW2 (CFS) (derecha) con los medidos por las tres boyas del NDBC.

Además, estas bases de datos se han comparado con los datos de satélite de ESA-CCI SeaState v1 para su validación más cerca de la zona de estudio. Para ello, se ha definido un punto en el litoral Pacífico y Atlántico a una distancia de costa mayor a 10 km a fin de disponer de suficientes datos de satélite de buena calidad (Figura 11). A continuación, se han seleccionado los datos de altimetría en un radio de $r=0.2^\circ$ en torno al punto de interés y se han creado los pares de datos de modelo-satélite. Para ello, a cada dato de satélite se le ha asignado su correspondiente valor del modelo con una diferencia de tiempo inferior a una hora (ya que los datos del modelo son datos horarios). Por último, se ha analizado la correlación entre ambos (Figura 12). En este caso, los resultados obtenidos para GOW2 son ligeramente mejores que para GOW-ERA5, ya que en este caso los valores de altura de ola están subestimados. Sin embargo, ya que las diferencias no son muy marcadas y ya que GOW-ERA5 da mejores resultados en la comparación con las boyas (tanto en viento como en altura de ola), se decide seleccionar esta base de datos de hindcast para la generación de la base de datos de oleaje en Panamá.

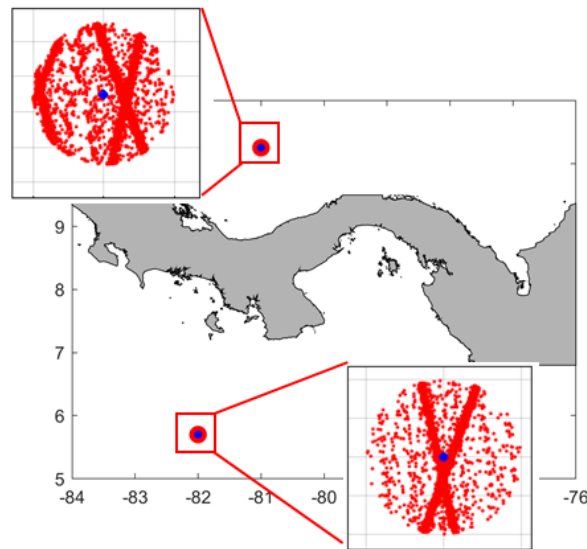


Figura 11. Localización de los puntos para la validación de las bases de datos de hindcast con datos de altimetría. En rojo se muestran los datos de satélite disponibles en un radio de 0.2° .

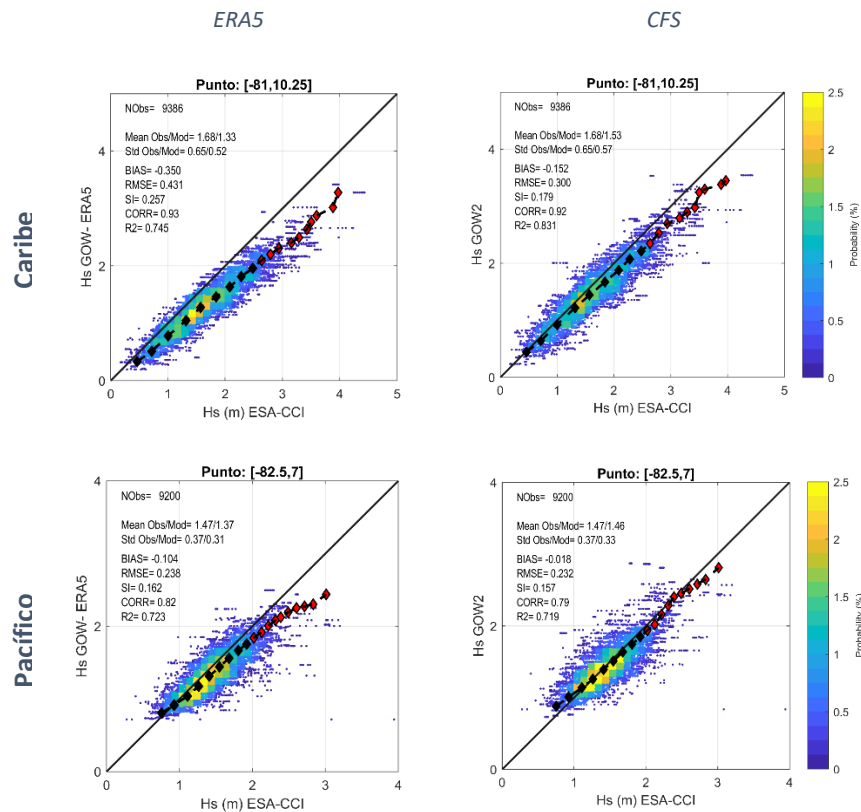


Figura 12. Comparación de los datos de altura de ola de los hindcast GOW- ERA5 (izquierda) y GOW2 (CFS) (derecha) con los de satélite de ESA-CCI SeaState v1.

En la generación de la base de datos de oleaje en Panamá, los espectros del hindcast de GOW-ERA5 se van a introducir como condiciones de contorno en las mallas numéricas, a fin de incluir en las simulaciones los oleajes generados fuera de la zona de estudio (es decir, los swells).

Con objeto de demostrar la importancia de introducir dichos espectros como condición de contorno, se ha estudiado el clima del oleaje en un punto costero representativo del litoral Pacífico panameño con coordenadas 7°N-79°O. La localización de la República de Panamá, entre las latitudes 7°N y 8°N, hace que la costa sea alcanzada por sistemas de oleaje con orígenes muy diversos y, por ende, con características muy diferentes. La Figura 13 muestra la energía acumulada proveniente de cada dirección media y periodo de pico para el punto de análisis, dejando patente la multimodalidad del clima del oleaje en la zona. En este sentido, cada uno de los máximos locales puede asociarse con un sistema de oleaje distinto. En total, cuatro son los sistemas de oleaje principales, cada uno de ellos con energías, periodos y direcciones muy diferentes entre sí.

Pese a encontrarse en el hemisferio norte, la mayor parte de la energía del oleaje que llega a esta costa es transportada por swells de largo periodo generados en el Pacífico Sur. La Figura 13 evidencia este hecho (sistema S1 de la Figura 13), mostrando un pico de energía dos veces superior al asociado al siguiente sistema de oleaje con mayor aporte energético. Estos swells dejan atrás su zona de generación y se propagan miles de kilómetros hasta alcanzar la costa panameña con direcciones (de

procedencia) que varían principalmente entre 200° y 240° y con periodos de pico entre 9 y 22 segundos. Estas direcciones se miden con respecto al norte, en sentido de las agujas del reloj.

Los oleajes de viento juegan también un papel importante en el clima del oleaje de esta localización. De hecho, el sistema de oleaje de viento con dirección sur (dirección media entorno a los 350°) y periodos de pico de entre 4 y 9 segundos, asociado a la “Panama Jet”, es el segundo sistema de oleaje que más energía transporta hasta la localización de estudio (sistema S2 de la Figura 13). Además, otro sistema de oleaje de viento caracterizado por direcciones (de procedencia) entre 195° y 245° y periodos de pico de entre 4 y 8 segundos, alcanza la zona de estudio transportando una notable cantidad energía (sistema S3 de la Figura 13).

Los swells generados en la región norte extra-tropical también se propagan hasta la costa panameña (sistema S4 de la Figura 13), especialmente durante los meses de invierno boreal. Estos oleajes alcanzan el punto de análisis muy filtrados direccionalmente (entre 295° y 305°) y con periodos entre 13 y 20 segundos.

La Figura 13 (panel superior derecho) también muestra la rosa direccional del oleaje en el punto analizado.

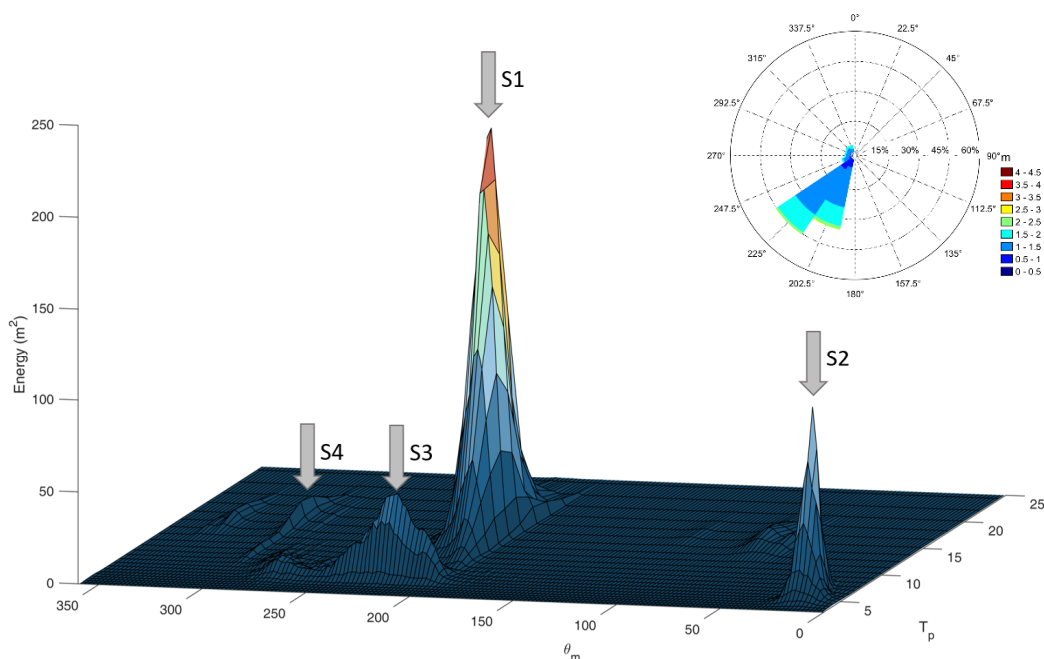


Figura 13. Energía acumulada (m^2) para cada periodo de pico (T_p) y dirección media (θ_m) del oleaje en el punto $[-79,7]$.
 (Panel superior derecho) Rosa direccional del oleaje (muestra las direcciones de procedencia del oleaje).

3.3.2. Nivel del mar

Las variaciones en el nivel del mar constan de movimientos periódicos y movimientos irregulares, de los cuales los primeros se deben a la contribución de la marea astronómica mientras que los segundos (llamado residuo no astronómico) incluyen tanto las variaciones en el nivel medio del mar como la marea meteorológica. En este apartado se describen las distintas bases de datos e información instrumental disponible de estas tres componentes de nivel del mar.

Respecto a datos instrumentales (Tabla 10), se han consultado las principales fuentes de información sobre mareógrafos a nivel global. Éstas son GESLA3 (Global Extreme Sea Level Analysis), PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level), UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center) y EC-WSL (World Sea Levels from the European Commission). Las tres primeras tienen datos de 5 mareógrafos de Panamá, aunque GESLA3 tiene las series temporales más completas y actualizadas. Por este motivo, se han analizado los datos de esta fuente junto con la información del mareógrafo de Bocas del Toro, disponible en la página del WSL de la Comisión Europea. Las características de estos 6 mareógrafos se detallan en la Tabla 4 y su localización se muestra en la Figura 14. GESLA3 proporciona datos horarios de nivel del mar, a los cuales se les ha aplicado la descomposición armónica para extraer la contribución de la marea astronómica y meteorológica. Por su parte, el WSL ya proporciona los datos de estas componentes por separado, aunque su frecuencia es 3-minutal, por lo que se ha promediado a escala horaria. Las Figura 15 y Figura 16 muestran las series temporales de nivel del mar en las 6 localizaciones, así como su descomposición en marea astronómica y meteorológica. A las series temporales de nivel del mar se les ha restado su valor medio bianual a fin de eliminar las variaciones bruscas (es decir, saltos) de nivel probablemente asociadas a cambios en la posición del mareógrafo. Con esto, también se está filtrando la tendencia en la variable de nivel medio del mar, que se estudiará con más detalle en el apartado 4.1.3.1. Es importante destacar que los mareógrafos localizados a ambos lados del Canal de Panamá (Cristobal y Balboa) cuentan con más de 100 años de datos, lo que permite llevar a cabo un buen análisis de la tendencia y del régimen extremal del nivel del mar.

Mareógrafo	Localización [Lon, Lat] (°)	Cobertura temporal
Bocas del Toro	[-82.26, 9.35]	2015- 2021
Cristobal	[-79.9, 9.35]	1907- 2017
Porvenir	[-78.948, 9.558]	2012 - 2018
Balboa	[-79.573, 8.962]	1907 - 2018
Naos (I y II)	[-79.533, 8.917]	1961 – 1965; 1991- 1997
Puerto Armuelles (I y II)	[-82.86, 8.273]	1955- 1968; 1983- 2001

Tabla 4. Características de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá

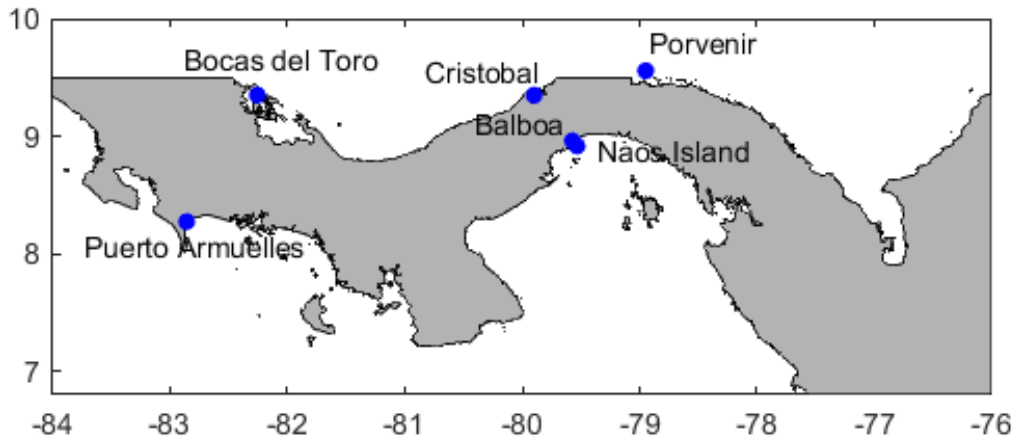


Figura 14. Localización de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá. El de Bocas del Toro se ha descargado del EC-WSL mientras que los demás de GESLA3.

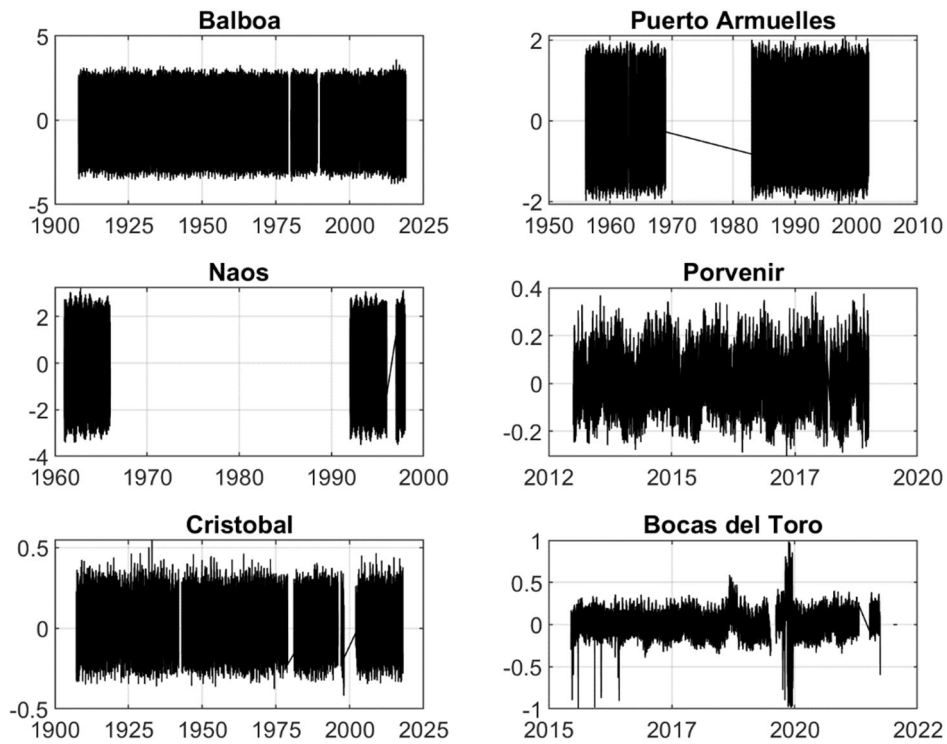


Figura 15. Series temporales de nivel del mar (m) registradas por los 6 mareógrafos disponibles en Panamá. A estas series se les ha restado su valor medio bianual.

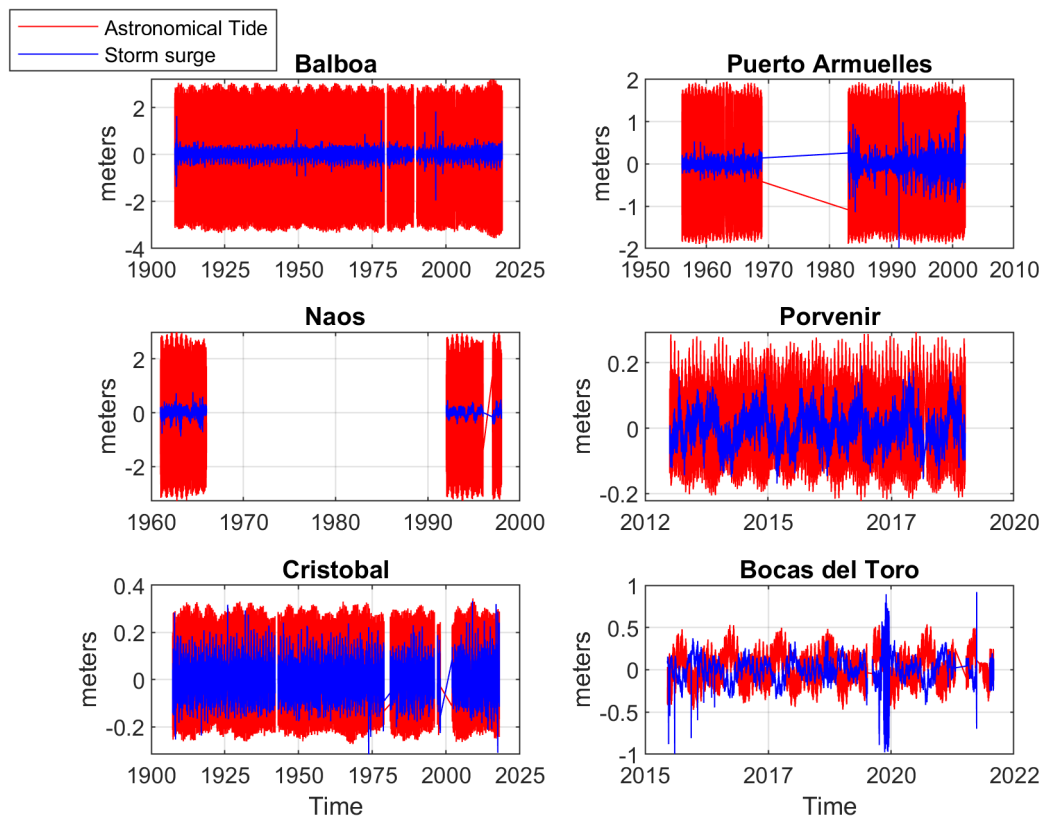


Figura 16. Series temporales de marea astronómica (en rojo) y marea meteorológica (en azul) derivadas de la descomposición armónica del nivel del mar medidos por los 6 mareógrafos disponibles en Panamá. Unidades: metros.

Para ambos mareógrafos, el de Cristobal y el de Balboa (en la costa Caribe y Pacífico, respectivamente), se han analizado las variaciones mensuales de las tres componentes del nivel del mar (nivel medio, marea astronómica y meteorológica) a fin de determinar el comportamiento a lo largo del año (Figura 17). Además, se ha representado un mes de marea astronómica para observar sus características. Los valores máximos de nivel medio del mar y marea meteorológica se producen en los meses de octubre-noviembre en el Caribe frente a los meses de junio-julio del Pacífico. Por otro lado, la marea astronómica presenta un régimen mixto y semidiurno en ambas costas, respectivamente. Las figuras correspondientes para el resto de mareógrafos se presentan en el Anexo I (Figura 36 -Figura 39).

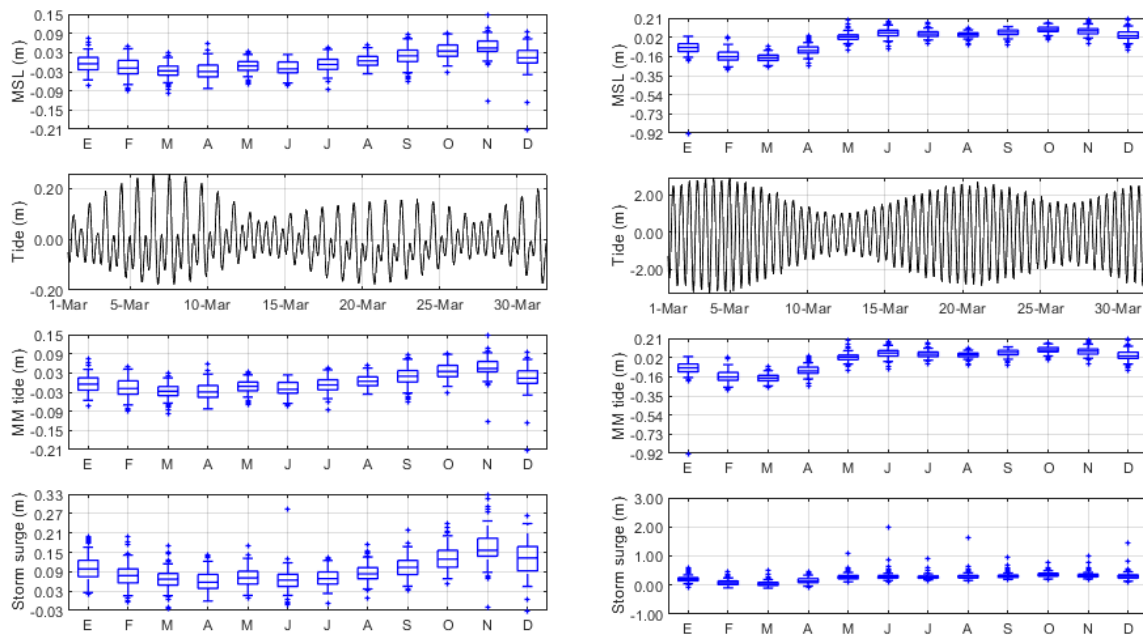


Figura 17. (Izquierda) mareógrafo de Cristóbal y (Derecha) de Balboa. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2^o) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3^o) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual.

3.3.2.1. Marea astronómica

Los datos sobre la variación de la superficie del mar debido a forzamientos astronómicos proceden de la base de datos GOT (Global Ocean Tides), desarrollada por IHCantabria. Dicha base de datos consiste en la reconstrucción horaria de la marea astronómica a partir de los constituyentes armónicos procedentes del modelo global de mareas TPX09, desarrollado por la Universidad del Estado de Oregón (Egbert et al., 1994; Egbert y Erofeeva, 2002). El modelo TPX0 asimila datos de las misiones TOPEX/POSEIDON y de mareógrafos, siendo uno de los modelos globales de marea más precisos. La base de datos incluye ocho constantes armónicas primarias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) y dos de largo periodo (Mf y Mm), proporcionadas en una malla global con $1/30^\circ$ de resolución espacial cerca de costa. A partir de estos constituyentes, se generan series horarias utilizando la herramienta de MATLAB t-tide (Pawlowicz et al., 2002).

Los datos de marea astronómica derivados de los mareógrafos se han utilizado para validar la base de datos GOT en Panamá. La Tabla 5 muestra los valores de pleamar máxima viva equinoccial (PMVE) derivados de ambas fuentes de datos. Se observa que los resultados son muy similares, a excepción del mareógrafo de Bocas del Toro, donde la diferencia es de 20 cm. Estas diferencias pueden estar asociadas a la localización del mareógrafo y/o a la importancia de los procesos tectónicos en esa zona.

	Mareógrafos (m)	GOT (TPX09) (m)
Balboa	3.19	3.08
Puerto Armuelles	1.95	1.97
Naos	3	3.04
Porvenir	0.29	0.28
Cristóbal	0.34	0.3

Bocas del Toro	0.54	0.3
----------------	------	-----

Tabla 5. Comparación de los valores de PMVE (m) derivada de los mareógrafos y del modelo GOT.

Por otro lado, se han analizado las variaciones espaciales en la amplitud máxima de la marea astronómica a lo largo de las costas panameñas (Figura 18). Para ello, se ha extraído la serie temporal de GOT en el periodo 1991-2021 en los puntos costeros a una resolución de ~3 km. Se observa una amplificación de la onda de marea en el interior de la bahía de los Muertos (provincia de Chiriquí) y en los Golfos de Montijo y de Panamá, alcanzando los valores más altos en este último caso, con una amplitud máxima de 3.1 m. Mientras que en la costa Pacífico la amplitud máxima oscila entre 2-3 m, en el Caribe varía entre 0.29-0.34 m.

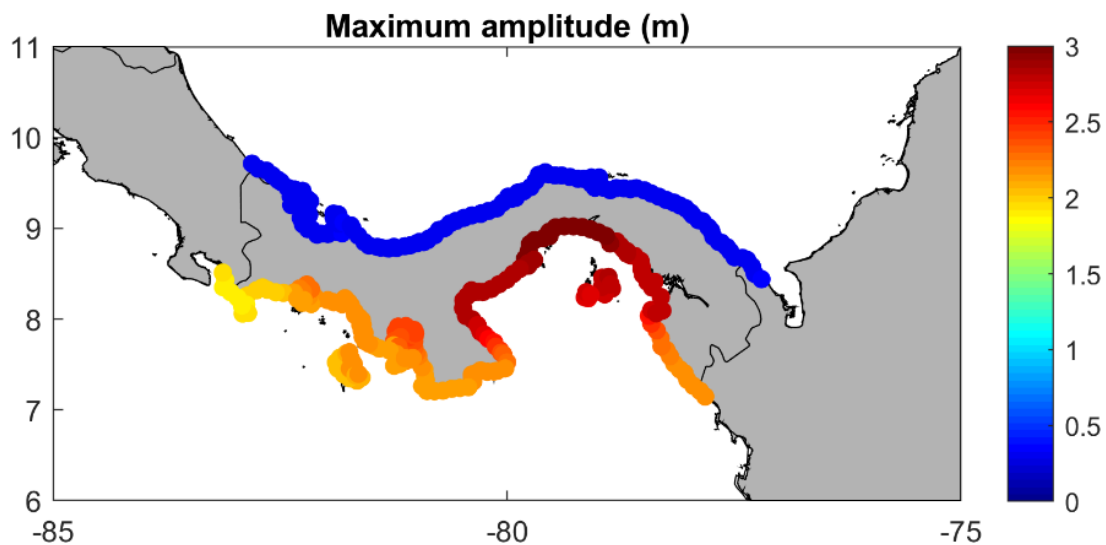


Figura 18. Variación espacial de la PMVE (m) en Panamá obtenida a partir de la base de datos GOT.

3.3.2.2. Residuo no astronómico

Existen diversas bases de datos históricas del residuo no astronómico o anomalías en el nivel medio del mar (SLA, de sus siglas en inglés) procedente de modelos numéricos. Las principales se describen en la Tabla 9. Estas anomalías son debidas a temperaturas del agua y salinidades inusuales, a corrientes costeras o a forzamientos atmosféricos, como son el viento y la presión atmosférica. Tal y como se mencionó anteriormente, el fenómeno de El Niño es responsable de importantes anomalías en el nivel medio del mar, por lo que es necesario tenerlo en cuenta en la generación de las bases de datos de nivel en Panamá. Por este motivo, en la siguiente fase del proyecto se analizarán las bases de datos de SLA más actualizadas y de mejor resolución a fin de incorporarlas como condiciones de contorno en el modelo hidrodinámico.

Respecto a la componente meteorológica, GOS1 es la única base de datos de marea meteorológica (que incluye sólo las variaciones de nivel por forzamientos atmosféricos) que se ha encontrado para la zona de estudio. Ésta abarca la región de Latinoamérica y Caribe en el periodo 1948-2008. Al no ser una base de datos actualizada, no se ha analizado. En su lugar, se han representado las series temporales de marea meteorológica obtenidas a partir de la descomposición armónica de las series de nivel registradas por los mareógrafos (Figura 19). En rojo se han marcado los valores por encima del

percentil del 99%. La muestra el valor del percentil del 99% de la marea meteorológica de los distintos mareógrafos. Se observa que, en general, el valor de este estadístico es superior en la costa Pacífico que en la Atlántica (0.26-0.28 m frente a 0.12-0.13 m) a excepción de Bocas del Toro, donde alcanza un valor de 0.29 m.

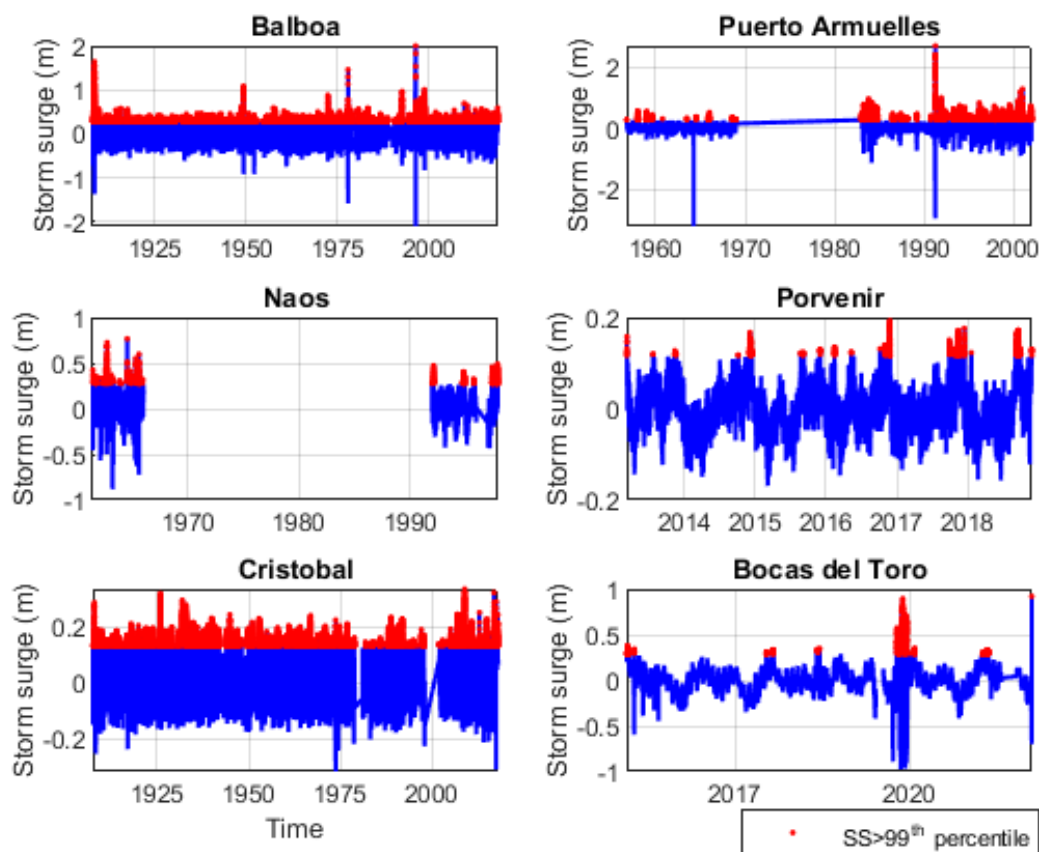


Figura 19. Series temporales de marea meteorológica obtenidas de los registros de los mareógrafos disponibles en Panamá

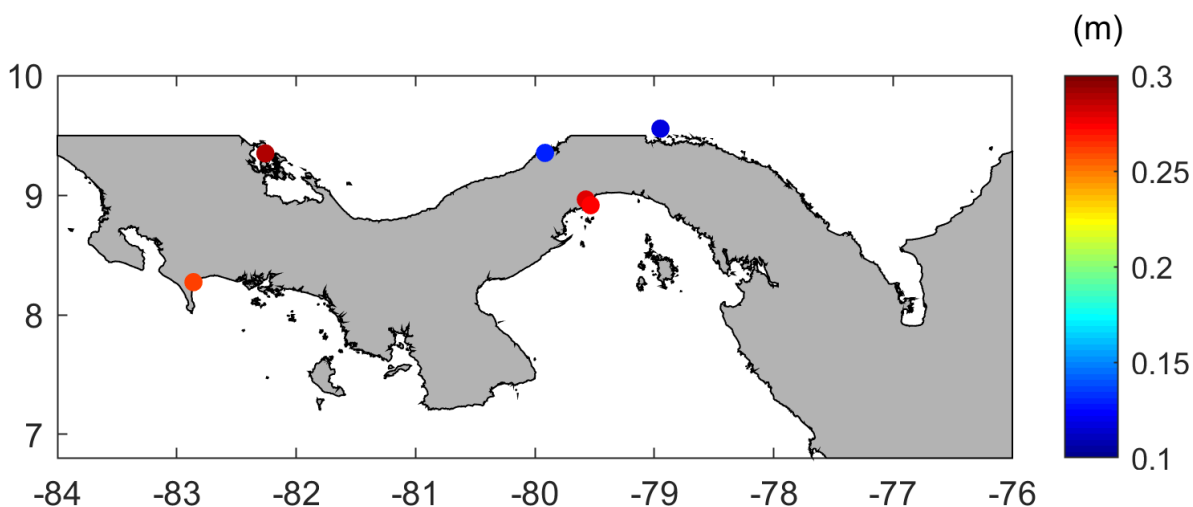


Figura 20. Valor del percentil del 99% de la marea meteorológica en los mareógrafos analizados

3.4. Revisión y evaluación de datos hidrológicos

La Autoridad del Canal de Panamá mantiene una red de 60 estaciones de medida a lo largo del Canal. La mayoría de ellas cuenta con pluviómetros, entre otros tipos de sensores, que recogen datos de precipitación pluvial cada 15 minutos. La fecha de instalación varía desde finales del S.XIX (como las estaciones de Alhajuela o Balboa Heights) hasta el año 2010 (por ejemplo, estaciones de Chagrecito y Cocolí). Además, hay 11 estaciones que miden la descarga de los ríos que desembocan en los lagos Gatun y Alajuela. Estos datos están disponibles para descarga en la página del Instituto Smithsonian (https://biogeodb.stri.si.edu/physical_monitoring/research/panamacanalauthority#download).

Aparte de los datos brutos, están disponibles los datos postprocesados mediante distintos estadísticos como son medias mensuales y anuales, desviaciones típicas, cuantiles, etc. Además, la ACP pone a disposición pública los informes anuales de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá, donde se recoge un análisis detallado de las variables hidrometeorológicas de las estaciones disponibles (<https://www.pancanal.com>).

Este estudio ha tomado los resultados postprocesados de pluviometría (Paton, 2019) para representar sus rangos de variación y su variabilidad espacial. La Figura 21 muestra los valores mínimos, medios y máximos de precipitación recogidos en cada una de las estaciones desde 1966 (o desde su instalación, si ésta es posterior a esta fecha) hasta el año 2019. Los valores mínimos de precipitación oscilan entre 0 y 3888 mm, mientras que los máximos lo hacen entre 2162 y 6464 mm. Por su parte, la precipitación media varía entre 1382 y 4824 mm. En cuanto a su variabilidad espacial, la precipitación es inferior en la vertiente Pacífico del Canal, en torno a la Ciudad de Panamá, mientras que alcanza los valores máximos al norte del lago Alajuela.

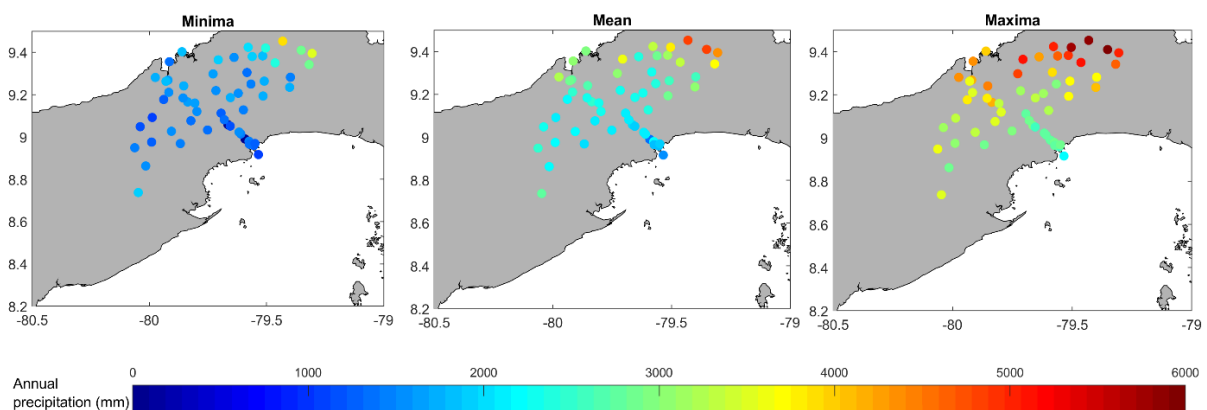


Figura 21. Precipitación mínima, media y máxima medidas por las estaciones que mantiene la ACP a lo largo del Canal de Panamá. Fuente de los datos: Paton (2019)

Un análisis similar se ha llevado a cabo con los datos de los caudales de los ríos (Figura 22). Se observa que los valores mínimos y máximos en las estaciones disponibles oscilan entre 0-0.63 m³/s y 52-2210 m³/s, respectivamente. El caudal medio, por su parte, varía entre 2.44-52.49 m³/s.

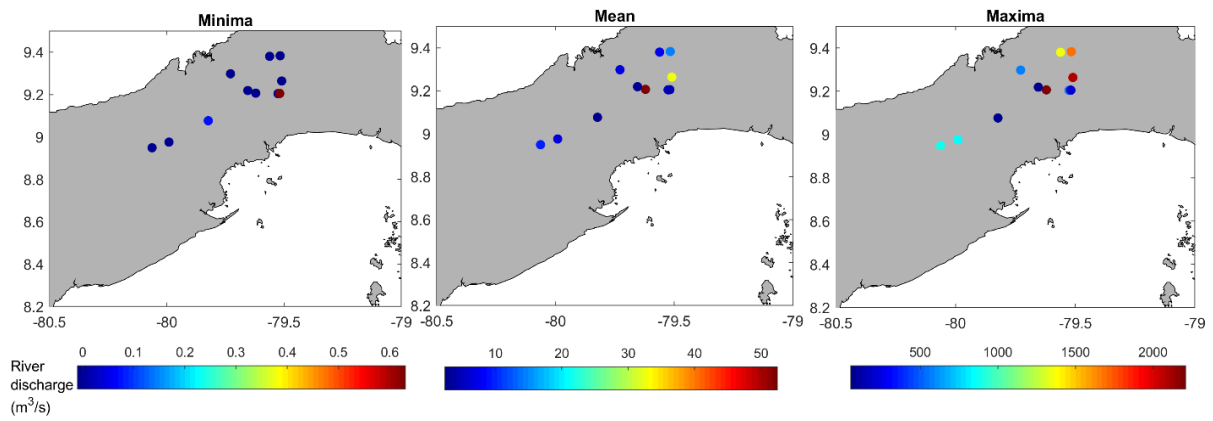


Figura 22. Caudales mínimos, medios y máximos medidas por las estaciones que mantiene la ACP a lo largo del Canal de Panamá. Fuente de los datos: Paton (2019)

4. CAMBIO CLIMÁTICO Y ESCENARIOS DE ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR A NIVEL NACIONAL

De acuerdo al Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para todos (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016), las inundaciones producto de las lluvias intensas y las sequías son las mayores amenazas hidroclimáticas en Panamá. Además, éstas se verán incrementadas a consecuencia del Cambio Climático. Sin embargo, debido a la amplia extensión de sus costas (en su mayor parte habitadas), la baja elevación de gran parte de esta área y la presencia de pequeñas islas, hace que la República de Panamá esté especialmente expuesta a los efectos derivados del aumento en el nivel medio del mar. Por ello, en este apartado se van a analizar las proyecciones de esta variable a lo largo del S.XXI bajo la influencia de distintos escenarios climáticos. Además, se presentan los resultados obtenidos en los estudios más recientes sobre los cambios futuros esperados en las variables de oleaje y marea meteorológica para la región de Panamá. Por otro lado, se describen los modelos y escenarios climáticos que se utilizan actualmente para obtener las proyecciones de cambio climático de las distintas variables met-oceánicas.

4.1. Modelos Climáticos Globales/Regionales

Las proyecciones de cambio climático se obtienen a partir de simulaciones utilizando modelos climáticos que simulan los intercambios de energía y masa entre los diferentes subsistemas climáticos (atmósfera, litosfera, hidrosfera, criosfera y biosfera) mediante ecuaciones matemáticas. Constituyen una de las principales fuentes de información sobre el cambio climático y, por ello, son la base para evaluar los impactos asociados a éste. Para realizar proyecciones a futuro, el forzamiento climático se ajusta a posibles escenarios futuros, que son los que se describen en el siguiente apartado.

4.1.1. Modelos climáticos globales (GCMs)

Los modelos climáticos globales (o modelos de circulación general, GCM) simulan multitud de procesos físicos mediante acoplamiento de simulaciones numéricas de la atmósfera y el océano, constituyendo así la herramienta más avanzada en la simulación de la respuesta del clima global al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. Estos modelos utilizan una malla tridimensional global, con una resolución horizontal que generalmente varía entre los 200 y 500 km y cuentan con entre 10 y 20 capas verticales en la atmósfera y, a veces, hasta 30 capas sobre los océanos.

El Grupo de Trabajo en Modelos Acoplados (WGCM) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP), desarrolló el Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP), a fin de establecer un protocolo para las salidas de los modelos de circulación acoplados atmósfera-océano (AOGCMs). Este proyecto se divide en varias fases, que buscan mejorar los modelos climáticos existentes, así como informar a las agencias tanto nacionales como internacionales de las posibles acciones para mitigar los efectos del cambio climático. La fase 5 es la fase más reciente del CMIP (CMIP5) que ha sido completada (2010-2014), y perseguía 3 objetivos específicos: (1) evaluar la capacidad de los modelos de simular el pasado reciente; (2) generar proyecciones de cambio climático en el futuro a dos escalas temporales, corto (hasta 2035) y largo plazo (hasta 2100); (3) comprender los factores que producen las diferencias en las proyecciones, como el efecto de las nubes o el del ciclo del carbono. La sexta fase (CMIP6) constituye la base de datos más actualizada e incorpora los últimos avances en estudios

climáticos. Esta fase aumenta la resolución espacial, mejora los procesos microfísicos de nubes, así como los procesos y componentes del ciclo biogeoquímico y de las capas de hielo (Eyring et al., 2019). Es la base de datos utilizada en los últimos informes del IPCC (en 2021 y 2022).

4.1.2. Modelos climáticos regionales (RCMs)

La información procedente de los GCMs no puede utilizarse para ciertos estudios regionales en áreas de geografía compleja, ya que tienen baja resolución espacial, del orden de cientos de kilómetros (IPCC, 2001). Por este motivo, es necesario disponer de información a menor escala espacial, lo que se consigue mediante el uso de los modelos climáticos regionales (RCM). Estos modelos aumentan la resolución de los GCM en un área limitada (normalmente, 5000 km x 5000 km). En este contexto, surgió, dentro del WCRP, el programa CORDEX (Experimento de *Downscaling* climático regional coordinado) (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>), que tiene como objetivo establecer un marco coordinado internacional para generar proyecciones de cambio climático a nivel regional a lo largo de todo el mundo, utilizando como forzamientos los datos de los GCMs. Dentro del programa CORDEX existe un dominio específico para la región de América Central. Hay 5 modelos regionales disponibles para este dominio, que pertenecen al CMIP5. La resolución horizontal de estos modelos es de 0.22° y 0.44°.

4.2. Escenarios de cambio climático

Las proyecciones de cambio climático a lo largo del siglo XXI y principios del XXII, se basan en escenarios de emisión de gases de efecto invernadero teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas actuales y las perspectivas de crecimiento. En el Quinto informe de evaluación del IPCC o AR5 (IPCC, 2013) se definieron 4 escenarios de emisión, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100, que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m². De las 4 trayectorias RCP, una contempla un escenario de nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel alto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (RCP8.5). Éste último es un escenario denominado “línea de base”, que no incluye ningún objetivo específico de mitigación. Se caracteriza por la ausencia de políticas de cambio climático y combina supuestos de alta densidad de poblaciones, un crecimiento relativamente lento de generación de ingresos, moderadas mejoras de cambio tecnológico y gasto energético, etc. Estos RCPs han sido desarrollados por 4 grupos/modelos diferentes: IIASA/MESSAGE, NIES/AIM, PNNL/MiniCAM, y PBL/IMAGE, para los RCP8.5, 6.0, 4.5 y 2.6, respectivamente.

En el último (Sexto) informe del IPCC, el AR6 (IPCC, 2021), se han definido un nuevo conjunto de escenarios de emisiones para explorar la respuesta climática a un rango más amplio de gases de efecto invernadero (GHG), usos del suelo y otros contaminantes que los considerados en el AR5. Estos escenarios, conocidos como trayectorias socioeconómicas compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways, SSPs*), comienzan en el 2015 e incluyen los escenarios SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, correspondientes a escenarios de muy bajas, bajas, intermedias, altas y muy altas emisiones de GHG, respectivamente. Las emisiones varían de un escenario a otro en función de asunciones socioeconómicas, niveles de mitigación de cambio climático, control de contaminantes del aire y aerosoles. En el caso de los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, las emisiones de CO₂ se duplican

respecto a los niveles del 2015 para el año 2100 y 2050, respectivamente. Para el SSP2-4.5, las emisiones de CO₂ se mantienen constantes hasta mediados de siglo, mientras que en los escenarios SSP1-1.9, SSP1-2.6, las emisiones disminuyen hasta un valor neto de cero en torno a 2050, seguido por niveles variados de emisiones negativas de CO₂.

Según el AR5, las proyecciones medias de aumento de la temperatura media global para el periodo 2081-2100, en relación con el periodo de referencia 1986-2005, se sitúan en el rango de 1.0° (RCP2.6) a 3.7°(RCP8.5). En el AR6, este valor aumenta en 0.08 [-0.01 a 0.12] °C.

4.1.3. Proyecciones del nivel medio del mar

Las variaciones en el nivel medio del mar es una consecuencia del cambio climático que afecta significativamente a las zonas y comunidades costeras en todo el planeta. Las variaciones en el nivel del mar global (GMSL) se deben al calentamiento de la superficie del océano y a la transferencia de masa de agua desde la criosfera (glaciares y hielo de Groenlandia y la Antártida) y desde tierra. Los cambios a escala regional pueden variar mucho respecto a los valores a nivel global, como consecuencia de cambios en la circulación oceánica (debido al viento) y la consecuente distribución del calor del océano, de masa y de salinidad (Melet et al., 2018). Además, otros procesos que afectan a los niveles del mar regional son los ajustes isostáticos glaciares (GIA), la gravitación terrestre, los efectos de rotación y deformación (GRD) y los movimientos verticales de la tierra (VLM) debido a la redistribución de masa entre la tierra y el océano (Slangen et al., 2017; Melet et al., 2018).

De acuerdo al Quinto y Sexto Informe del IPCC (AR5 y AR6, respectivamente), los principales causantes de los cambios en el nivel del mar a escala global y regional son: la expansión térmica, el uso del agua terrestre, los glaciares y el hielo, el nivel del mar dinámico y los GIA, que causan movimientos verticales del suelo. A continuación, se presenta una breve descripción de las proyecciones del nivel medio del mar desarrolladas en el marco del AR5 y AR6.

Las proyecciones de aumento de nivel del mar global obtenidas en el AR5 oscilan en el rango de 0.4 m (RCP2.6) a 0.63 m (RCP8.5) para el año 2100, respecto al periodo 1986-2005. En el AR6, dicho aumento varía entre 0.28-0.55 m (para el SSP1-1.9) y 0.63-1.01 m (para el SSP5-8.5), respecto al periodo de referencia 1995-2014.

IPCC-AR5 y SROCC

En el AR5 se desarrollaron las proyecciones del nivel medio del mar global para las distintas trayectorias de concentración representativas (RCP) combinando la información de los modelos climáticos del CMIP5 con los modelos de balance de masas de hielo y glaciares y con la contribución de la dinámica de hielos y de la reserva de agua terrestre. A continuación, en el SROCC (Oppenheimer et al., 2019) se actualizaron dichas proyecciones en base a una revisión de la contribución del hielo antártico al aumento del GMSL. Las proyecciones del AR5 aportan información sobre los cambios en el GMSL bajo la influencia de los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. La resolución espacial de esta base de datos es de 1°x1°, con datos anuales desde 2007 a 2100. Tanto el AR5 como el SROCC utilizan como periodo de referencia 1986-2005, mientras que en el último informe AR6 es el periodo 1995-2014. Entre estos dos periodos, el GMSL aumentó 3 cm, por lo que esta corrección se ha aplicado para permitir la comparación entre ambos informes. De acuerdo con el SROCC, con un nivel de confianza medio, el

GMSL va a aumentar entre 0.4 m (0.26-0.56 m) (RCP2.6) y 0.81 m (0.58-1.07 m) (RCP8.5) para 2110 respecto a su valor en el periodo 1995-2014.

IPCC-AR6

El AR6 utiliza simulaciones de modelos climáticos del CMIP6 para obtener nuevas proyecciones de aumento del nivel del mar global (GMSL) y regional (RSL) hasta 2150 (nivel de confianza medio) y hasta 2300 (con nivel de confianza bajo) para los distintos escenarios climáticos. Los modelos del CMIP6 tienen un rango mucho más amplio de sensibilidad climática que los modelos del CMIP5, por lo que en el AR6 se evalúan rangos con índice de probabilidad muy alta (*very likely range*). En este informe, se publican las proyecciones de aumento del nivel del mar a una resolución espacial de $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ y con resolución decadal desde el año 2020. Más detalles se pueden encontrar en el capítulo 9 del IPCC-AR6 (2021), que además incluye las diferencias entre AR5-SROCC y el AR6, de los distintos métodos empleados para proyectar los precursores del GMSL y RSL.

4.1.3.1. Proyecciones del nivel del mar en Panamá

En Panamá ya se han identificado las zonas más vulnerables al ascenso del nivel del mar, las cuales son: el Archipiélago de las Perlas y Guna Yala, los Golfos de Los Mosquitos, San Miguel, Parita y Chiriquí, Punta Chame, Punta Mala, Boca Chica y las costas de Colón (MiAmbiente, 2015). De hecho, en la comarca de Guna Yala, los nativos de Isla Cangrejo serán el primer pueblo indígena del mundo en abandonar sus tierras por el cambio climático (BBC News, 2017). De acuerdo con la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (PNUD, 2018), la región Caribe occidental de Panamá, en particular Bocas del Toro, Costa Debajo de Colón y la región costera del Arco Seco, está especialmente expuesta a la amenaza de aumento del nivel del mar. Un análisis de los datos del mareógrafo de Cristóbal muestra un aumento del nivel medio del mar de 1.4 mm/año durante el periodo 1909-1979, mientras que este valor aumenta a 1.8 mm/año en base a datos satelitales (BIOMARCC- USAID, 2013). Esto equivale a un retroceso de las playas entre 3.5 y 7 m en 40 años (PNUD, 2018).

En este estudio se han analizado las variaciones en el nivel medio del mar entre 2020 y 2100 en 4 puntos frente a las costas Caribe y Pacífico panameñas (Figura 23). Para ello, se comparan los datos de las proyecciones publicados en los informes AR5 y AR6 para los escenarios climáticos de estabilización media (RCP4.5 y SSP2-4.5) y de altas emisiones (RCP8.5 y SSP5-8.5) (Figura 24 y Figura 41 del Anexo I). En concreto, se comparan el valor medio del *mean ensemble* del AR5 frente al percentil del 50% del *ensemble* del AR6. Los resultados muestran pequeñas diferencias en el año 2050 (≤ 4 mm) para ambos informes, mientras que estas diferencias aumentan para finales de siglo (entre 6 y 15 mm). De acuerdo al AR5, se espera un aumento entre 0.53-0.74 m y entre 0.51-0.7 m para 2100 en las costas Caribe y Pacífico, respectivamente. Estos valores aumentan a 0.67-0.89 m y 0.57-0.79 m, en el caso del AR6 (Figura 24).

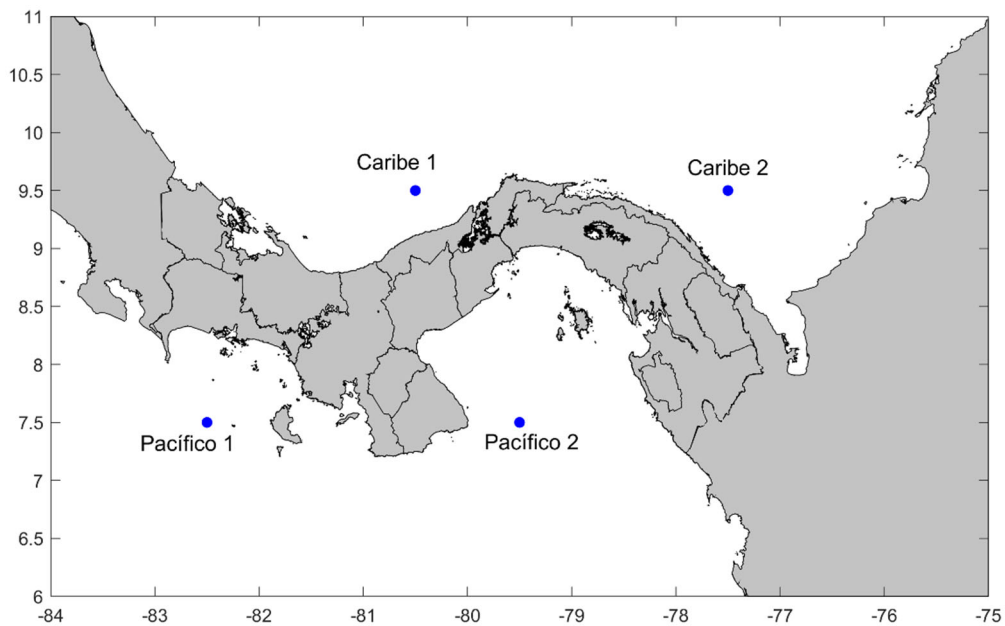


Figura 23. Localización de los puntos donde se han analizado las proyecciones de aumento del nivel medio del mar

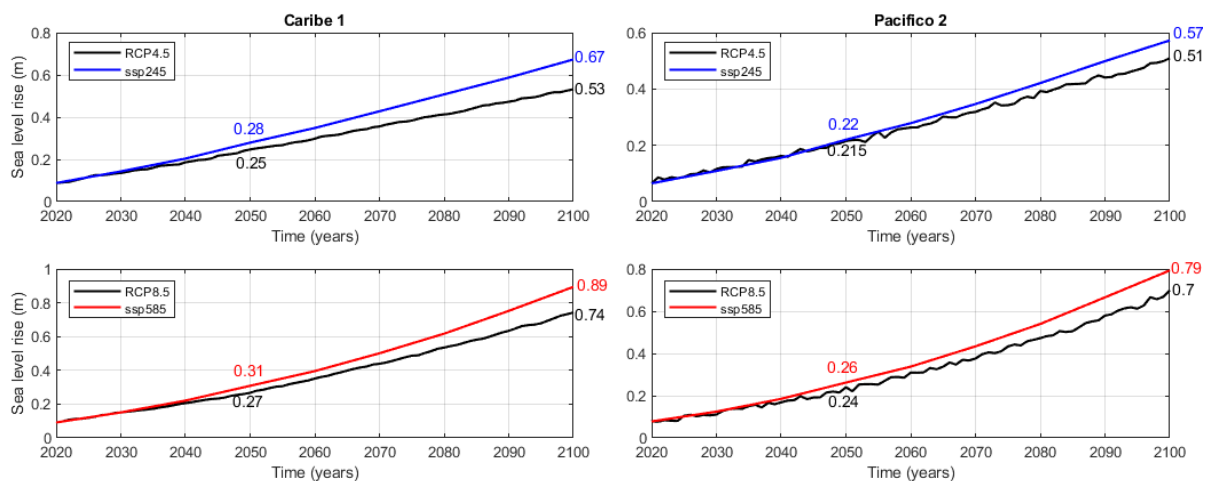


Figura 24. Proyecciones de aumento del nivel del mar publicados en el AR5 (líneas negras) y en el AR6 (líneas azules y rojas) bajo dos escenarios climáticos: (arriba) de estabilización media (RCP4.5 y SSP2-4.5) y (abajo) de altas emisiones (RCP8.5 y SSP5-8.5), en un punto en el Caribe (paneles izquierdos) y en otro en el Pacífico (paneles derechos).

Por último, para tener una visión más general del aumento del nivel del mar a nivel nacional, se ha representado el mapa de las proyecciones de nivel del mar correspondientes a ambos escenarios y a ambos informes en 2100 (Figura 25). Se observan ciertas diferencias en los patrones espaciales para ambos informes, con valores más altos en el AR6. El aumento en el nivel medio del mar es mayor en la costa Caribe que en la Pacífico.

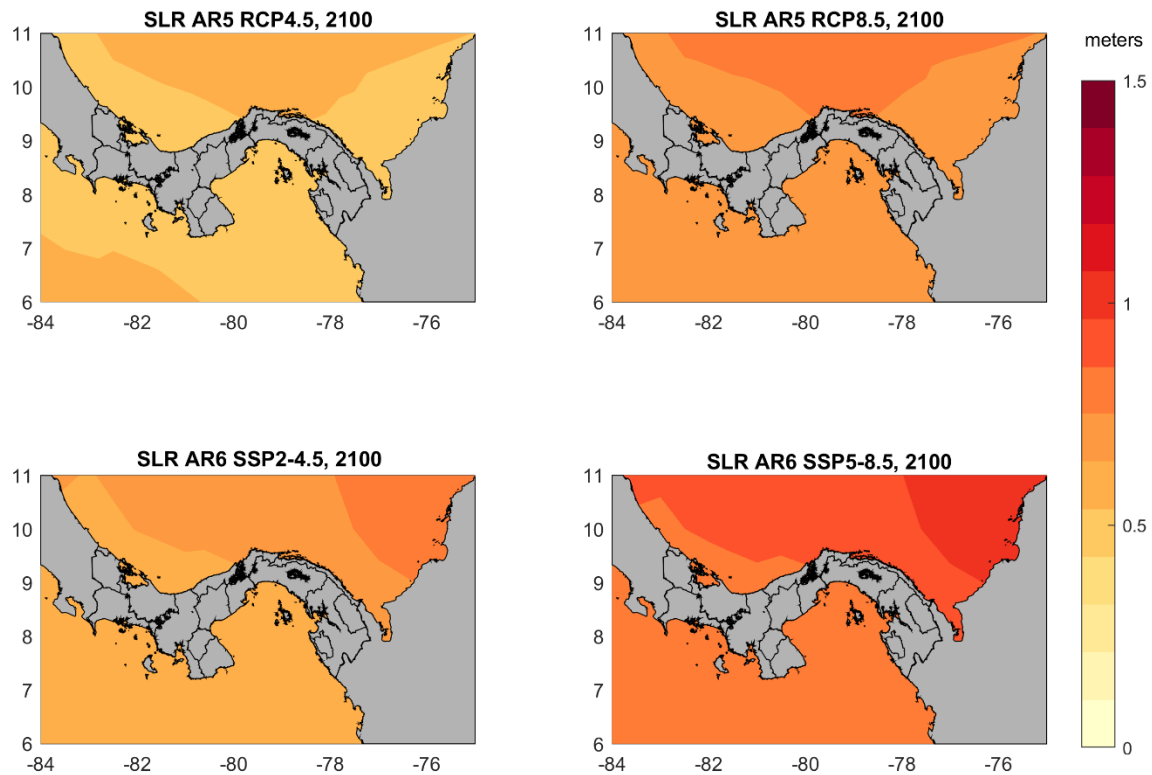


Figura 25. Mapas de aumento del nivel medio del mar (SLR) en el año 2100, para los escenarios de estabilización media (izquierda) y de altas emisiones (derecha), de acuerdo a los datos publicado en el AR5 (paneles superiores) y en el AR6 (paneles inferiores)

4.1.4. Proyecciones de cambio climático de oleaje y marea meteorológica y cambios futuros en la frecuencia de eventos extremos

Se han llevado a cabo varios estudios sobre los cambios esperados en el oleaje a nivel global a consecuencia del Cambio Climático (por ejemplo, Hemer et al., 2013; Lobeto et al., 2021). En general, los estudios coinciden en una ligera disminución de la altura de ola media anual en la región Caribe de Centroamérica, mientras que este estadístico aumenta (al igual que el periodo medio del oleaje) en el Pacífico este tropical, a consecuencia de una intensificación de los vientos en el Océano Sur (Hemer et al., 2013; Semedo et al., 2012). Un patrón similar se espera en los valores extremos de la altura de ola significativa, que aumenta en la costa del Pacífico este tropical mientras que disminuye en el Caribe, bajo el escenario RCP8.5 a finales de siglo (por ejemplo, Lobeto et al., 2021; Caires et al., 2006; Meucci et al., 2020). En concreto, Lobeto et al. (2021) estiman un aumento en los valores extremos de la altura de ola de 0.1 m en el Pacífico este tropical y una disminución de 0.4 m en el Atlántico Norte Tropical.

Aunque existe bastante incertidumbre respecto a los cambios futuros en los eventos de El Niño, los cambios esperados en la altura de ola en el Pacífico este tropical son consistentes con una ligera tendencia de cambio en las condiciones climáticas hacia situaciones de El Niño (Meehl et al., 2007). De acuerdo con Cai et al. (2014), la frecuencia de los eventos de El Niño se va a duplicar debido al calentamiento global.

Respecto a la tendencia en el flujo de energía del oleaje extremal (WEF), Mentaschi et al. (2017) obtuvieron una disminución en la costa Caribe y un aumento en la Pacífico, lo que también justifican por un cambio en el clima hacia condiciones de El Niño. Esto implica que se intensifiquen las inestabilidades en la zona ecuatorial del Pacífico este, aumentando la intensidad y la frecuencia de tormentas y, consecuentemente, los vientos y las olas extremas (e.g., Timmerman et al., 1999; Jin et al., 2014).

En relación a los eventos “Nortes” descritos, de acuerdo con Appendini et al. (2018), los eventos Nortes de alta intensidad serán menos frecuentes mientras que los de intensidad media serán más frecuentes.

Respecto a las proyecciones de los ciclones tropicales, existe bastante incertidumbre sobre los cambios esperados en su frecuencia e intensidad, ya que la evaluación de los mismos está directamente condicionada por la capacidad de los modelos de reproducir estos eventos. En general, se prevé que la frecuencia de los ciclones tropicales no se verá alterada por el calentamiento global, pero la intensidad media y la frecuencia de los ciclones tropicales más intensos, aumentará (Reyer et al., 2015; Tory et al. 2013). Esto mismo indicaba el Informe Especial del IPCC sobre la Gestión de Riesgos de Eventos Extremos y Desastres para el Avance en la Adaptación al Cambio Climático (SREX, 2012) (Alianza Clima y Desarrollo, 2012), que sugería un pequeño cambio en la frecuencia de huracanes, pero un aumento de su intensidad. El informe AR5 destacaba que no se observan tendencias claras en los ciclones tropicales en la región Atlántica durante los últimos cien años, y aunque los datos satelitales parecen indicar un cierto incremento en la región tropical del atlántico, SREX (2012) destacaba la falta de resultados concluyentes. Por otro lado, Montoya et al. (2018) analizaron la tendencia de estos eventos en el Caribe en el periodo histórico 1979-2012 y obtuvieron un aumento tanto en la frecuencia como en la magnitud de los mismos.

Respecto a los cambios en los niveles del mar extremos, estos están principalmente condicionados por el aumento en el nivel medio del mar. La marea meteorológica, por su parte, tiende a disminuir ligeramente a finales del S.XXI (Vousdoukas et al., 2018; Muis et al., 2020).

5. ESTUDIO HISTÓRICO DE LAS CONDICIONES EXTREMAS DE LAS VARIABLES MET-OCEÁNICAS EN LAS COSTAS DE PANAMÁ

Se ha utilizado la información disponible sobre las dinámicas marinas históricas explicadas en los apartados anteriores para hacer un estudio específico de los eventos extremos en las costas panameñas. Tal y como se indicó en el apartado 2.1., los eventos extremos en la costa caribeña están asociados a fenómenos meteorológicos tanto de origen ciclónico (como son los ciclones tropicales), como de origen anticiclónico (eventos Nortes). La región Pacífica, por el contrario, está protegida de los ciclones tropicales del Pacífico Este y no se ve afectada por los oleajes generados por los eventos Nortes. Por otro lado, ambas costas son susceptibles de verse afectadas por tsunamis, aunque estos eventos no se van a analizar en este apartado.

Para analizar los eventos extremos de oleaje (altura de ola) y marea meteorológica en las costas panameñas se ha trabajado con el percentil del 99% de ambas variables.

En el caso del oleaje, se ha utilizado la serie temporal de GOW2 (resolución $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) desde 1979 a 2021 en los 4 puntos mostrados en la Figura 23 (Figura 26). La distribución a lo largo del año de estos eventos extremos se muestran en la Figura 27. En esta figura se aprecia que la mayor parte de los oleajes extremos en el Caribe ocurren entre los meses de enero a abril, coincidiendo con la época de los Nortes. En el litoral Pacífico, sin embargo, la frecuencia de eventos extremos presenta sus máximos entre los meses de mayo y agosto y sus mínimos entre diciembre y marzo, lo que coincide con el invierno y verano austral, respectivamente y, consecuentemente, con el mayor y menor número de temporales en el Océano Pacífico Sur causantes de los grandes swells que se propagan hasta las costas panameñas.

Respecto a la marea meteorológica, no se ha observado ningún patrón de variabilidad a lo largo del año, por lo que estas figuras no se muestran.

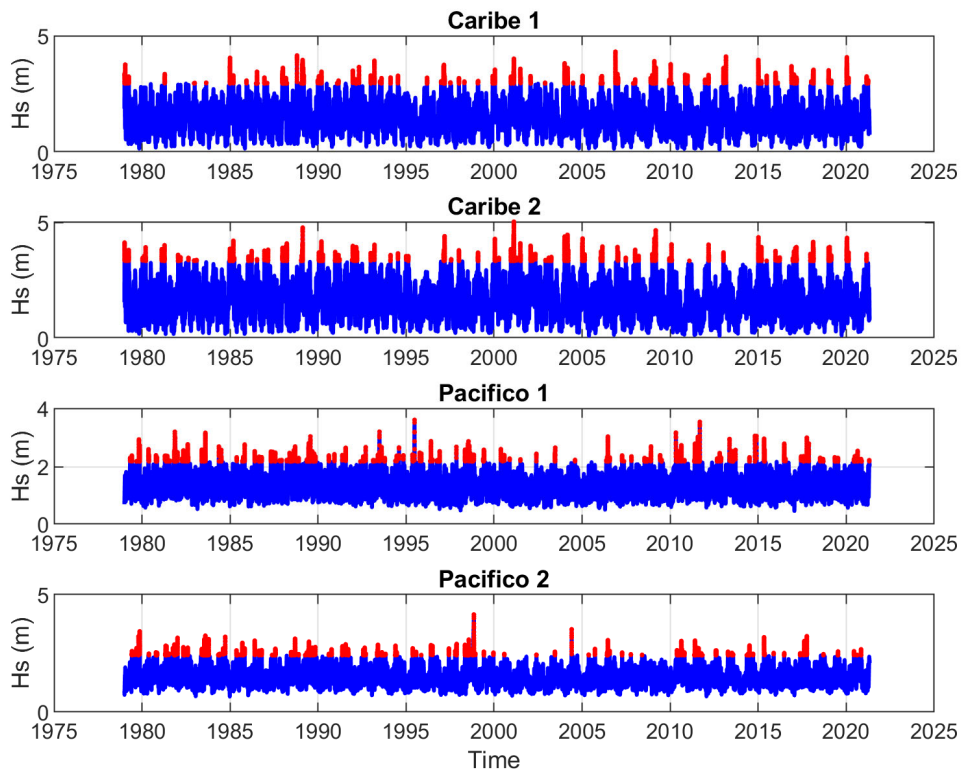


Figura 26. Series temporales de altura de ola significativa con los valores iguales o superiores al percentil del 99% marcados en rojo en las 4 localizaciones mostradas en la Figura 23.

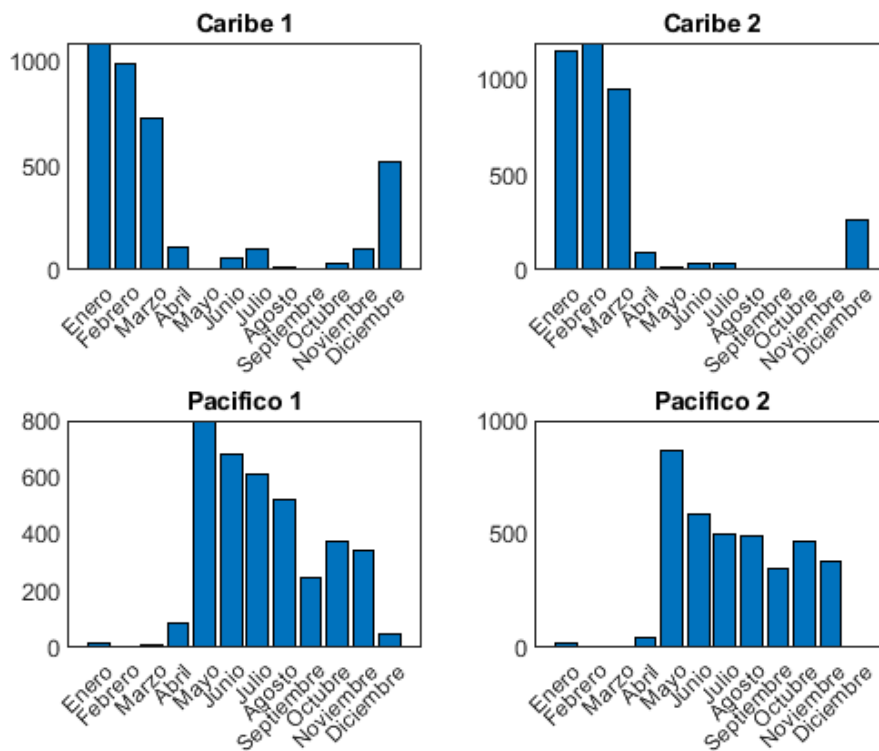


Figura 27. Distribución a lo largo del año de los eventos extremos ($H_s \geq P_{99\%}$) de altura de ola en las 4 localizaciones analizadas.

5.1. Eventos extremos asociados a situaciones ciclónicas

De acuerdo a la herramienta de Historical Hurricane Tracks de la NOAA (<https://coast.noaa.gov/hurricanes/>), que utiliza la información de la base de datos de IBTrACS sobre los ciclones tropicales (Knapp et al., 2010), sólo ha habido 11 ciclones tropicales en un radio de 100 km en torno a Panamá en más de 150 años. La gran mayoría de estos, pasaron como tormentas o depresiones tropicales. De hecho, desde 1990 sólo han habido 3 eventos en un radio de ~100 km, que corresponden con el huracán Bret (en agosto de 1993), el Beta (en 2005) y el Otto (en noviembre de 2016) (Figura 28).

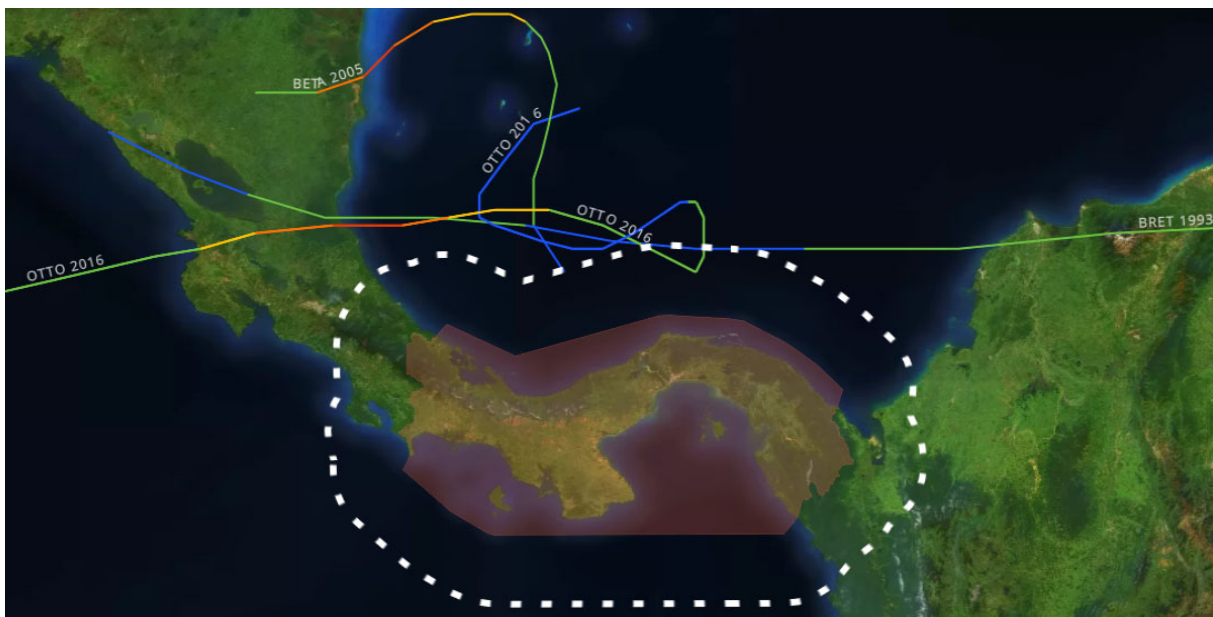


Figura 28. Trayectoria de los ciclones tropicales que han pasado en los últimos 32 años (desde 1990) en un radio de 100 km en torno a las costas de Panamá. Fuente: NOAA Historical Hurricane Tracks (<https://coast.noaa.gov/hurricanes/>).

Para determinar si estos ciclones tropicales provocan condiciones de oleaje o marea meteorológica extremas en las costas panameñas, se ha analizado la concordancia entre alguno de los eventos extremos localizados en las series temporales de altura de ola (Figura 26) y marea meteorológica, con la ocurrencia de algún ciclón tropical que haya pasado en un radio de 500 km respecto a las costas panameñas. Para ello, en primer lugar, a partir de los valores extremos localizados en la Figura 26, se han definido los eventos independientes considerando una independencia entre los eventos de tres días. De esta manera, en el punto $[-81^{\circ}, 10^{\circ}]$ (denominado Caribe 1 en la Figura 26-arriba) se han encontrado 124 eventos extremos de altura de ola. Por otro lado, se ha tenido en cuenta un desfase de tiempo de hasta 3 días desde el paso del ciclón tropical hasta la llegada del oleaje a la costa. De esta manera, de los 124 eventos extremos, se han identificado 3 asociados a ciclones tropicales. La Tabla 6 resume las características de dichos ciclones tropicales. La Figura 29 muestra, por un lado, las trayectorias de los 3 huracanes y, por otro, la altura de ola y la dirección del oleaje en el punto objetivo en los días anteriores y posteriores al paso del ciclón. En todos los casos se observa un aumento en la altura de ola y direcciones de componente norte. Respecto a la marea meteorológica, en la serie temporal del mareógrafo de Cristóbal se observa un pico de 0.23 m el día 21 de octubre de 1988, asociado con el ciclón tropical Joan-Miriam (Figura 30- arriba izquierda). Por su parte, el huracán Otto,

produjo valores extremos de marea meteorológica que se registraron en los tres mareógrafos de la costa Caribe (Figura 30). Se alcanzaron valores de 0.32 m, 0.19 m y 0.2 m el día 22 de noviembre de 2016 en los mareógrafos de Cristóbal, Porvenir y Bocas del Toro, respectivamente. Respecto al ciclón tropical Bret, no se ha observado incremento significativo en el mareógrafo de Cristóbal que pueda estar asociado a este ciclón.

Nombre	Fecha	Velocidad del viento máxima (nudos)	Presión atmosférica mínima (mbar)	Hs máxima en el punto objetivo (m)
Joan-Miriam	Del 10 de Octubre al 2 de Noviembre de 1988	125	932	3.3
Bret	Del 4 al 11 de Agosto de 1993	50	1002	3
Otto	Del 17 al 26 de Noviembre de 2016	100	975	3.1

Tabla 6. Características de los huracanes que causaron alturas de ola extremas en la costa Caribe panameña.

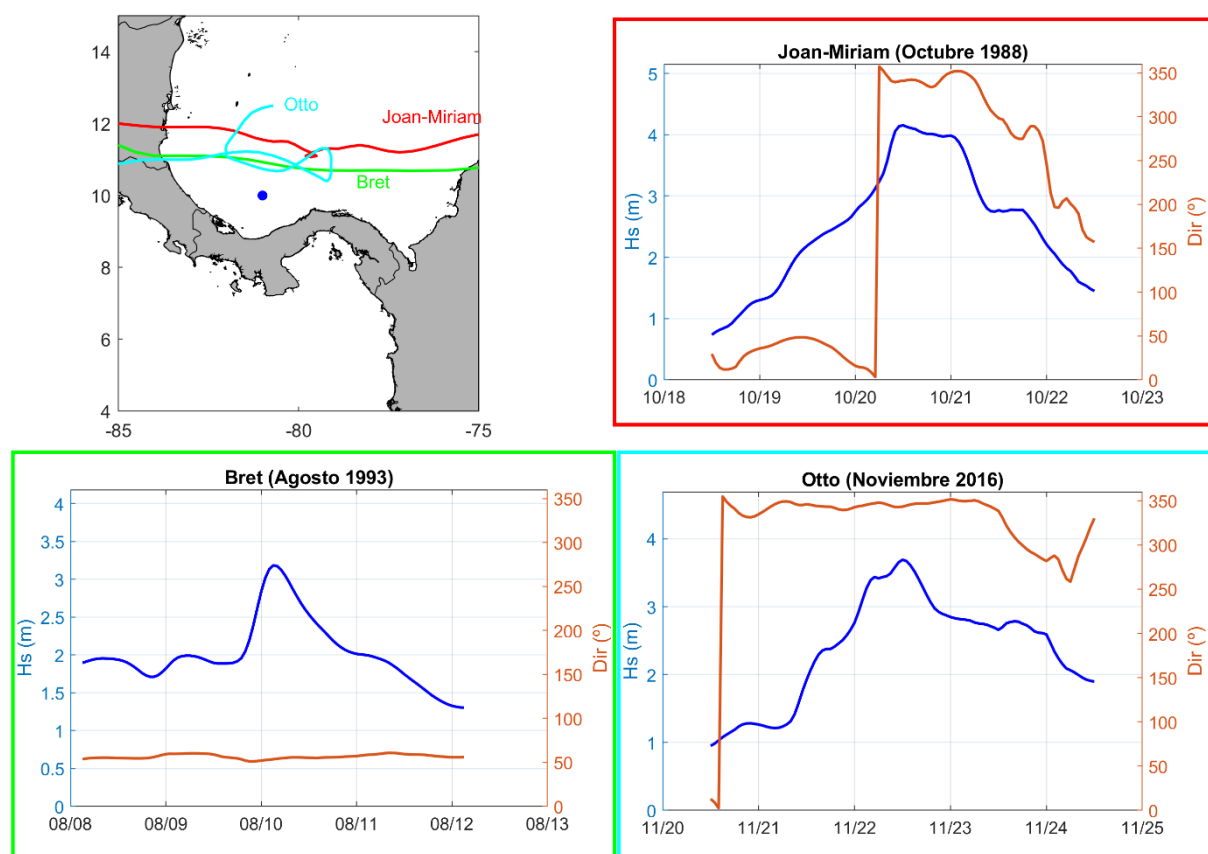


Figura 29. (Arriba-izquierda) Trayectoria de los ciclones tropicales causantes de oleajes extremos en Panamá y localización del punto donde se ha analizado la altura de ola frente a la costa Caribe occidental de Panamá (punto azul). (Arriba-derecha y abajo-izquierda y derecha) Evolución de la altura de ola y dirección media en el punto objetivo tras el paso del huracán Joan-Miriam (1988), Bret (1993) y Otto (2016), respectivamente.

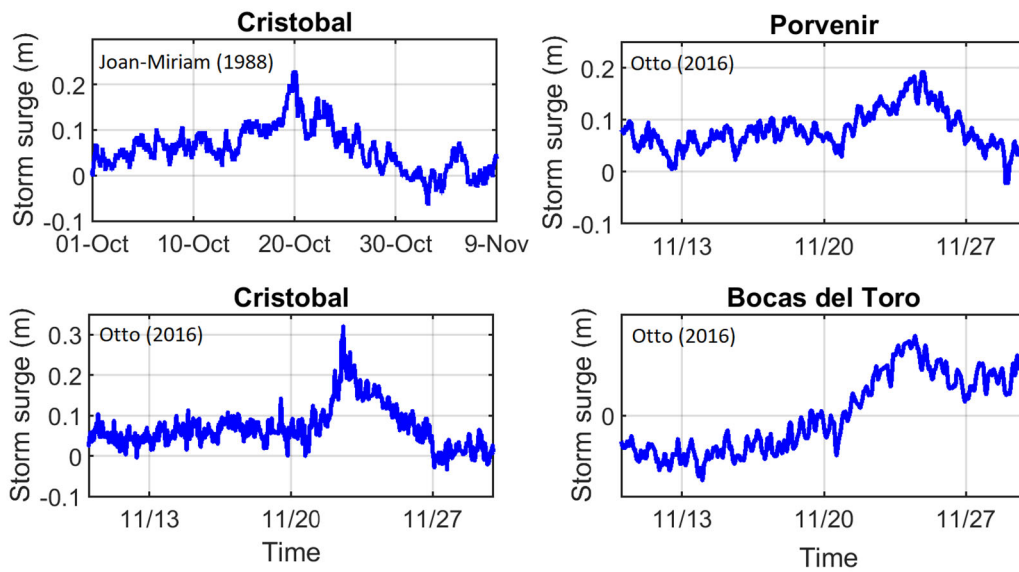


Figura 30. Serie temporal de marea meteorológica registrada por los mareógrafos durante los ciclones tropicales de (arriba-izquierda) Joan-Miriam (en octubre de 1988) y (arriba-derecha y abajo) huracán Otto (en noviembre de 2016).

5.2. Eventos extremos asociados a situaciones anticiclónicas

De forma análoga al análisis llevado a cabo para los ciclones tropicales, se han identificado los eventos Nortes que han provocado condiciones extremas de oleaje en la costa Caribe de Panamá. Estos eventos se definen por la diferencia en la presión atmosférica entre Texas y Yucatán (Ojeda et al., 2017). En este estudio se ha tomado un umbral de 15 mbar de diferencia entre ambas localizaciones para considerar un evento Norte. En este caso, también se ha considerado una independencia entre los eventos de 3 días y un desfase de hasta 3 días entre la ocurrencia del fenómeno meteorológico y la llegada del oleaje asociado a las costas panameñas. De esta manera, se han identificado 5 eventos que provocaron oleajes extremos en el Caribe. La Figura 31 muestra, por un lado, las diferencias en la presión atmosférica entre Texas y Yucatán (Figura 31-izquierda) y, por el otro, la evolución de la altura de ola y la dirección media del oleaje en el punto frente a la costa caribeña mostrado en la Figura 29-arriba-izquierda. En todos los casos, se observan ligeros aumentos en la altura de ola y oleajes de componente norte. Respecto a la marea meteorológica, no se han observado cambios relevantes asociados con estos eventos.

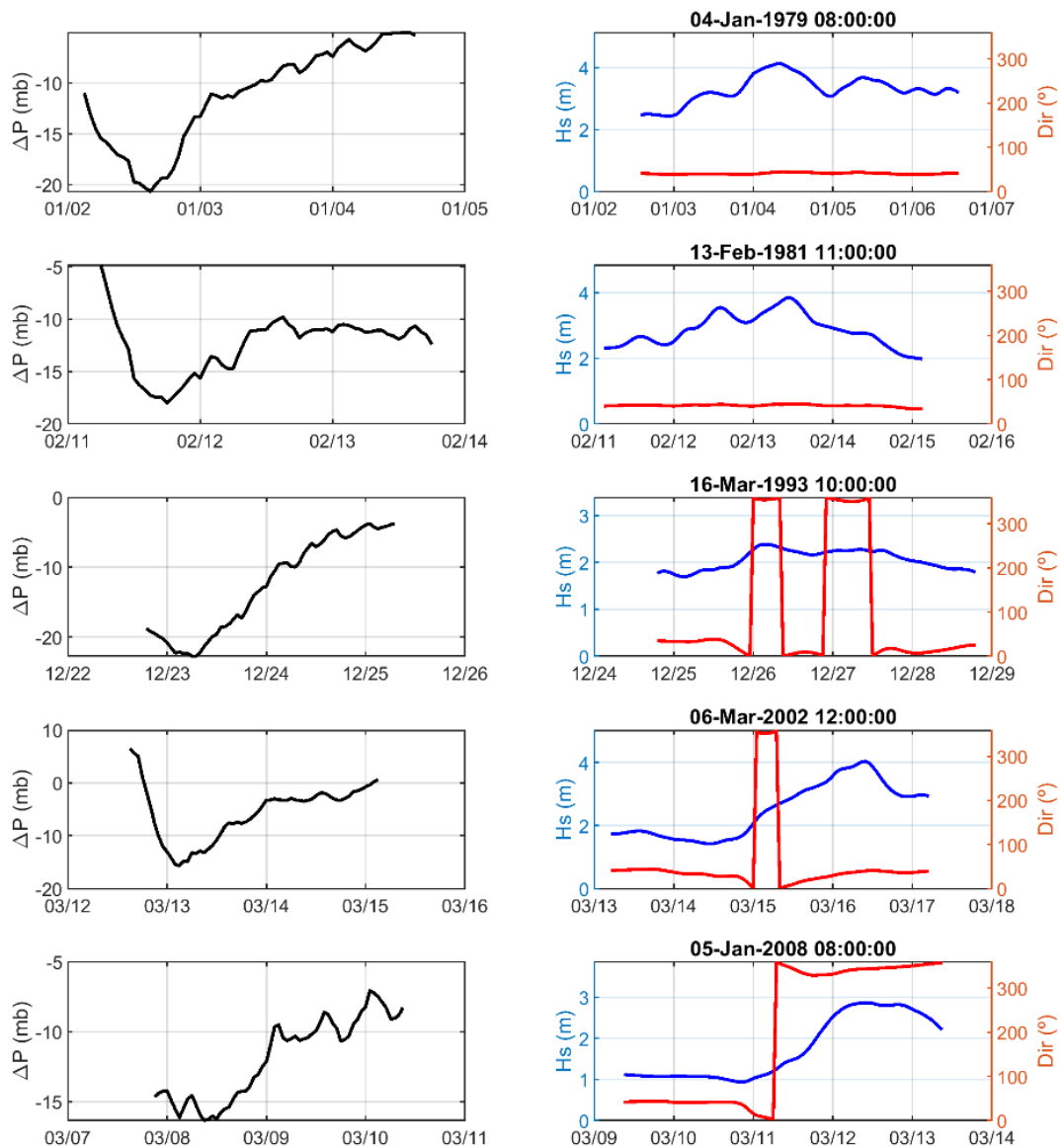


Figura 31. (Izquierda) Diferencia de presión atmosférica entre Texas y Yucatán (mbar). (Derecha) Evolución de la altura de ola y de la dirección media del oleaje en el punto mostrado en la figura anterior en los días posteriores al comienzo del evento Norte.

5.3. Eventos extremos causantes de inundaciones

En este apartado se analizan algunos de los eventos descritos en la sección 2.3, que causaron inundaciones en ciertas zonas costeras de Panamá debido a las mareas altas y/o fuertes oleajes. Estos eventos de inundación, por tanto, no están asociados a fenómenos meteorológicos concretos, sino que son el resultado de la combinación de varios factores. Por un lado, se producen en épocas de mareas vivas (es decir, con la luna nueva o llena y en primavera u otoño (equinoccios)), cuando el rango mareal es máximo. Por otro lado, coinciden con oleajes más energéticos, de mayor altura de ola y periodo. Estos oleajes suelen estar asociados a intensos swells del Pacífico Sur, en el caso del litoral Pacífico y a situaciones de bajas presiones y fuertes vientos, en la región Caribe. Además, la frecuencia y magnitud de estos eventos se ve intensificada por factores como el fenómeno de El Niño, que produce una sobreelevación de la superficie del mar. Por este motivo, durante el año de El Niño de 1997, se registraron 19 eventos de inundación asociados a mareas altas y fuertes oleajes en Panamá (herramienta DesInventar Senai). Por último, la amplificación de la onda de marea en el interior del Golfo de Panamá, hace que esta zona costera sea más vulnerable a este tipo de eventos. Por ello, entre las áreas más afectadas se encuentran Puerto Caimito, Río Hato o Punta Chame.

Las Figura 32, Figura 33 y Figura 35, muestran las variaciones de las variables met-oceánicas durante 3 eventos de inundaciones registrados en la herramienta de DesInventar Senai. Las dos primeras corresponden a eventos que tuvieron lugar en la costa Pacífico (en Puerto Caimito y Río Hato, respectivamente), mientras que la tercera, se produjo en la costa Caribe (en Gobeá). Las series temporales se han representado en el nodo más cercano a la zona afectada. Por este motivo, se ha utilizado la base de hindcast GOW2 con resolución de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ cerca de costa para analizar las variaciones de altura de ola y periodo de pico. Para ser consistentes, se han representado las variables de viento y presión de la base de datos de CFSR. Por último, se muestran los datos de nivel del mar medidos por el mareógrafo más cercano (el de Balboa para las Figura 32 y Figura 33, y el de Porvenir, para la Figura 35).

En los eventos del Pacífico, cabe destacar que no se observan anomalías en los campos de viento y presión, mientras que la señal de nivel del mar está amplificada, superando una amplitud de 2 m en ambos casos. Por otro lado, se observa un aumento brusco tanto en la altura de ola como en el periodo de pico, el cual supera los 20 s en ambos casos. Todo esto parece indicar la llegada de potentes swells a la costa. Para comprobarlo, se ha analizado la rosa direccional del oleaje en esos periodo de tiempo en un punto offshore frente al Golfo de Panamá ($79.1^{\circ}O$, $6.9713^{\circ}N$), a fin de que no esté afectado por los procesos locales de refracción y difracción (Figura 34). En ambos casos, se observa que el oleaje procede de la dirección SW y SSW, coincidiendo con los swells procedentes del Pacífico Sur, tal y como se indicó en la Figura 13.

Por el contrario, en el evento de inundación analizado en la costa Caribe, se observa un aumento en la velocidad del viento y una disminución en la presión atmosférica, que lleva asociado un incremento en la altura de ola. El periodo de pico, sin embargo, permanece constante. Por ello, en este caso el origen del evento se debe al paso de un sistema de bajas presiones cerca de la zona afectada (Figura 35).

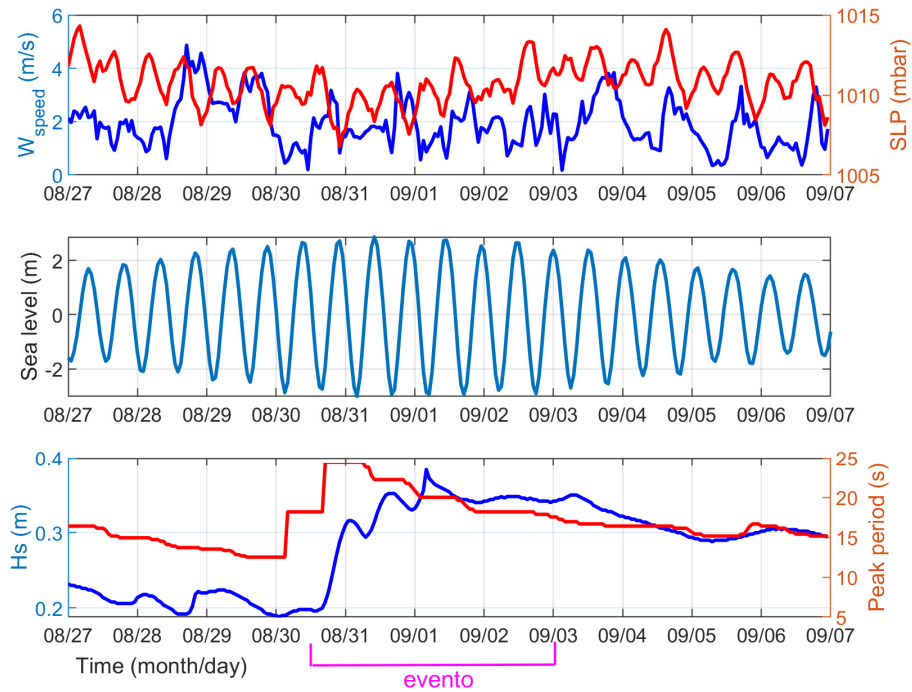


Figura 32. Series temporales desde el 27 de agosto al 7 de septiembre de 2011 de (arriba) velocidad del viento en superficie (m/s) y presión atmosférica a nivel del mar (mbar), (centro) nivel del mar registrado por el mareógrafo de Balboa y (abajo) altura de ola (m) y periodo de pico(s) del oleaje en el nodo del hindcast de GOW2 más cercano a la zona de Puerto Caimito (Panamá Oeste, costa Pacífico). En magenta se ha marcado el periodo en el que se produjeron inundaciones.

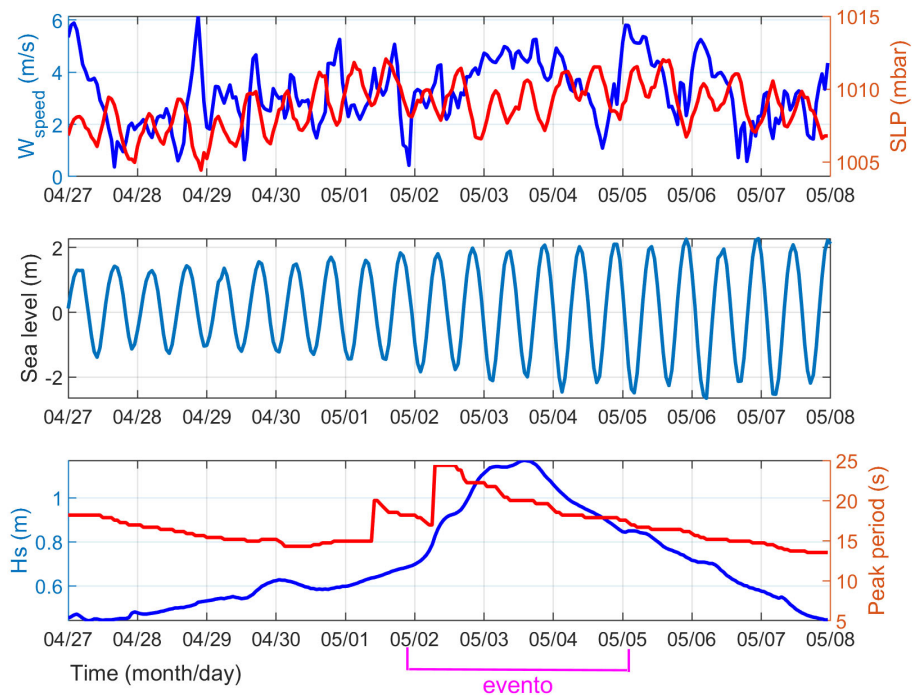


Figura 33. Series temporales desde el 27 de abril al 8 de mayo de 2015 de (arriba) velocidad del viento en superficie (m/s) y presión atmosférica a nivel del mar (mbar), (centro) nivel del mar registrado por el mareógrafo de Balboa y (abajo) altura de ola (m) y periodo de pico(s) del oleaje en el nodo del hindcast de GOW2 más cercano a la zona de Río Hato (Coclé, costa Pacífico). En magenta se ha marcado el periodo en el que se produjeron inundaciones.

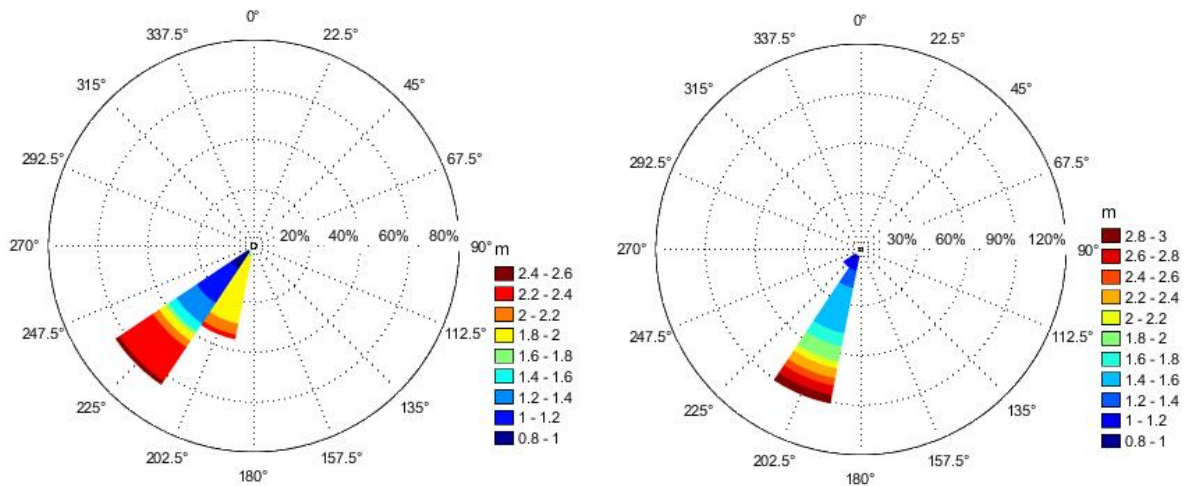


Figura 34. Rosas de oleaje en un punto offshore frente al Golfo de Panamá (-79.1º,6.9713º) de las series temporales desde (izquierda) el 27 de agosto al 7 de septiembre de 2011 y (derecha) desde el 27 de abril al 8 de mayo de 2015.

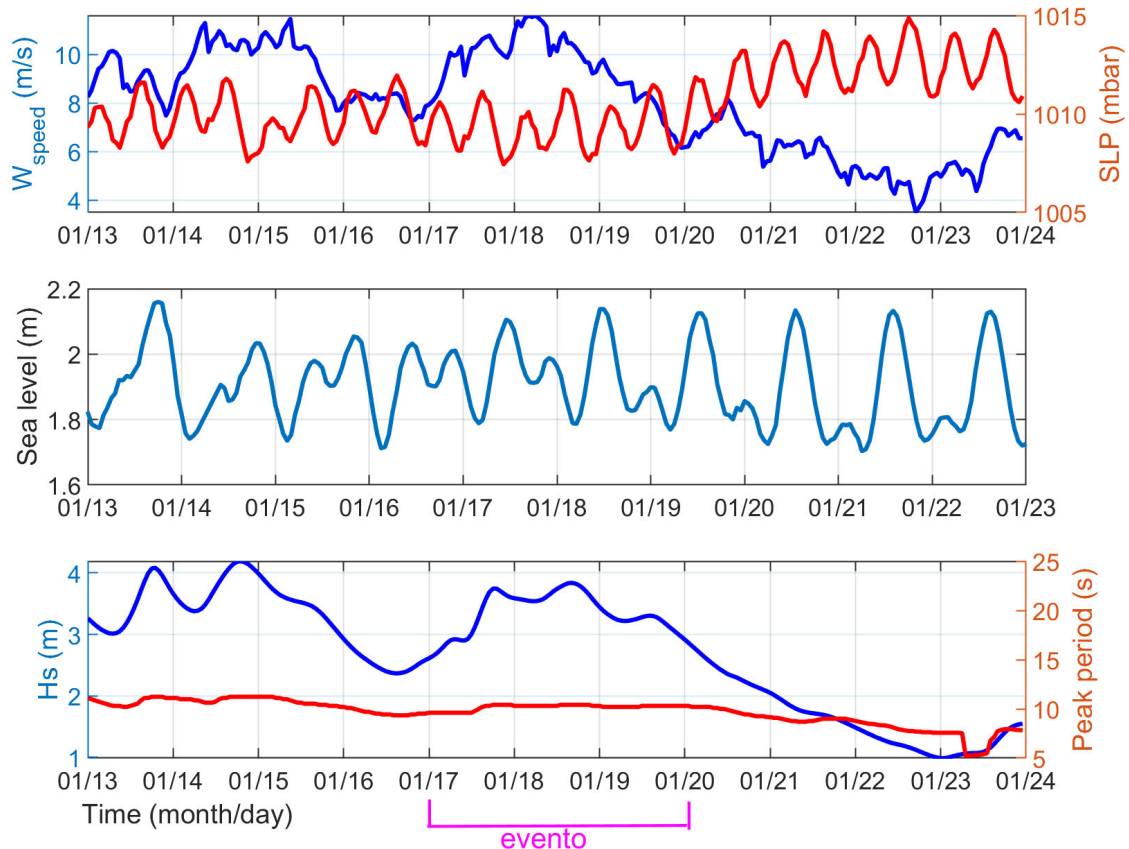


Figura 35. Series temporales desde el 13 al 24 de enero de 2020 de (arriba) velocidad del viento en superficie (m/s) y presión atmosférica a nivel del mar (mbar), (centro) nivel del mar registrado por el mareógrafo de El Porvenir y (abajo) altura de ola (m) y periodo de pico(s) del oleaje en el nodo del hindcast de GOW2 más cercano a la región de Gobeá (Colón, costa Caribe). En magenta se ha marcado el periodo en el que se produjeron inundaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Alianza Clima y Desarrollo (2012). La gestión de riesgos de eventos extremos y desastres en América Latina y el Caribe: aprendizaje del Informe Especial (SREX) del IPCC. Lima, CDKN, 20.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O. (2006) Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* 69 (2–4):101–142.
- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P. López-González, J. and Mendoz, E.T. (2014). Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30-yr wave hindcast. *J. Climate*, 27, 1619–1632, doi:10.1175/JCLI-D-13-00206.1.
- Appendini, C.; Hernandez-Lasheras, J.; Meza-Padilla, R. and Kurczyn, J.A. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics* (2018) 51:3747–3763. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>.
- Armenta, Porras, Guillermo (2013) Análisis detallado del efecto foehn generado por la cordillera Oriental en el alto Magdalena (Huila y Tolima). Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ciencias Meteorológicas. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/11389/1/194144.2013.pdf>
- Autoridad Nacional del Ambiente y Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ANAM-ARAP). (2013). Manglares de Panamá: importancia, mejores prácticas y regulaciones vigentes. Panamá: Editora Novo Art, S.A.
- Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) (2010). Documento de Referencia Para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) en Zonas Marino Costeras y Aguas Continentales. 217pp, Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá. URL: <http://hdl.handle.net/1834/7999>
- Banco Internacional de Desarrollo (BID) (2012). Programa de reducción de vulnerabilidad por desastres naturales y cambio climático II. Propuesta de préstamo. PN-L1074.
- Banco Internacional de Desarrollo (BID) (2016). Climate Change Projections in Latin America and the Caribbean. IDB-MG-444
- Barnard, P.L., Short, A.D., Harley, M.D., Splinter, K.D., Vitousek, S., Turner, I.L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K.R., Doria, A., and Hansen, J.E. (2015). Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern oscillation. *Nature Geoscience*, 8(10), 801–807. <https://doi.org/10.1038/ngeo2539>
- BBC News and L. Pressly (2017). El plan de fuga de los indígenas guna para escapar de sus islas paradisíacas antes de que desaparezcan bajo el mar en Panamá - BBC News Mundo.
- Becker, J. J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., Weatherall, P. (2009). Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS, *Marine Geodesy*, 32:4, 355-371. DOI: 10.1080/01490410903297766

- Becker, M., Meyssignac, B., Letetrel, C., Llovel, W., Cazenave, A. and Delcroix, T. (2012). Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950. <Global Planet. Change, 80–81, 85–98, doi:10.1016/j.gloplacha.2011.09.004.
- BIOMARCC-USAID (2013). Vulnerabilidad y escenarios bioclimáticos de los sistemas marino-costeros a nivel del Caribe centroamericano. San José, Costa Rica. 80 pags.
- Breedy, H.G.y.O. (2008). Distribución de la diversidad y estado de conservación de los arrecifes coralinos y comunidades coralinas del Pacífico occidental de Panamá (Punta Mala - Punta Burica). First ed. Arlington, Virginia: The Nature Conservancy.
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M. et al. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Clim Change* 4, 111–116. <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>
- Caires, S., Swail, V. R. and Wang, X. L. (2006). Projection and analysis of extreme wave climate. *J. Clim.* 19, 5581–5605.
- Camacho, E. (1994). The tsunami of April 22, 1991 in Central America, *Tsunami Newsletter*, Vol. 25, No. 1, pp 6-7.
- Castillo, N. (2011). Recursos Hídricos Panamá, Centro del Agua para América Latina y el Caribe.
- CEPAL (2009). El Canal de Panamá en la economía de América Latina y el Caribe. CEPAL, abril 2009, 71 pags.
- CEPAL (2011). Efectos del Cambio Climático en las costas de América Latina y Caribe. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. Septiembre 2015, Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Chelton, D., Freilich, M., and Esbensen, S. (2000). Satellite Observation of the Wind Jets off the Pacific Coast of Central America. Part I: Case Studies and Statistical Characteristics, *Journal of Geophysical Research*, 96, 6965–6979.
- Ciniglio, S., Machado, V., Vallarino, R., Saavedra, F.G. (2021). Sea level rise analysis in Colon Island, Bocas del Toro. *Revista de Iniciación Científica*, Vol. 7, nº2,39-49. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3337>
- Colle, B.A and Mass, C.F. (1995). *Monthly Weather Review*, Volume 123, 2577- 2610.
- Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica (2016). Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos. Panamá, República de Panamá. 168 páginas. ISBN: 978-9962-5581-0-1. Recuperado a partir de: <file:///C:/Users/ramirez/Downloads/UNDP-RBLAC-AguaPA.pdf>
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

- Devis-Morales, A., Montoya-Sanchez, R.A, Bernal, G. and Osorio, A.F. (2017). Assessment of extreme wind and waves in the Colombian Caribbean Sea for offshore applications. *Applied Ocean Research* 69, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.012>
- Diaz, F.; Camara, R.; Martinez, J.R.; Autoridad Nacional del Ambiente (Panama). (2004). Directrices y recomendaciones para el uso y gestión sostenible de los manglares de Chiriquí (República de Panamá). Book, 153 pp. Smithsonian Libraries. edanmdm:siris_sil_895631. Recuperado a partir de: https://collections.si.edu/search/record/siris_sil_895631.
- Dodet, G., Piolle, J.-F., Quilfen, Y., Abdalla, S., Accensi, M., Ardhuin, F., Ash, E., Bidlot, J.-R., Gommenginger, C., Marechal, G., Passaro, M., Quartly, G., Stopa, J., Timmermans, B., Young, I., Cipollini, P., and Donlon, C. (2020). The Sea State CCI dataset v1: towards a sea state climate data record based on satellite observations, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1929–1951, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1929-2020>.
- Egbert, G.D., and Erofeeva, S.Y., (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.2, 183-204.
- Eichler, T., and Higgins, W. (2006). Climatology and ENSO-Related Variability of North American Extratropical Cyclone Activity, *Journal of Climate*, 19(10), 2076-2093
- Escalante, L., Charpentier, C., Diez, J. (2011). Avances y limitaciones de la gestión integrada de los recursos hídricos en Panamá. *Revista Gestión y Ambiente, Panamá*. Volumen 11 - No. 1, Mayo de 2011, Medellín ISSN 0124.177X. pp 23-36
- Eyring, V., Cox, P.M., Flato, G.M., et al. (2019). Taking climate model evaluation to the next level. *Nat. Clim. Chang.*, 9, pp. 102-110, 10.1038/s41558-018-0355-y
- Fernandez, W. and Ramirez, P. (1991). El Niño, the oscillation of the South and its effects in Costa Rica: a review. *Tecnología en Marcha*, Vol 11, 1) pp 3-10. ISSN : 0379-3982
- Fiedler, P.C. and Lavin, M.F. (2017). Oceanographic conditions of the Eastern Tropical Pacific. Chapter. DOI: 10.1007/978-94-017-7499-4_3
- Frankenfield HC (1917). "Northerners" of the canal zone. *Mon Weather Rev* 45:546–550.
- Fundación Natura (2018). Adapting to climate change through Integrated water management in Panama. Inception report, Fundación Natura, July 2018.
- Garcimartin, C.; Astudillo, J; Garzonio, O. (2020). El agua en la economía de Panama. Banco Interamericano de Desarrollo. Abril 2020, Nota tecnica N° IDB-TN-1905
- Global Water Partnership (2015). Avances a nivel político y estratégico en la adaptación al cambio climático, Panamá. Hoja Informativa. www.gwpcentroamerica.org. Acceso: 11 de abril de 2022
- Green, J. A. M., Molloy, J. L., Davies, H. S., and Duarte, J. C. (2018). Is there a tectonically driven supertidal cycle?. *Geophysical Research Letters*, 45, 3568–3576. <https://doi.org/10.1002/2017GL076695>
- Haigh, I. D., Pickering, M. D., Green, J.A. M., Arbic, B. K., Arns, A., Dangendorf, S., et al. (2019). The tides they are a-changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides,

- their driving mechanisms and future implications. *Reviews of Geophysics*, 57,e2018RG000636. <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>.
- Hemer, M.A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A. and Wang, X. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, 3, 471–476. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1791>
- Hersbach, H. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146, nº730, 1999-2049. ISSN:0035-9009.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, V.R. Barros and others (eds.), Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B., R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Izaguirre, C., Mendez, F.J., Menendez, M. and Losada, I.J. (2011), Global extreme wave height variability based on satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10607, doi:10.1029/2011GL047302
- Jin, F.-F., Boucharel, J. and Lin, I.-I. (2014). Eastern Pacific tropical cyclones intensified by El Niño delivery of subsurface ocean heat. *Nature*, 516, 82– 85.
- Knapp, K. R., Kruk, M.C., Levinson, D. H., Diamond, H. J. and Neumann, C. J. (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1
- Landsea, C.W. (1993). A climatology of Intense (or major) Atlantic Hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1703-1713.

- Leon, G., Zea, J., and Eslava, J. (2000). Circulación general del trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia. *Meteorol. Colomb.* 1:31-38. ISS N 0124 -6984. Santa Fe de Bogotá, D.C. Colombia.
- http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero01/01_05.pdf
- Lizano, R.O.G. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 24(1): 51-64, ISSN: 0378-0524
- Lobeto, H., Menendez, M. and Losada, I.J. (2021). Future behavior of wind wave extremes due to climate change. *Nature scientific reports* 11: 7869. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86524-4>
- Losada, I.J., Reguero, B.G., Méndez, F.J., Castanedo, S., Abascal, A.J., Mínguez, R. (2013). Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change.* 104, 34–50.
- Martinez, A. (2020). Estudio hidrodinámico de la mar en la isla de Saboga. Trabajo Final de Máster, Junio 2020, Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas, UPC, Barcelona.
- Martinez, N., and Toulkeridis, T. (2020). Tsunamis in Panama- History, preparation and future consequences. *Science of Tsunami Hazards*, Vol 39, No 2, 53-68. ISSN 8755-6839.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye A.T., Gregory, J.M. , Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J. and Zhao, Z.-C. (2007). Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Melet, A., Meyssignac, B., Almar, R., Le Cozannet, G. (2018). Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise. *Nature Climate Change*, 8(3), 234-239. doi:10.1038/s41558-018-0088-y
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M.I., Voukouvalas, E., Dosio, A. and Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2416–2426, doi:10.1002/2016GL072488.
- Meucci, A., Young, I. R., Hemer, M., Kirezci, E. and Ranasinghe, R. (2020). Projected 21st century changes in extreme wind-wave events. *Sci. Adv.* 6, 7295–7305.
- Ministerio de Ambiente (2015). Guía El cambio climático en Panamá. Documento descargado de: <https://www.sumarse.org.pa>
- Ministerio de Ambiente (2019). Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2050. ISBN: 978-9962-8511-2-7.
- Montoya, R.D, Menendez, M. and Osorio, A.F. (2018). Exploring changes in Caribbean hurricane-induced wave heights. *Ocean Engineering* 163, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.032>

- Mora, J.; Ramirez, D.; Ordaz, J.L.; Acosta, A.; Serna, B. (2010). Efectos del Cambio Climático sobre la agricultura. Panamá. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Sede Subregional en México. Recuperado a partir de: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25926>
- Muis, S., Güneralp, B., Jongman, B., Aerts, J. C. J. H., and Ward, P. J. (2015). Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data, *Sci. Total Environ.*, 538, 445-457.
- Muis, S., Haigh, I. D., Guimarães Nobre, G., Aerts, J. C. J. H., and Ward, P. J. (2018). Influence of El Niño-Southern Oscillation on global coastal flooding. *Earth's Future*, 6, 1311–1322. <https://doi.org/10.1029/2018EF000909>.
- Muis, S., Apecechea, M. I., Dullaart, J., de Lima, R. J., Madsen, K. S., Su J., Yan, K., Verlaan, M. (2020). A High-Resolution Global Dataset of Extreme Sea Levels, Tides, and Storm Surges, Including Future Projections. *Frontiers in Marine Science*, 7, 2296-7745, doi: 10.3389/fmars.2020.00263.
- Müller, M. (2012). The influence of changing stratification conditions on barotropic tidal transport and its implications for seasonal and secular changes of tides. *Continental Shelf Research*, 47, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.07.003>.
- National Hurricane Center (NHC) Tropical Cyclone Report (2017). Hurricane Otto (AL162016, EP22016).
- National Hurricane Center (NHC) Tropical Cyclone Report (2018). Hurricane Nate (AL162017).
- NOAA National Geophysical Data Center (2006). 2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) v2. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5J1012Q>. Accessed 11 April 2022.
- Notes by the Editor (1898) Northers in the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico. *Mon Weather Rev* 26:568–568
- Ojeda, E., Appendini, C. M., and Mendoza, E. T. (2017). Storm-wave trends in Mexican waters of the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1305–1317, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1305-2017>.
- Olmedo, B. (2015). Estado actual de las condiciones del Océano Pacífico y su posible evolución durante el año 2015-2016. Informe de Empresa de Transmisión Eléctrica, S. A. (ETESA), Dirección de Hidrometeorología, Gerencia de Climatología.
- Oppenheimer, M. et al., (2019). Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. Weyer (eds.)]. In Press, pp. 321–445.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015). Evaluación del estado de la reducción del riesgo de desastres en la República de Panamá. Recuperado a partir de: <https://www.eird.org/americas/docs/informme-panama-rrd.pdf>
- Ortiz J.C., Salcedo B. and Otero L.J. (2014). Investigating the collapse of the Puerto Colombia pier (Colombian Caribbean coast) in March of 2009: Methodology for the reconstruction of extreme

- events and their impact on the coastal infrastructure. *J. Coast. Res.* 30, 291-300. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00062.1.
- Paton, S.; Panama Canal Authority (2019). Monthly Rain_ACP_Horizontal.xlsx. Smithsonian Tropical Research Institute. Dataset. <https://doi.org/10.25573/data.10304303.v11>
- Pawlowicz, R.; Beardsley, B. and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis with error analysis in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*. 28. 929-937. 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Pérez, J. (2000). Los ciclones Tropicales del Atlántico y el Pacífico mexicanos y su relación con el Niño/Oscilación del Sur. Tesis de Licenciatura, Universidad Veracruzana, México, 2000.
- Perez, J., Menendez, M. and Losada, I.J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications, *Coastal Engineering*, Volume 124, Pages 1-11, doi:10.1016/j.coastaleng.2017.03.005.
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2017). Guía Práctica para la Adaptación al Cambio Climático en Zonas Marino-Costeras del Pacífico Panameño. PNUD/Wetlands International. Panamá, República de Panamá. 24pp.
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2018). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Panamá. Ministerio de Ambiente. Albrook, edificio 804. Ciudad de Panamá.
- Reyer, C.P., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Boit, A., Canales Trujillo, N., Carlsburg, M., Coumou, D., Eden, A., Fernandes, E.C., Langerwisch, F., Marcus, R.E., Mengel, M., Mira-Salama, D., Perette, M., Perezniето, P., Rammig, A., Reinhardt, J., Robinson, A., Rocha, M., Sakschewski, B., Schaeffer, M., Schleussner, C.F., Serdeczny, O., & Thonicke, K. (2015). Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, 17, 1601-1621.
- Rodríguez, J.R. and Windevoxhel, N.J. (1998). Análisis regional de la situación de la zona marina costera centroamericana. BID, División del Medio Ambiente, Departamento de Desarrollo Sostenible. Washington, D.C. octubre de 1998— No. ENV-121.
- Sabet-Rasekh, D. y Saavedra, C. (2016). Gestión de recursos hídricos para la adaptación al cambio climático: Municipio de Santa Fe, cuenca del río Santa María. *Revista de Iniciación Científica*, Vol. 2 Núm. 1, 61-73. Recuperado a partir de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/602>
- Saha, S., et al. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 91, 1015-1057. <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., and Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2, *Journal of Climate*, 27(6), 2185-2208.
- Schreck, C. and National Center for Atmospheric Research Staff (Eds) (2013). The Climate Data Guide: IBTrACS: Tropical cyclone best track data. Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ibtracs-tropical-cyclone-best-track-data>.

- Semedo, A., Sušelj, K., Rutgersson, A., Sterl, A. (2011). A global view on the wind, sea and swell climate and variability from ERA-40. *J Climate* 24:1461–1479.
- Semedo, A., Weisse, R., Behrens, A., Sterl, A., Bengtsson, L. and Günther, H. (2012). Projection of Global Wave Climate Change toward the End of the Twenty-First Century, *Journal of Climate*, 26(21), 8269-8288. Retrieved Mar 30, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/26/21/jcli-d-12-00658.1.xml>
- Slangen, A. B. A., Meyssignac, B., Agosta, C., Champollion, N., Church, J. A., Fettweis, X., Ligtenberg, S. R. M., Marzeion, B., Melet, A., Palmer, M. D., Richter, K., Roberts, C. D., and Spada, G. (2017). Evaluating model simulations of twentieth-century sea level rise. Part I: Global mean sea level change. *Journal of Climate*, 30(21), 8539–8563. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0110.1>
- Stern, N. (2013). The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models. *Journal of Economic Literature*, 51 (3): 838-59. DOI: 10.1257/jel.51.3.838
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr., A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53 (7), pp. 573-588.
- Stopa, J. E., Cheung, K. F., Tolman, H. L. , Chawla, A. (2013). Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data. *Ocean Modelling*. Vol. 70, 207-220, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.10.005>.
- Timmermann, A., Latif, M., Bacher, A., Oberhuber, J., and Roeckner, E. (1999). Increased El Niño frequency in a climate model forced by futuregreenhouse warming. *Nature*, 398, 694–696
- TNC. 2008. Evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica. Sitios prioritarios para la conservación en las ecorregiones Bahía de Panamá, Isla del Coco y Nicoya del Pacífico Tropical Oriental, y en el Caribe de Costa Rica y Panamá. Programa de Ciencias Regional, Región de Mesoamérica y El Caribe. The Nature Conservancy, San José, Costa Rica. 165 pags.
- Torres, R.R. and Tsimplis, M. (2014). Sea level extremes in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(8), 4714:4731. DOI: 10.1002/2014JC009929
- Tory, K.J., Chand, S.S., McBride, J.L., Ye, H. and Dare, R.A. (2013). Projected changes in late-twenty-first-century tropical cyclone frequency in 13 coupled climate models from phase 5 of the coupled model intercomparison project. *J Clim* 26:9946–9959. doi:10.1175/JCLI-D-13-00010.1
- UNISDR - Las Américas/CEPRENAC (2014). Informe Regional del Estado de la Vulnerabilidad y Riesgos de Desastres en Centroamérica. Recuperado a partir de: <http://eird.org/americas/docs/informe-regional-centromericano-RAR.pdf>.
- Vega, G. y Stolz, W. (1997). El fenómeno de “El Niño”, su impacto en la economía de Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 9p.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., et al. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat. Commun.* 9:2360. doi:10.1038/s41467-018-04692-w

- Wang, J., Shamir, E., and K.P. Georgakakos, (2007). Study of Extreme Precipitation over the Panama Canal Watershed. HRC Technical Report No. 6. Hydrologic Research Center, San Diego, CA, (CDO185933MMP), 136pp.
- Wetlands International (2020). Diagnóstico de la situación de pérdida de la línea costera y su impacto en los medios de vida de la comunidad de Garachiné, distrito de Chepigana, provincia de Darién. Informe de diagnósticos técnico y social participativo.
- Widlansky, M.J., Timmermann, A. and Cai, W. (2015). Future extreme sea level seesaws in the tropical Pacific. *Sci. Adv.* 1, doi:e1500560.
- Willett, C., Robert, R., and Lavín, M.F. (2006). Eddies and Tropical Instability Waves in the eastern tropical Pacific: A review, *Progress in Oceanography*, 69, 218 – 238.
- Wong P.P., Losada I.J., Gattuso J-P., Hinkel J., Khattabi A., McInnes K.L., Saito Y. and Sallenger A. (2014). Coastal systems and low-lying areas *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ed C B Field et al (Cambridge: Cambridge University Press).
- Woodworth, P. L. (2010). A survey of recent changes in the main components of the ocean tide. *Continental Shelf Research*, 30(15), 1680–1691. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.07.002>

ANEXO I. FIGURAS

Este anexo contiene una serie de figuras que no se han incluido en el cuerpo principal del documento para no sobrecargarlo de imágenes. Corresponden con figuras muy similares que se han mostrado a lo largo del documento, pero en otras localizaciones o en otros horizontes temporales.

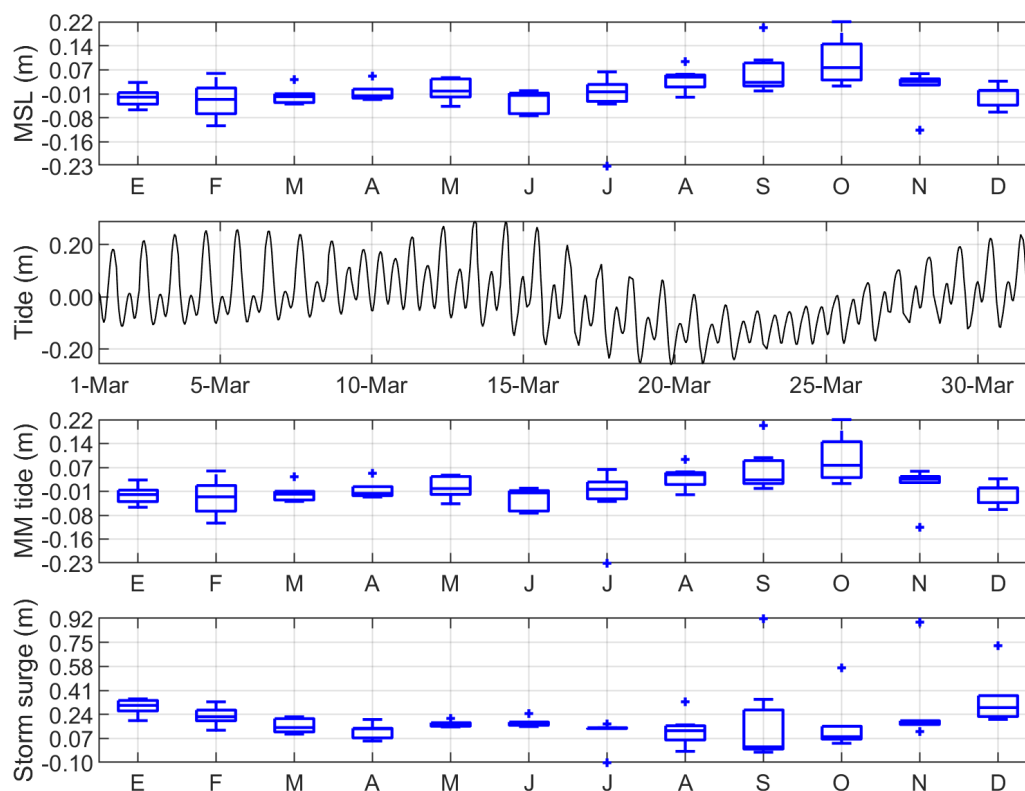


Figura 36. Mareógrafo de Bocas del Toro. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual.

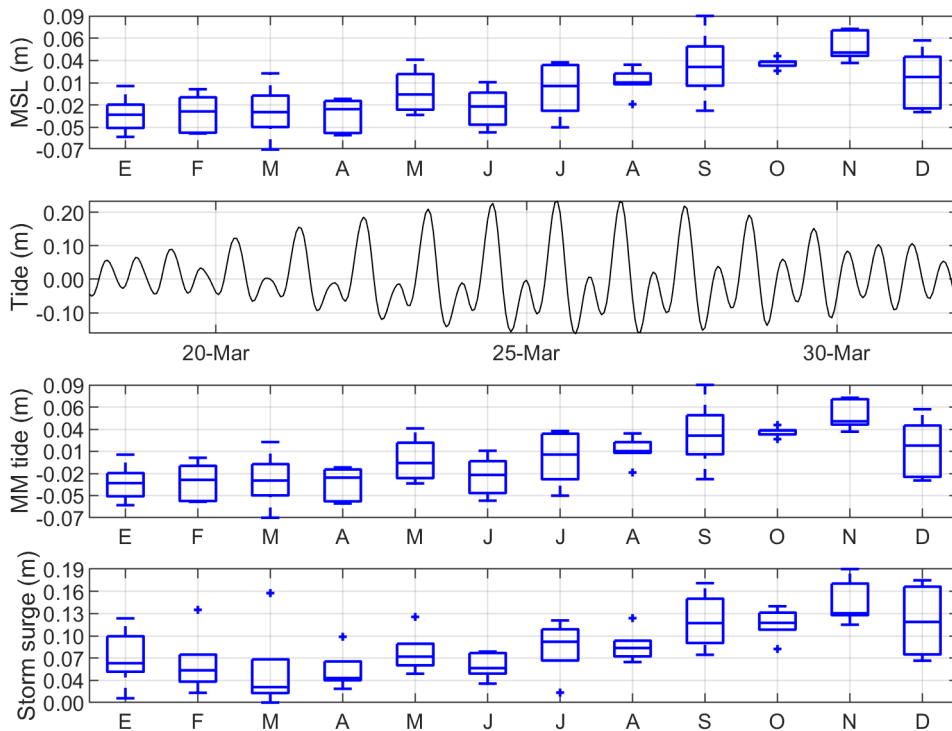


Figura 37. Mareógrafo de El Porvenir. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual.

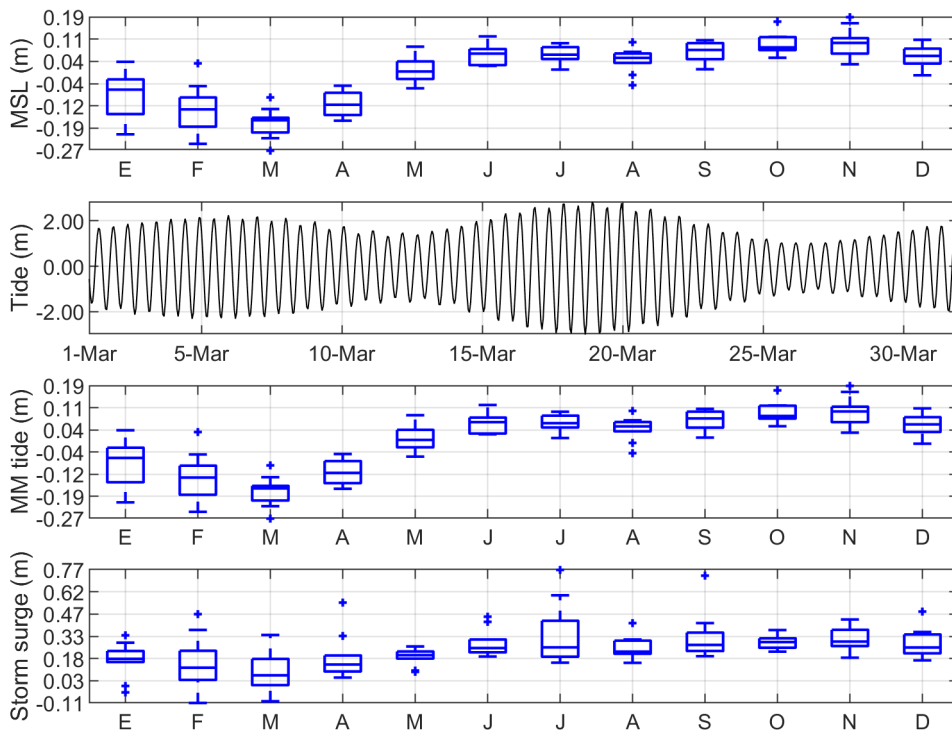


Figura 38. Mareógrafo de Naos. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual.

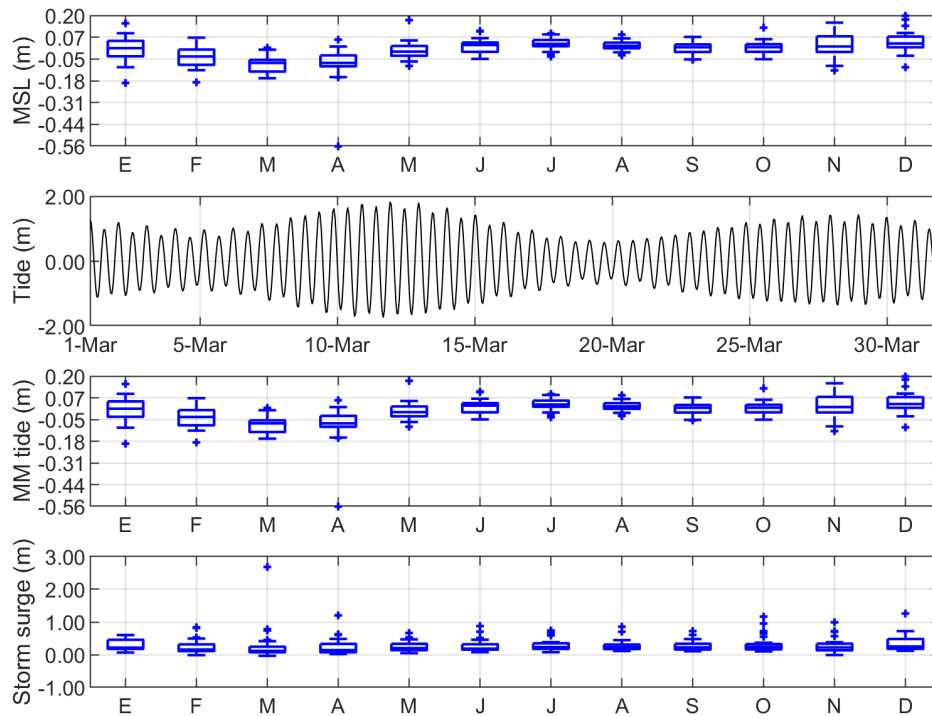


Figura 39. Mareógrafo de Puerto Armuelles. Valores medios \pm desviación típica para (arriba) el nivel medio del mar mensual; (2º) la serie temporal de marea astronómica en el mes de marzo de 2018; (3º) la máxima marea astronómica mensual en el periodo de datos del mareógrafo, y (abajo) la máxima marea meteorológica mensual.

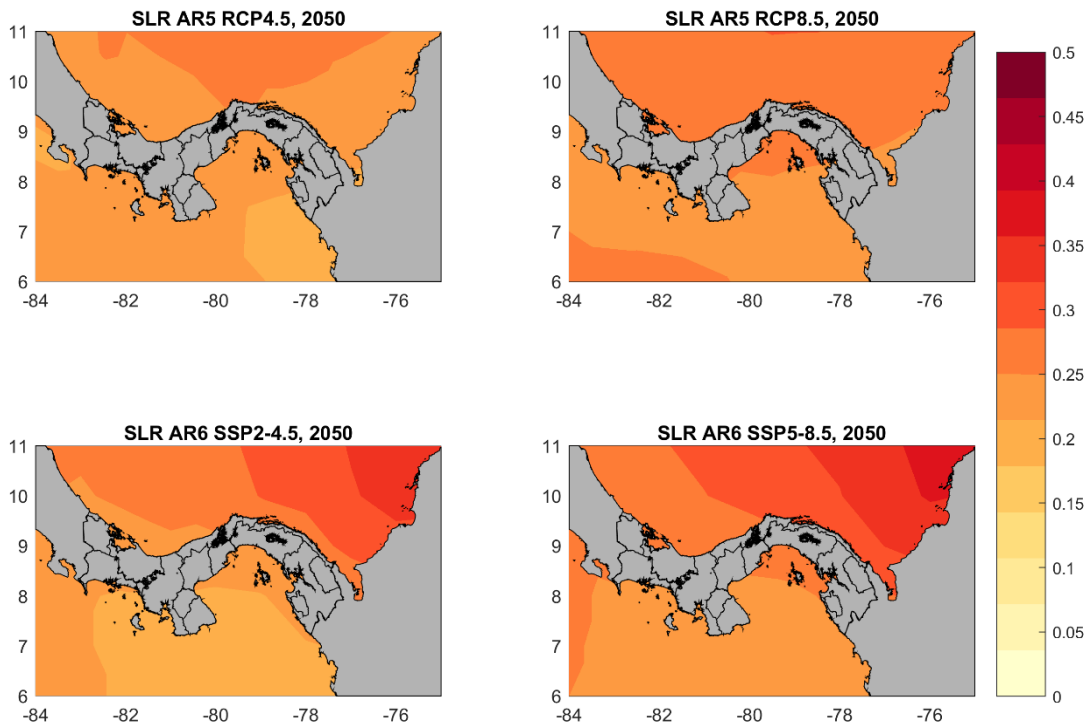


Figura 40. Mapas de aumento del nivel medio del mar (SLR) en el año 2050, para los escenarios de estabilización media (izquierda) y de altas emisiones (derecha), de acuerdo a los datos publicado en el AR5 (paneles superiores) y en el AR6 (paneles inferiores)

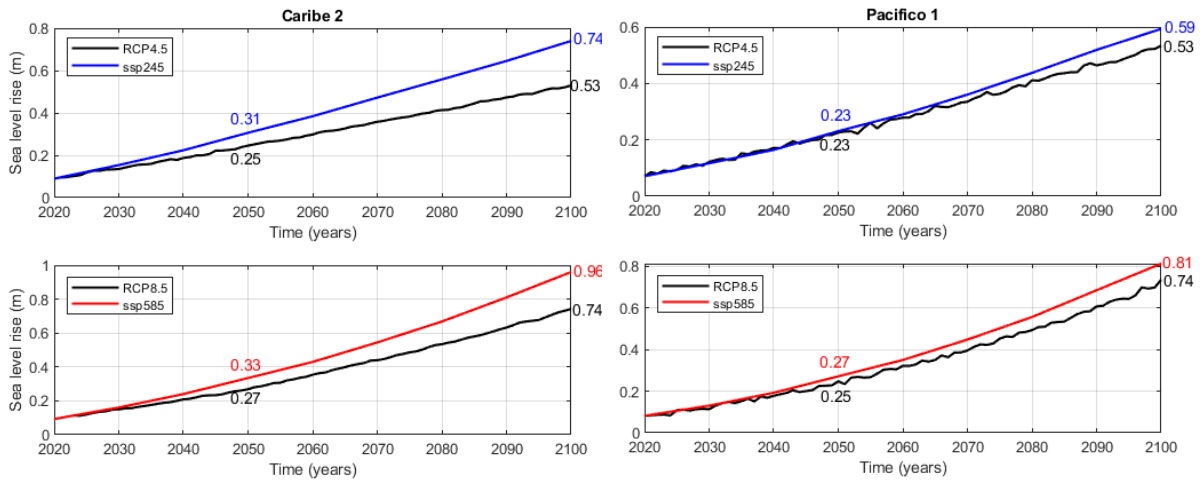


Figura 41. Proyecciones de aumento del nivel del mar publicados en el AR5 (líneas negras) y en el AR6 (líneas azules y rojas) bajo dos escenarios climáticos: (arriba) de estabilización media (RCP4.5 y SSP2-4.5) y (abajo) de altas emisiones (RCP8.5 y SSP5-8.5), en un punto en el Caribe (paneles izquierdos) y en otro en el Pacífico (paneles derechos).

ANEXO II. BASES DE DATOS DISPONIBLES

BASE DE DATOS	INSTITUCIÓN	COBERTURA GEOGRÁFICA	RESOLUCION ESPACIAL	RESOLUCION TEMPORAL	PERIODO CUBIERTO	FORZAMIENTO
Wave hindcast IMEDEA	IMEDEA	Mar Caribe	11.8 km × 11.4 km	6 - horario	1958-2017	JRA-55
GOW2	IHCantabria	Global	0.5 x 0.5 y 0.25 x 0.25 en la region costera	1 - hora	1979-2020	reanálisis global CFSR y CFSv2
GOW1 Global	IHCantabria	Global	1.5 x 1	1 - hora	1948-2015	reanálisis global NCEP-NCAR
ERA5	ECMWF	Global	0.5 x 0.5	1 - hora	1950 - presente	reanálisis global ERA5
GLOBAL OCEAN WAVES REANALYSIS WAVERYS	Météo-France	Global	0.2 x 0.2	3 - horas	1993-2019	Atmosférico del reanálisis global ERA5 y de corrientes de GLORYS12V1
NOAA NWS WW3 hindcast	NOAA	Global	0.5 x 0.5	1 - hora	1979-2009	reanálisis global CFSRR
GOW1 Caribe	IHCantabria	Latinoamérica y Caribe	0.25 x 0.25	1 - hora	1948-2008	reanálisis global NCEP-NCAR
GLOBMULTI_ERA5_05	Ifremer	Global	0.5 x 0.5	3 h	1993-2020	ERA5
GLOBMULTI_ERA5_06	Ifremer	Costa Pacífico americana hasta latitud 20S	0.167 x 0.167	3 h	1993-2020	ERA5
CAWCR wave hindcast	CSIRO	Global	0.4 x 0.4	1 h	1979-present	CFSR
NOAA Gulf of Mexico and NW Atlantic hindcast	NOAA	Gulf of Mexico and NW Atlantic	0.167 x 0.167	3 h	1979-2009	CFSR
Ifremer Global hindcast	Ifremer	Global	0.5 x 0.5	3-h	1990-2020	CFSR

Tabla 7. Bases de datos de hindcast de oleaje disponibles en las costas panameñas

INSTRUMENTO	INSTITUCIÓN	RESOLUCION TEMPORAL	PERIODO CUBIERTO	COBERTURA ESPACIAL
Altimetros	Sea State CCI v1	irregular	1991-2018	Global
Altimetros	Ifremer (GlobWave Products)	irregular	1991-2017	Global
Boyas	NOAA-NBDC	variable	2005-2015	océano atlántico W y Pacífico E

Tabla 8. Bases de datos instrumentales de oleaje disponibles en las costas panameñas

VARIABLE	BASE DE DATOS	INSTITUCIÓN	COBERTURA GEOGRÁFICA	RESOLUCION ESPACIAL	RESOLUCION TEMPORAL	PERIODO CUBIERTO	FORZAMIENTO
Marea meteorológica	GSSR	University of central Florida	Global	en 882 mareógrafos	diaria	1979-2019	ERA5
Marea meteorológica	GOS1	IHCantabria	Latinoamérica y Caribe	0.25 x 0.25	1 - hora	1948 -2008	reanálisis global NCEP-NCAR
Valores extremos de Nivel del Mar	CoDEC	Deltares	Costa Global	0.137 x 0.137	A partir de máximos anuales	1979 - 2017	reanálisis global ERA5
Nivel del mar	FNMOCC Regional Navy Coastal Ocean Model	FNMOCC	Mar Caribe y golfo de Mexico	0.033 x 0.033	3 - horas	2013-04-05– Present	CFSR y HYCOM
Nivel del mar	GOFS (Global Ocean Forecasting System)	HYCOM consortium	Global	0.08° x 0.08°	3 - horas	1994 - presente	
Nivel Medio del Mar	LEGOS	LEGOS	Global	1 x 1	mensual	1960 - 2012	Datos observacionales + EOF
Nivel Medio del Mar	CSIRO_glob24m	CSIRO	Global	1 x 1	mensual	1950 - 2012	Datos observacionales + EOF
Nivel Medio del Mar	CCAR RECON_SEA_LEVEL_OST_L4_V1	CCAR	Global	0.5 x 0.5	semanal	1950 - 2008	Datos observacionales + EOF
Nivel Medio del Mar	Global Ocean Physics Reanalysis	CMEMS	Global	0.083 x 0.083	diario	1993-2019	ERA-Interim/ ERA5
Nivel Medio del Mar	CFSR	NCAR	Global	0.5 x 0.5	horario	1979-presente	CFSR, CFSv2
Nivel Medio del Mar	ECCOV4r4	JPL/NASA	Global	0.5 x 0.5	diaria	1992-2017	ERA-Interim
Anomalía en el nivel del mar	SODA v2.1.6	University of Maryland	Global	0.5 x 0.5	mensual	1958-2008	ERA-40/ ERA-Interim

Tabla 9. Bases de datos de las variables de nivel del mar procedentes de modelos disponibles en las costas panameñas

INSTRUMENTO	INSTITUCIÓN	RESOLUCION TEMPORAL	PERIODO CUBIERTO	LOCALIZACION
Mareógrafos	UHSLC	horaria	variable	Balboa, Cristobal, Porvenir, Naos, Puerto Armuelles
Mareógrafos	GESLA3	horaria	variable	Balboa, Cristobal, Porvenir, Naos, Puerto Armuelles
Mareógrafos	PMSLC	horaria	variable	Balboa, Cristobal, Porvenir, Naos, Puerto Armuelles
Mareógrafos	World Sea Levels from the European Comissiom	10-minutal	variable	Porvenir, Bocas del Toro
Altimetro	Sea Level Sea State CCI v2	irregular	1993-2015	cobertura global

Tabla 10. Bases de datos instrumentales de nivel del mar disponibles en las costas panameñas

VARIABLE	BASE DE DATOS	INSTITUCIÓN	COBERTURA GEOGRÁFICA	RESOLUCION ESPACIAL (°)	RESOLUCION TEMPORAL	PERIODO CUBIERTO
Viento	CMIP6 GCMs	WCRP CMIP6	Global	Entre 1.4 x 1.4 y 2.8 x 2.8	3 - horas	1950-2015; 2015 - 2100
Viento	CMIP5 GCMs	WCRP CMIP5	Global	Entre 0.75 x 0.75 y 2.8 x 2.8	3 - horas	1960- 2005; 2026 - 2100
Viento	Central America CORDEX (CAM-22)	WCRP CORDEX	Centroamérica	0.22 x 0.22	3 - horas y 6 - horas	1970- 2006; 2006- 2100
Oleaje	Proyecciones PIMA Nacional	IHCantabria	Global	1 x 1	1 - hora	1985-2005; 2026- 2045; 2081-2100
Oleaje	CSIRO	CSIRO	Global	1 x 1	1 - hora	1979- 2005; 2026- 2045; 2080- 2100
Oleaje	JRC	JRC	Global	1.5 x 1.5	1 - hora	1970- 2100
Oleaje	USGS	USGS	Global	1 x 1.25	1 - hora	1976-2005; 2026- 2045; 2080- 2100
Oleaje	NOC	NOC	Global	0.7 x 0.5	1 - hora	1970-2004; 1970-2100
Oleaje	ECCC	ECCC	Global	1 x 1	1 - hora	1979 - 2005; 2081-2100
Oleaje	IHE-Delft	IHE-Delft	Global	1 x 1	1 - hora	1979 - 2005; 2006-2100
Oleaje	LBNL	LBNL	Global	0.25 x 0.25	1 - hora	1995 - 2005; 2081- 2100
Oleaje	KU	KU	Global	0.6 x 0.6	1 - hora	1979 - 2005; 2079 - 2100
Nivel del mar extremo	LISCOAST	Joint European Research Centre	Costa Global	0.2 x 0.2	-	2050 y 2100
Aumento Nivel Medio del Mar	IPCC (2013) AR5	IPCC AR5	Global	1 x 1	anual	2007 - 2100
Aumento Nivel Medio del Mar	IPCC (2021) AR6	IPCC AR6	Global	1 x 1	10 años	2020- 2150
Nivel del mar en mareógrafos	Kopp et al. (2017)	-	Global	-	decadal	2010-2300

Tabla 11. Bases de datos de proyecciones de las dinámicas marinas disponibles en las costas panameñas