

Efectos del cambio climático en la costa
de América Latina y el Caribe

Impactos



NACIONES UNIDAS

CEPAL



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

MINISTERIO
DE ASUNTOS EXTERIORES
Y DE COOPERACIÓN



IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe

IMPACTOS

Alicia Bárcena
Secretaria Ejecutiva

Antonio Prado
Secretario Ejecutivo Adjunto

Joseluis Samaniego
Director
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos

Ricardo Pérez
Director
División de Documentos y Publicaciones

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de las Organizaciones participantes.
Los límites y los nombres que figuran en los mapas no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.
Los Estados miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Sólo se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas de tal reproducción.

Esta publicación puede obtenerse dirigiéndose a:
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL, página web: www.cepal.org/ddsah

Foto portada © Gabriel Barajas Ojeda
Publicación de las Naciones Unidas

LC/W.484
Copyright © Naciones Unidas, julio de 2012. Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile

Efectos del cambio climático en la costa
de América Latina y el Caribe

Impactos



NACIONES UNIDAS

CEPAL



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

MINISTERIO
DE ASUNTOS EXTERIORES
Y DE COOPERACIÓN



IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Este documento fue elaborado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria bajo la dirección del proyecto de Iñigo Losada Rodríguez, la coordinación de Fernando J. Méndez Incera y la participación de los investigadores Borja González Reguero, Sonia Castanedo Bárcena, Gabriel Díaz Hernández, Raúl Medina Santamaría, Pedro Díaz Simal, Bárbara Ondiviela Eizaguirre, Roberto Mínguez Solana, Ana J. Abascal Santillana, Antonio Espejo Hermosa, Cristina Izaguirre Lasa, Paula Camus Braña, Oscar García Aguilar, Pino González-Riancho Calzada, Melisa Menéndez García, José Antonio Juanes de la Peña y Antonio Tomás Sampedro. Por parte de la CEPAL el equipo que coordinó y supervisó el estudio fue Carlos de Miguel, Oficial de Asuntos Ambientales, José Javier Gómez, Oficial de Asuntos Económicos, Karina Martínez y Mauricio Pereira, Asistentes de investigación, todos ellos de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Este documento forma parte del estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe, financiado por el Gobierno de España. El estudio se enmarca dentro del Programa Iberoamericano de Adaptación al Cambio Climático (PIACC) siendo una prioridad identificada por los países de la Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC).

Se agradece especialmente el apoyo del personal de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, en particular de Paz Valiente, Ana Pintó, José Ramón Picatoste y Alfonso Gutiérrez.

Además se agradece la colaboración de Felipe Fernández Pérez, Sheila Abad Herrero, Patricia Fernández Quintana, Felipe Maza y Nabil Kakeh Burgada, técnicos del Instituto de Hidráulica de Cantabria, y los comentarios de Rodrigo Cienfuegos, investigador del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Índice

1. Introducción	13
1.1 Contexto	13
1.2 Objetivo y estructura del documento	14
2. Metodología de evaluación de los impactos	17
3. Información utilizada para la evaluación de impactos en las costas de ALyC por cambio climático	19
4. Análisis de impactos en las Costas de ALyC por cambio climático	21
4.1 Inundación costera	22
4.1.1 Inundación por ascenso del nivel del mar.....	23
4.1.2 Determinación del nivel del mar total o cota de inundación.....	43
4.1.3 Cota de inundación (eventos de inundación temporales)	44
4.1.4 Inundación por huracanes	60
4.1.5 Conclusiones del impacto producido por inundaciones costeras.....	63
4.2 Erosión en playas.....	65
4.2.1 Características de las playas en ALyC.....	65
4.2.2 Erosión y equilibrio dinámico en las playas	70
4.2.3 Erosión del perfil de equilibrio por subida del nivel del mar.....	72
4.2.4 Erosión del perfil de equilibrio por aumento de la altura de ola.....	79
4.2.5 Erosión en playas por cambios en la planta de equilibrio.....	82
4.2.6 Transporte potencial de sedimentos	86
4.2.7 Conclusiones generales de los impactos sobre las playas de la región.....	87
4.3 Impactos en los puertos	90
4.3.1 Impactos en la operatividad de los puertos	90
4.3.2 Fiabilidad de los puertos	96
4.3.3 Conclusiones generales de los impactos en las obras marítimas	103
4.4 Impactos de la variación de la temperatura superficial del mar en el blanqueo de los corales	104
4.4.1 Perspectiva de cambio en los arrecifes de coral frente al calentamiento global	105
4.4.2 Regionalización del impacto por blanqueamiento del coral.....	106
4.4.3 Conclusiones generales impacto por blanqueamiento del coral	108

5. Conclusiones	109
6. Referencias	117

Índice de figuras

Figura 3.1	Tendencias de aumento del nivel del mar obtenidas para un punto de la costa Atlántica	23
Figura 3.2	Tendencia media del nivel medio del mar en los períodos 2010-2040 y 2040-2070	24
Figura 3.3	Valor medio estimado de subida del nivel del mar relativo en 2070 a partir de la proyección de la tendencia estadística	25
Figura 3.4	Distribución de la superficie de costa comprendida entre las cotas 0 y 10 m en los países de ALyC.....	27
Figura 3.5	Distribución de la población entre las cotas 0 y 10 m en relación a la población total de cada país.....	28
Figura 3.6	Distribución de la población en los países entre las cotas 0 y 3 m.....	28
Figura 3.7	Población afectada hasta la cota 1 m en el escenario E	34
Figura 3.8	Población afectada hasta la cota asociada al escenario F1 (niño de 1998)	34
Figura 3.9	Carreteras afectadas en el escenario E por subida del nivel del mar hasta la cota 1 m.....	37
Figura 3.10	Isolíneas de nivel para las cotas 1 y 2 m en el delta del río San Francisco.....	40
Figura 3.11	Isolíneas de nivel para las cotas 1 y 2 m en el delta del Río de la Plata	40
Figura 3.12	Isolíneas de nivel para las cotas 1 y 2 m en el delta del río Orinoco.....	41
Figura 3.13	Isolíneas de nivel para las cotas 1 y 2 m en el delta del río Magdalena.....	41
Figura 3.14	Isolíneas para las cotas 1 y 2 m en el delta del río Grijalva.....	42
Figura 3.15	Isolíneas para las cotas 1 y 2 m en el delta del río Atrato	42
Figura 3.16	Isolíneas de nivel para las cotas 1 y 2 m en el delta del río Amazonas.....	43
Figura 3.17	Series temporales en el período 1948-2010 y en el 2008 para los componentes de la cota de inundación	44
Figura 3.18	Cota de inundación de período de retorno 50 años en la actualidad	45
Figura 3.19	Tendencia de largo plazo de los extremos de la cota de inundación	46
Figura 3.20	Tendencia de largo plazo de la cota de inundación por estaciones	47
Figura 3.21	Parámetro de forma de función de distribución generalizada de extremos para la cota de inundación	48
Figura 3.22	Forma de distribución de extremos (GEV) según el parámetro de forma	49
Figura 3.23	Índice de seguridad para la cota de inundación con una recurrencia de 500 años en el horizonte de 2040. Escenario A	50
Figura 3.24	Índice de seguridad para la cota de inundación con una recurrencia media de 500 años en el horizonte de 2070. Escenario C	51
Figura 3.25	Superficie afectada por una inundación costera de período de retorno de 50 años con respecto a 2010	55

Figura 3.26	Superficie afectada por una inundación costera, período de retorno de 50 años en respecto a la actualidad en los escenarios C y E	55
Figura 3.27	Población afectada por eventos de inundación, período de retorno 50 años respecto de 2010	59
Figura 3.28	Diferencia de población afectada por eventos de inundación entre los escenarios e y c, tendencias estadísticas para 500 años	60
Figura 3.29	Puntos de control para el estudio, y mapas de viento y oleaje para los huracanes Kenna (2001) y Katrina (2005).....	61
Figura 3.30	Máximos históricos de altura de ola significativa para los huracanes en el período 1955 a 2009	62
Figura 3.31	Máximos históricos de marea meteorológica conjunta para los huracanes en el período 1955 a 2009.....	62
Figura 3.32	Longitud total de playas de ALyC por países	66
Figura 3.33	Tipos de playa distinguidas en el estudio por países.....	67
Figura 3.34	Longitud de costa, ordenada según longitud de playa, distinguiendo longitud de playa y su frente urbano	67
Figura 3.35	Longitud de costa, ordenada según longitud de frente urbano, distinguiendo longitud de playa y su frente urbano	68
Figura 3.36	Costa con playas rectilíneas en unidades de 50 km.....	68
Figura 3.37	Costa con playas encajadas en unidades de 50 km.....	69
Figura 3.38	Costa con playas sin efecto de desembocaduras en unidades de 50 km	70
Figura 3.39	Esquema de la regla de Bruun, con perfil de equilibrio de la playa y retroceso (R) debido a subida del nivel del mar (s)	72
Figura 3.40	Tendencia media de erosión de las playas por cambios en el perfil de equilibrio entre 2010 y 2070	74
Figura 3.41	Erosión de las playas por cambios en el perfil de equilibrio en 2040	75
Figura 3.42	Variación de la erosión de las playas, por cambios en el perfil de equilibrio en 2070	75
Figura 3.43	Probabilidad de que la erosión supere 5 m en 2040, 2050 y 2070.....	76
Figura 3.44	Grado de confianza de superar 5 y 10 m de erosión en el año 2040 por subida del nivel del mar	77
Figura 3.45	Erosión media en playas de diversos diámetros de grano con una subida del nivel del mar de 1 m.....	77
Figura 3.46	Erosión media en playas de diversos diámetros de grano con una subida del nivel del mar de 2 m.....	78
Figura 3.47	Tasa de erosión media en playas por cambios en la profundidad de cierre entre 2010 y 2070.....	80
Figura 3.48	Erosión media e incertidumbre a partir de cambios en la profundidad de cierre del perfil de las playas en 2040 para el escenario A	81
Figura 3.49	Grado de confianza en escala del IPCC de superar 5 y 10 m de erosión en el año 2040 por cambios en la profundidad de cierre del perfil.....	81
Figura 3.50	Efecto del cambio de la dirección del flujo medio de energía en las playas rectilíneas en equilibrio estático no colmatadas de arena	83

Figura 3.51	Tendencia media de erosión en las playas por cambios en la planta de equilibrio entre 20120 y 2070.....	84
Figura 3.52	Erosión de las playas en 2040 por cambios en la planta de equilibrio	84
Figura 3.53	Erosión de las playas en 2070 por cambios en la planta de equilibrio	85
Figura 3.54	Grado de confianza de superar 10 m y 25 m de erosión en el año 2040 ante cambios en la dirección del oleaje incidente.....	86
Figura 3.55	Tendencia de cambio en el transporte potencial de sedimentos	87
Figura 3.56	Porcentaje de horas al año en que se supera una altura de ola significativa de 3 m respecto de 2010.....	92
Figura 3.57	Tendencia media mensual de la altura de ola significativa entre 2010 y 2070.....	92
Figura 3.58	Variación de la probabilidad de superar 3 m de altura de ola significativa (en un estado de mar horario) en los escenarios A, B y C	93
Figura 3.59	Variación de número de horas al año medio en que se van a exceder 3 m de altura significativa (en un estado de mar horario) en varios años horizonte	94
Figura 3.60	Variación del rebase sobre un dique tipo por variación del oleaje en los escenarios A, B y C	95
Figura 3.61	Incremento en el rebase de un dique vertical por subida del nivel del mar de 0,5 m	96
Figura 3.62	Régimen extremal en 2010 de altura de ola significativa, período de retorno de 500 años.....	100
Figura 3.63	Índice de seguridad de las obras marítimas para una recurrencia media de 500 años en el escenario A (año horizonte 2040)	101
Figura 3.64	Índice de seguridad de las obras marítimas para una recurrencia media de 500 años en el escenario C (año horizonte 2070)	101
Figura 3.65	Pérdida de fiabilidad de las obras marítimas analizada en términos del cambio necesario en el peso de las piezas de abrigo. Escenarios A y C	103
Figura 3.66	Superficie de los arrecifes en el mar Caribe y Pacífico Central	106
Figura 3.67	Probabilidad media de superar 1°C en la temperatura superficial del mar.....	107

Índice de cuadros

Cuadro 3.1	Esquema y documentos del proyecto	14
Cuadro 3.2	Impacto de los agentes climáticos oceánicos sobre los ecosistemas y los sectores socioeconómicos	15
Cuadro 3.3	Escenarios o situaciones contempladas en el análisis de impactos.....	18
Cuadro 3.4	Relación de impactos considerados en el estudio, dinámicas implicadas y técnicas utilizadas para evaluar su cambio a largo plazo	21
Cuadro 3.5	Relación de países analizados, abreviaturas y códigos ISO 3166/2	22
Cuadro 3.6	Población que habita en la costa hasta la cota 10 m.....	29
Cuadro 3.7	Relación de población afectada por país en cada escenario contemplado.....	30
Cuadro 3.8	Relación de superficie de suelo afectada por país en cada escenario contemplado	31

Cuadro 3.9	Relación de tramos de carreteras afectadas por país en cada escenario contemplado	35
Cuadro 3.10	Relación de tramos de ferrocarril afectados por país en cada escenario contemplado	37
Cuadro 3.11	Área y población en los deltas más importantes de ALyC hasta las cotas 1 y 2 m.....	39
Cuadro 3.12	Cambios en los períodos de retorno de la cota de inundación (series de inundación costera) en diversas localizaciones de ALyC	52
Cuadro 3.13	Aumento de superficie afectada para cada escenario de cota de inundación, período de retorno de 500 años con respecto a 2010	53
Cuadro 3.14	Variación de la población afectada en cada escenario de cota de inundación, período de retorno de 50 años respecto de 2010	56
Cuadro 3.15	Variación de la población afectada en cada escenario de cota de inundación, período de retorno de 500 años respecto de 2010	58
Cuadro 3.16	Erosión media esperable para varias localizaciones en ALyC	78
Cuadro 3.17	Vida útil de una obra marítima en función del índice IRE	97
Cuadro 3.18	Probabilidad de fallo en una obra marítima en función del índice ISA	98
Cuadro 3.19	Valoración del índice isa en los puertos de Sudamérica	99
Cuadro 3.20	Probabilidad de fallo y período de retorno en los puertos estudiados	99

Glosario

ALyC	América Latina y el Caribe
AR4	Cuarto informe del IPCC (Assessment Report 4)
C3A	Cambio Climático en las Costas de América Latina y el Caribe (nombre del proyecto)
CC	Cambio Climático
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CI	Cota de inundación
CIESIN	Center for International Earth Science Information
GEV	Función generalizada de extremos (Generalized extreme Value)
GIA	Ajuste glacial isostático (Glacial Isostatic Adjustment)
GOS	Base de datos de marea meteorológica (Global Ocean Surges)
GOW	Reanálisis de oleaje global de IH Cantabria (Global Ocean Waves)
GRUMP	Gridded Population of the World and the Global Rural-Urban Mapping Project
IHC	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
IPCC	Panel Intergubernamental de cambio Climático
IRE	Índice de Repercusión Económica (Programa ROM)
ISA	Índice de repercusión Social y Ambiental (Programa ROM)
ISO	International Organization for Standardization
MA	Marea Astronómica
MM	Marea Meteorológica
NMM	Nivel medio del mar
OECC	Oficina Española de Cambio Climático

ROM	Recomendaciones para Obras Marítimas
RSLR	Ascenso del nivel del mar relativo (Relative Sea Level Rise)
SAL	Salinidad
SI	Índice de Seguridad (Security Index)
SLR	Ascenso del nivel del mar (Sea Level Rise)
SST	Temperatura superficial del agua del mar (Sea Surface Temperature)
STRM	Shuttle Radar Topography Mission
TEU	Unidad de medida de transporte marítimo (Twenty-foot Equivalent Unit)

Lista de símbolos

β_{LT}	Pendiente de la tendencia de largo plazo (eventos extremos)
CI	Cota de Inundación
Dir	Dirección (del oleaje)
DirFE	Dirección media del Flujo de Energía
D_{50}	Diámetro medio de la arena
H_s	Altura de ola significativa
H_{s95}	Percentil 95 de la altura de ola significativa
H_{s12}	Altura de ola significativa superada 12 horas al año
IC	Índice Climático
pdf	Función de densidad (probability density function)
Prob	Probabilidad
q_n	Cuantil n
R^2	Coefficiente de determinación
σ	Desviación estándar
Tm	Período medio del oleaje
Tp	Período de pico del oleaje
Tr	Período de retorno

Unidades

km	kilómetros
m	metros
mm	milímetros
$^{\circ}$	grados sexagesimales (grados náuticos)
$^{\circ}\text{C}$	grados Celsius

1. Introducción

1.1 Contexto

El estudio regional de los efectos del cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe (ALyC en adelante) se ha estructurado en cuatro partes principales en concordancia con una metodología integral de evaluación del riesgo desarrollada durante el estudio. Como resultado del proyecto se presentan cuatro documentos principales que versan sobre el análisis de los agentes, el estudio de la vulnerabilidad de las costas, la evaluación de los impactos derivados y, por último, un documento dedicado a la integración de todos los factores en la evaluación de los riesgos asociados a algunos de los impactos estudiados en las costas de la región.

Como productos auxiliares se presenta un anexo de efectos del cambio climático que recoge las formulaciones teóricas utilizadas y constituye un manual de los conceptos, procesos y fenómenos costeros, analizados en el estudio entre muchos otros. Además, en el citado documento se presentan las expresiones para la evaluación de los impactos de una forma aproximada (método de las perturbaciones) que se pueden utilizar como primer diagnóstico en futuros proyectos locales y regionales. Adicionalmente, la metodología desarrollada para el estudio del riesgo de forma integral se describe en un documento específico (guía metodológica). Por último, en el marco del proyecto se ha desarrollado un visor web de los resultados para la máxima difusión de los mismos en los países de la región. En concreto, los documentos del proyecto son:

- Documento 1: Dinámicas, tendencias y variabilidad climática en ALyC
- Documento 2: Vulnerabilidad y exposición de las costas de ALyC frente al cambio climático
- Documento 3: Impactos del cambio climático en las costas de ALyC
- Documento 4: Evaluación de riesgos frente al cambio climático en las costas de ALyC
- Efectos teóricos el cambio climático en las costas (documento auxiliar)
- Guía metodológica del análisis del riesgo (documento auxiliar)
- Visor web de resultados

El cuadro 3.1 resume la estructura y los productos del estudio realizado. En concreto, este documento es el tercero de todos ellos y se dedica al estudio de los impactos del cambio climático en las costas de la región.

CUADRO 3.1
ESQUEMA Y DOCUMENTOS DEL PROYECTO

Cambio Climático en las costas de ALyC			
Documento 1: Agentes costeros <ul style="list-style-type: none"> • Dinámicas • Tendencias • Variabilidad climática en la costa 	Documento 2: Vulnerabilidad	Documento 3: Impacto	Documento 4: Riesgos
Documentos auxiliares			
Efectos teóricos del cambio climático en las costas	Guía metodológica	Visor web de resultados	

Fuente: Elaboración propia.

1.2 Objetivo y estructura del documento

En el presente documento se analizan distintos efectos del cambio climático, también denominados impactos, en las costas de ALyC por los cambios que están experimentando las dinámicas costeras. Un impacto i , causado por uno o varios agentes h_p , está vinculado con ellos por medio de algún tipo de relación causa-efecto, por lo cual esta relación es susceptible de plantearse mediante una función analítica, establecida por vías empíricas o teóricas, característica de cada impacto considerado. De esta forma, la relación impacto–agente se podría expresar mediante una función del tipo:

$$i = f(a_i) \quad (3.1)$$

Donde a_i es el agente o agentes que causan un cierto efecto en la costa, cuantificado en un impacto i y que se relacionan por medio de la función analítica f .

Para ciertos impactos, por ejemplo, el tiempo que están operativos los puertos, interesa evaluar la tendencia del efecto producido en la costa (pérdida de operatividad) en el régimen medio de los agentes (a lo largo de todas las horas del año). Sin embargo, para otros efectos, como la intensidad o frecuencia de las inundaciones extremas, conviene aislar de la totalidad de datos de la población (todas las inundaciones) solo aquellos que suponen los eventos extremos (eventos de tormenta). Por esta razón, el método de cálculo en régimen medio y extremal (condiciones medias y extremas) difiere.

Los impactos que se han considerado en este estudio son los siguientes (cuadro 3.2):

CUADRO 3.2
IMPACTO DE LOS AGENTES CLIMÁTICOS OCEÁNICOS SOBRE LOS ECOSISTEMAS
Y LOS SECTORES SOCIOECONÓMICOS

		Agentes h=L, Nh								
		INDICADORES CLIMÁTICOS OCEÁNICOS								
		Dinámicas costeras					Din. Oceánicas			
		NMM	CI-Extremas	DirFE-Qs	H _s medio	H _s Extremas	H _{S12}	SST	SAL	
ECOSISTEMAS	Sistema acuatico	Humedales	estuarios deltas							
	Sistema costero	Manglares								
		Coral							Blanqueo	
		Fanerogamas Rocosos Sedimentos								
Sistema litoral	Rocosos									
	Playas/dunas rectilíneas encajadas		Inundación P	Inundación Temp						
Sistema terrestre	Bosque									
	Sabana-pradera Desierto Estepa			Transporte potencial Erosión-planta				Erosión perfil Erosión perfil		
SISTEMA SOCIOECONÓMICO	Puertos									
	Industria									
	Turismo	Infraestructuras								
	Agricultura	Playas								
		Pesca-acuicultura -marisqueo Urbano + servicios			Erosión planta				Erosión perfil	

Fuente: Elaboración propia.

Para cada uno de los impactos se ha obtenido la distribución estadística y la tendencia de largo plazo. A continuación, se enumeran los impactos y la variable que se ha obtenido a partir de las formulaciones descritas en el documento auxiliar “Efectos teóricos”:

- Inundación: se analiza la inundación que sufrirá la costa de la región por: 1) ascenso del nivel del mar (inundación permanente), y 2) eventos temporales extremos de inundación por la acción combinada de mareas, nivel del mar y sobrelevación por oleaje (inundación temporal). En este impacto se estudian factores como la superficie afectada, la población costera, las carreteras, los ferrocarriles y los ecosistemas (véase documento relativo a la vulnerabilidad de las costas de ALyC).
- Erosión en las playas: se estudia la posible erosión de las playas de ALyC por cambios inducidos tanto en el perfil de equilibrio como en la planta de las mismas por el cambio en el nivel del mar y el oleaje.
- Puertos: se estudia las condiciones que pueden influir en la operatividad de las actividades portuarias, como las condiciones de acceso al puerto por el estado del oleaje o por eventos de rebase al interior del puerto en el caso de un dique de defensa. Respecto a la fiabilidad de las obras marítimas de los puertos, se ha analizado cómo variará el nivel de seguridad que presentan las obras de defensa respecto al estado actual por modificación del régimen extremal de oleaje por cambio climático.
- Corales: se estudia el impacto en los corales en el caso de una subida de la temperatura superficial del mar de 1°C sobre las condiciones actuales (siguiendo criterios de estudios previos al respecto).

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos de los distintos impactos en el estudio.

2. Metodología de evaluación de los impactos

Los impactos se evalúan a partir de formulaciones que relacionan los agentes con los efectos en las costas. Una descripción detallada de los mismos, así como las distintas formulaciones que relacionan las dinámicas con los impactos se puede encontrar en el documento auxiliar 2 “Efectos teóricos”.

Los impactos se presentan en diversas escalas temporales. Así por ejemplo, la inundación costera puede considerarse a muy largo plazo por efecto de una subida del nivel del mar debido principalmente a la expansión térmica de los océanos y el deshielo polar, en escala de años, o como eventos de inundación en la escala de horas o días, asociadas a un cambio en los comportamientos meteorológicos actuales (cambios de patrones, intensidades y direcciones de tormentas). Asimismo, los impactos sobre los puertos también se deben analizar en las variables en la escala de estudio de horas ya que la afección se va a dar en fenómenos puntuales que van a provocar la parada o el fallo de los puertos o sus obras marítimas. Así, ante la diversidad de escalas temporales de análisis, cada impacto necesita un estudio particularizado del mismo. No obstante, todos ellos se pueden evaluar en los años horizonte 2040, 2050 y 2070, considerados en el estudio.

En el estudio se contemplan ocho escenarios o situaciones de análisis. Los tres primeros (A,B,C) corresponden con la extrapolación estadística de las tendencias de largo plazo obtenidas para cada impacto. Los escenarios D y E corresponden a una sobrelevación del nivel del mar de 0,5 y 1 m, respectivamente, basados en las proyecciones IPCC de subida del nivel del mar. En aquellos impactos compatibles con estas subidas del nivel del mar se han utilizado las proyecciones estadísticas para obtener el efecto conjunto de ambos como un límite superior del impacto. Dada la importancia de la variabilidad interanual de las dinámicas en la zona (véase documento 1 del estudio regional, “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”), se ha contemplado en un escenario F la situación del ascenso del nivel del mar que se produciría con un evento Niño de intensidad igual al máximo histórico (1998) sin ascenso del nivel del mar para fines comparativos (F1) y en una situación futura donde el nivel del mar fuese 1 m más alto, con base en proyecciones IPCC (F2). El mismo análisis se realiza para el evento Niña máximo histórico en el escenario G (G1 y G2). Por último, y aunque en los huracanes no se han analizado con el mismo rigor estadístico, sí que se contemplan los impactos que se producirían en la actualidad de darse en cada punto de costa los máximos valores históricos calculados de sobrelevación del nivel del mar (H1) y en una situación con el nivel del mar 1 m por encima de la actualidad (H2).

CUADRO 3.3
ESCENARIOS O SITUACIONES CONTEMPLADAS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS

ID. Escenario	Año de corte	Método	Dinámicas consideradas	Variantes-Observaciones	
A	2040	Tendencias estadísticas	Tendencias estadísticas. Todas	-	
B	2050	Tendencias estadísticas	Tendencias estadísticas. Todas	-	
C	2070	Tendencias estadísticas	Tendencias estadísticas. Todas	-	
D	2100	Justificación con escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 0,5 m	Tendencias estadísticas del resto de dinámicas del 2070	
E	2100	Justificación con escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 1 m	Tendencias estadísticas del resto de dinámicas del 2070	
F	F1	2010	Niño98	Nivel del mar	Niño de 1998 en la actualidad
	F2	2100	Niño98 + escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 1 m	Niño de 1998 con escenario de CC
G	G1	2010	Niña89	Nivel del mar	Niña de 1989 en la actualidad
	G2	2100	Niña89 + escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 1 m	Niña de 1989 con escenario de CC
H	H1	2010	Huracanes	Nivel del mar y cota de inundación	Huracanes en la actualidad
	H2	2100	Huracanes + escenario SLR IPCC	Subida del Nivel del mar de 1 m	Huracanes en escenario de CC

Fuente: Elaboración propia.

3. Información utilizada para la evaluación de impactos en las costas de ALyC por cambio climático

Los datos utilizados para el cálculo de los impactos han sido series temporales de las dinámicas (caracterizadas en el documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”) a partir de los reanálisis numéricos desarrollados para el estudio y de las distintas bases de datos instrumentales que se explican con detalle en documentos anteriores.

A partir de las series temporales de las dinámicas se han construido series temporales de impactos mediante formulaciones analíticas que las relacionan y sobre los que se han analizado las tendencias de cambio de largo plazo. Así, por ejemplo, el nivel del mar y el oleaje, conjuntamente, se relacionan con la erosión en las playas, y los cambios en aquellos supondrán cambios en la erosión, efectos que, en muchas ocasiones, no son lineales (o proporcionales). Estas formulaciones analíticas detalladamente descritas se pueden encontrar en el documento auxiliar de efectos teóricos del cambio climático en las costas.

4. Análisis de impactos en las costas de ALyC por cambio climático

Los impactos considerados en este estudio son los que figuran a continuación. Se incluye una descripción de cada uno, incluyendo los agentes o dinámicas que lo producen, así como su relación funcional y el método de cálculo detallado.

CUADRO 3.4
RELACIÓN DE IMPACTOS CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO, DINÁMICAS IMPLICADAS Y TÉCNICAS UTILIZADAS PARA EVALUAR SU CAMBIO A LARGO PLAZO

Impacto	VARIABLES IMPLICADAS	Técnica de análisis de los cambios de largo plazo
Inundación permanente	Subida del nivel del mar (SLR)	Tendencias estadísticas de largo plazo
Inundación temporal	Marea meteorológica (<i>Storm surge</i>), subida del nivel del mar, marea astronómica, <i>setup</i> del oleaje y estacionalidad del nivel del mar	Tendencias estadísticas de largo plazo
Erosión de playas	H_{S12} , subida del nivel del mar, dirección del flujo medio de energía	Tendencias estadísticas de largo plazo
Actividad portuaria	Rebase y condiciones de navegación por oleaje	Tendencias estadísticas de largo plazo
Seguridad de obras marítimas	Alturas de ola extremas (modificación de las alturas de cálculo)	Modelos de extremos no estacionarios
Blanqueo de coral	Temperatura superficial del mar	Tendencias estadísticas de largo plazo
Transporte potencial sedimentario	Oleaje y viento	Tendencias basadas en perturbaciones y tendencias estadísticas de largo plazo

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los impactos se lleva a cabo a escalas espaciales de 50 km y de países. Para identificar cada país se ha utilizado el código ISO 3166/2 y las abreviaturas asociadas que se expresan en el cuadro 3.5.

CUADRO 3.5
RELACIÓN DE PAÍSES ANALIZADOS, ABREVIATURAS Y CÓDIGOS ISO 3166/2

Id.	Nombre del País	Abreviatura	Código ISO	Id.	Nombre del País	Abreviatura	Código ISO
1	Antigua y Barbuda	ATG	28	23	Honduras	HND	340
2	Argentina	ARG	32	24	Jamaica	JAM	388
3	Bahamas	BHS	44	25	Martinica	MTQ	474
4	Barbados	BRB	52	26	México	MEX	484
5	Brasil	BRA	76	27	Montserrat	MSR	500
6	Belice	BLZ	84	28	Antillas Neerlandesas	ANT	530
7	Islas Vírgenes-Británicas	VGB	92	29	Aruba	ABW	533
8	Islas Caimán	CYM	136	30	Nicaragua	NIC	558
9	Chile	CHL	152	31	Panamá	PAN	591
10	Colombia	COL	170	32	Perú	PER	604
11	Costa Rica	CRI	188	33	Puerto Rico	PRI	630
12	Cuba	CUB	192	34	Saint Kitts y Nevis	KNA	659
13	Dominica	DMA	212	35	Anguila	AIA	660
14	República Dominicana	DOM	214	36	Santa Lucía	LCA	662
15	El Ecuador	ECU	218	37	San Vicente y las Granadinas	VCT	670
16	El Salvador	SLV	222	38	Suriname	SUR	740
17	Guyana	GUY	254	39	Trinidad y Tabago	TTO	780
18	Granada	GRD	308	40	Islas Turcas y Caicos	TCA	796
19	Guadalupe	GLP	312	41	Islas Vírgenes de los Estados Unidos	VIR	850
20	Guatemala	GTM	320	42	Uruguay	URY	858
21	Guyana	GUY	328	43	Venezuela (República Bolivariana de)	VEN	862
22	Haití	HTI	332				

Fuente: Elaboración propia.

4.1 Inundación costera

La inundación en las costas se puede producir de forma temporal por eventos de inundación que se consideran extremos debido a que se alcanzan cotas no muy frecuentes por el nivel del agua del mar. En adelante este tipo de inundación costera lo representaremos mediante la Cota de Inundación.

Por otro lado, al hablar de cambio climático se suele analizar la subida del nivel medio del mar (*Sea Level Rise*) como factor predominante en la inundación costera. En este caso, este tipo de inundación, por subida del nivel del mar, en un escenario de cambio climático supone una inundación permanente, también conocida como sumergencia.

Debido a esta doble dimensión del problema, por un lado la inundación de eventos extremos y con duración temporal (Cota de Inundación) y, por otro, la sumergencia o pérdida de suelo por ascenso del nivel medio del mar, es necesario contemplar ambas en el estudio.

Esta sección está estructurada de la siguiente forma:

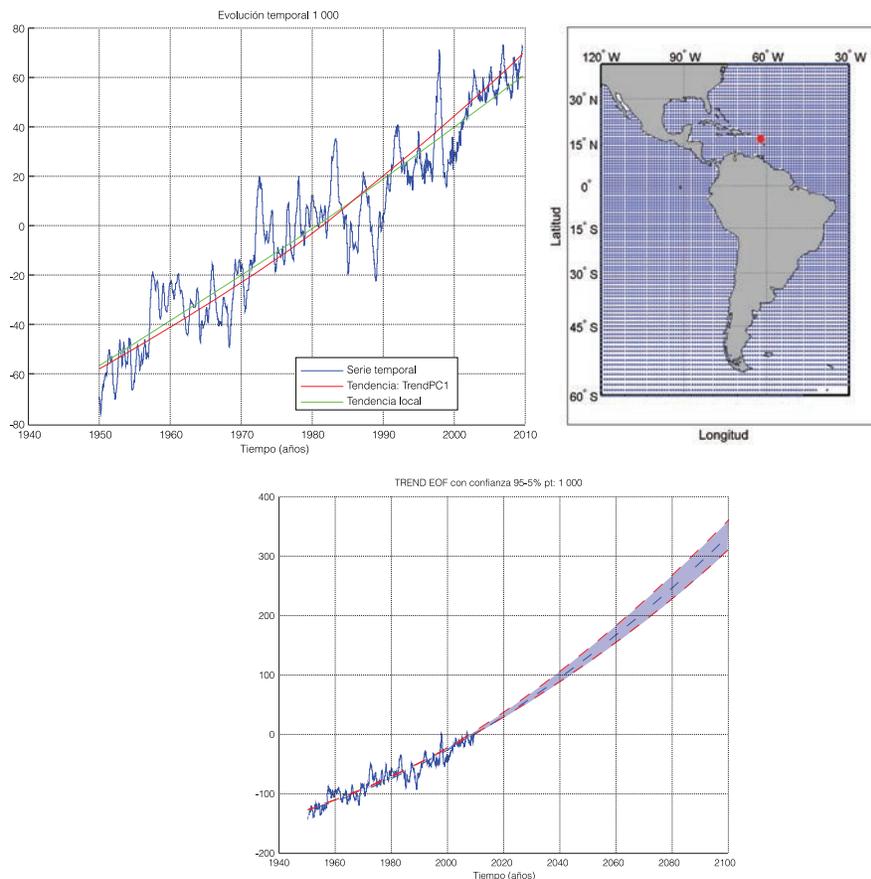
- inundación por ascenso del nivel del mar;
- análisis de la cota de inundación extremal;
- efecto de los huracanes.

4.1.1 Inundación por ascenso del nivel del mar

4.1.1.1 Tendencias del nivel medio del mar (*Sea Level Rise*)

En la figura 3.1 se representa las tendencias del ascenso del nivel del mar en un punto y su proyección estadística (véanse documentos anteriores). En este caso, la subida del nivel del mar (*Sea Level Rise*, SLR), sufrirá un aceleramiento en el futuro y además, se advierte en la serie temporal de anomalías debidas a la influencia del fenómeno ENSO (periodos de Niño y Niña).

FIGURA 3.1
TENDENCIAS DE AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR OBTENIDAS PARA UN PUNTO
DE LA COSTA ATLÁNTICA
(Milímetros)

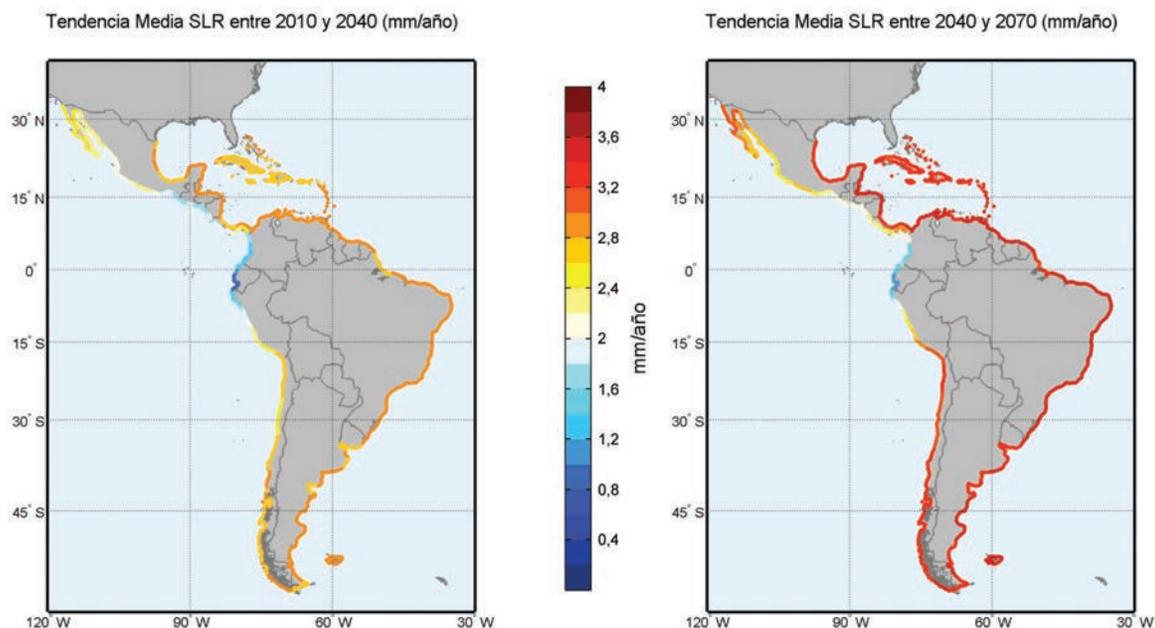


Fuente: Elaboración propia.

Nota: A la derecha muestra la Tendencia Trend-EOF del ascenso del nivel del mar (SLR), en el centro la localización del punto, y a la izquierda la comparación entre la tendencia local y la Trend-EOF.

En la figura 3.2 se representa el patrón espacial de la tendencia media en los dos períodos de tiempo considerados, 2010-2040 y 2040-2070.

FIGURA 3.2
TENDENCIA MEDIA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN LOS PERÍODOS
2010-2040 Y 2040-2070
 (Milímetros/año)



Fuente: Elaboración propia.

La tendencia es inequívocamente de aumento del nivel del mar en todos los puntos de la región. Los mayores valores de las tendencias se obtienen en la franja costera Atlántica, con valores de aproximadamente 3 mm al año en la costa del norte de Sudamérica y la costa del Caribe, con menores valores en las islas caribeñas. En el segundo período del siglo la tendencia asciende hasta un valor medio de 4 mm anuales. Para el resto de la costa se ha obtenido un aumento del nivel del mar por debajo de los 2,5 mm anuales durante el primer período del siglo y cercano a 3 mm a partir de 2040.

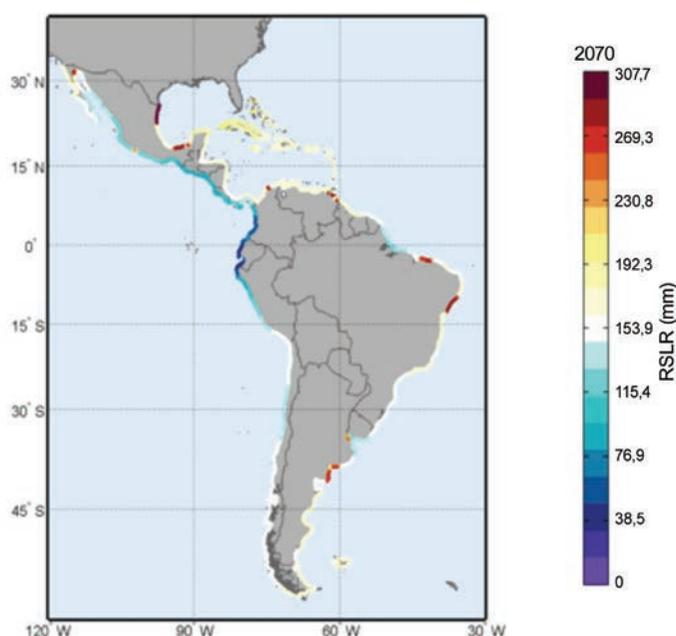
Para los años horizontes contemplados se llegaría (documentos anteriores) hasta valores de prácticamente 100 mm en el año 2040 como máximo y de más de 200 mm en el año 2070 en la costa norte de Sudamérica, la zona con mayor ascenso. Merece la pena resaltar que la incertidumbre asociada a estos valores, entendida como la posible variación en torno a la media, es pequeña respecto a estos valores en los años horizonte (máximo en torno a 12 cm), tal y como se presentó en los documentos precedentes de este estudio.

4.1.1.2 Tendencias en el Nivel Medio del Mar Relativo (*Relative Sea Level Rise*)

La subida del nivel medio del mar analizada en el apartado previo no contempla el efecto de hundimiento o elevación de la tierra por efecto del ajuste glaciario-isostático (GIA). El ascenso del nivel medio del mar con el efecto de la subsidencia de la tierra se denomina nivel medio del mar relativo (RSLR, *Relative Sea Level Rise*). En este estudio, los valores de subsidencia/elevación han sido tomados de los cálculos de Peltier (2000) e interpolados usando la técnica IDW (*Inverse Distance Weighting*) de forma que se obtiene una malla de resolución de 0,5 grados en toda la zona de estudio.

Los valores atribuidos a cada segmento de la costa se han obtenido promediando los valores de la malla interseccionados por la costa. En los casos de los deltas, con una subsidencia adicional de 2 mm/año. Estos datos han sido obtenidos de la base de datos del *software* DIVA.

FIGURA 3.3
VALOR MEDIO ESTIMADO DE SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR RELATIVO EN 2070
A PARTIR DE LA PROYECCIÓN DE LA TENDENCIA ESTADÍSTICA
(Milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia de forma clara en la figura precedente, los deltas suponen un lugar de especial preocupación por la subsidencia adicional propia del terreno. Además, la característica propia de ser zonas con pendientes muy suaves debido a su origen sedimentario no hace sino agravar la situación. El estudio de cada delta es un problema local y requiere de datos específicos para su análisis. No obstante, a partir de los resultados obtenidos en el presente estudio en las unidades de estudio (5 km, véanse documentos anteriores), se puede hacer una estimación de las implicaciones esperables.

4.1.1.3 Impactos del ascenso del Nivel Medio del Mar (*Sea Level Rise*) en las distintas situaciones contempladas

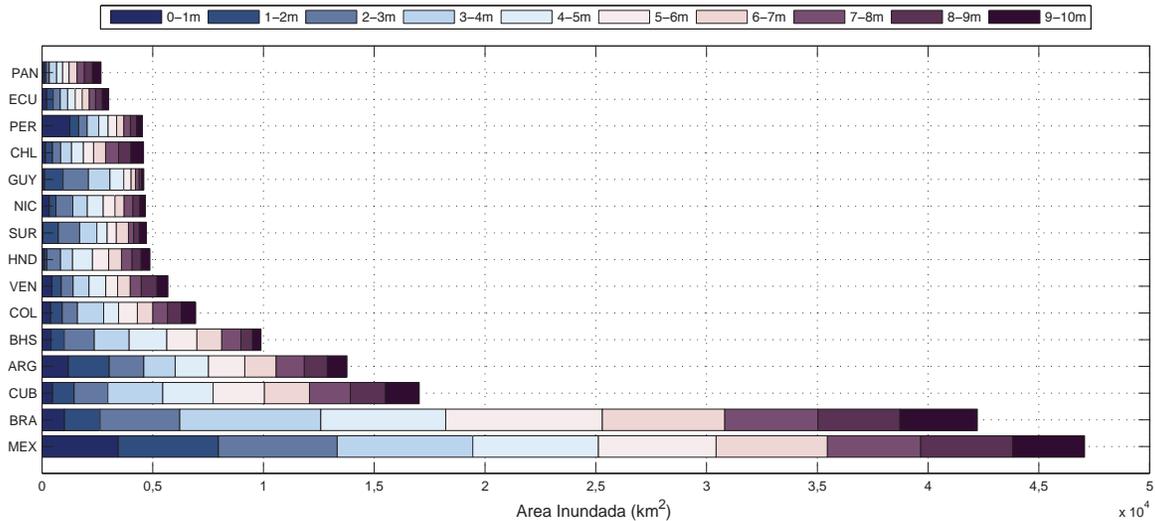
El nivel medio del mar se ha elevado a lo largo del siglo pasado (véanse documentos precedentes). Esta elevación del nivel es prácticamente cierto que se mantenga e incluso se acelere en el presente siglo por causa del calentamiento global. Sin embargo, su magnitud permanece incierta. Actualmente, las zonas costeras de baja elevación (por debajo de 10 m) albergan el 10% de la población mundial (McGranahan y otros, 2007), por lo que la subida del nivel del mar es uno de los principales factores de preocupación para evaluar los impactos del cambio climático en las zonas costeras. Los impactos del ascenso del nivel del mar son potencialmente altos por lo que la aplicación y el éxito de medidas de adaptación son grandes incertidumbres que requieren más estudios y consideraciones (Nicholls y Cazenave, 2010).

Antes de analizar el impacto que tendría la sumergencia o inundación permanente de zonas costeras por una eventual subida del nivel medio del mar es interesante analizar la distribución de la superficie inundada y de la población en las costas. Esto se ha hecho determinando la superficie comprendida entre las cotas 0 y 10 m, metro a metro, obteniendo la población asociada a cada superficie (documento 2 sobre vulnerabilidad de la costa).

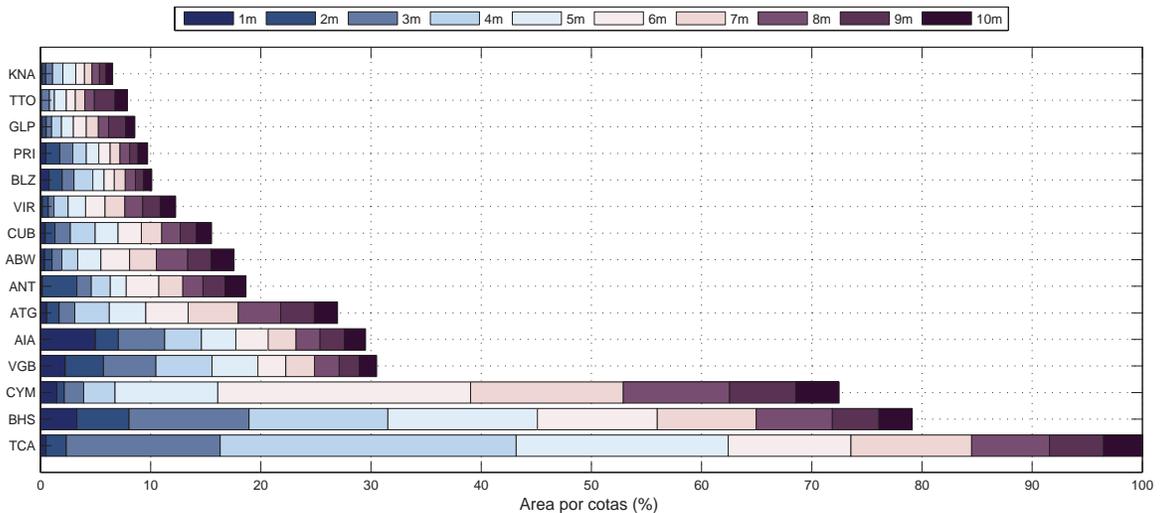
Para el caso de la distribución por cotas de la superficie afectada (figura 3.4) se puede apreciar que la distribución es variable según el país, distinguiéndose distintas pendientes medias entre los mismos. Por ejemplo, véase en la parte superior del gráfico la distribución de los valores de superficie en km² afectados, las distintas situaciones en los primeros metros de países como Honduras o Guyana, donde la superficie de terreno por debajo de la cota 1 m en Honduras (HND) es muy inferior en comparación con el área de terreno a cotas superiores, mientras que en Perú (PER) la situación es contraria, con una parte significativa de la superficie total por debajo del primer metro de elevación. La segunda parte del gráfico (panel inferior) representa la superficie afectada en cada cota en porcentaje con respecto a la superficie total de cada país. Esta representación es más ilustrativa de la situación de muchos países que la estimación de la superficie afectada total. Véase que, en este caso, las islas caribeñas toman gran importancia ya que, en muchos casos, la mayor parte de su territorio está por debajo de la cota 10 m (véase documento 2 “Vulnerabilidad”). En estos casos, el peso relativo de la franja costera es mucho mayor que en el caso de países con gran superficie de terreno como México, Brasil o Argentina. En este caso, las Islas Turcas y Caicos, las Bahamas y las Islas Caimán son las más comprometidas en caso de impactos por inundación.

FIGURA 3.4
DISTRIBUCIÓN DE LA SUPERFICIE DE COSTA AFECTADA ENTRE LAS
COTAS 0 Y 10 M EN LOS PAÍSES DE ALYC

a) *Kilímetros cuadrados*



b) *Porcentaje respecto al área total del país*

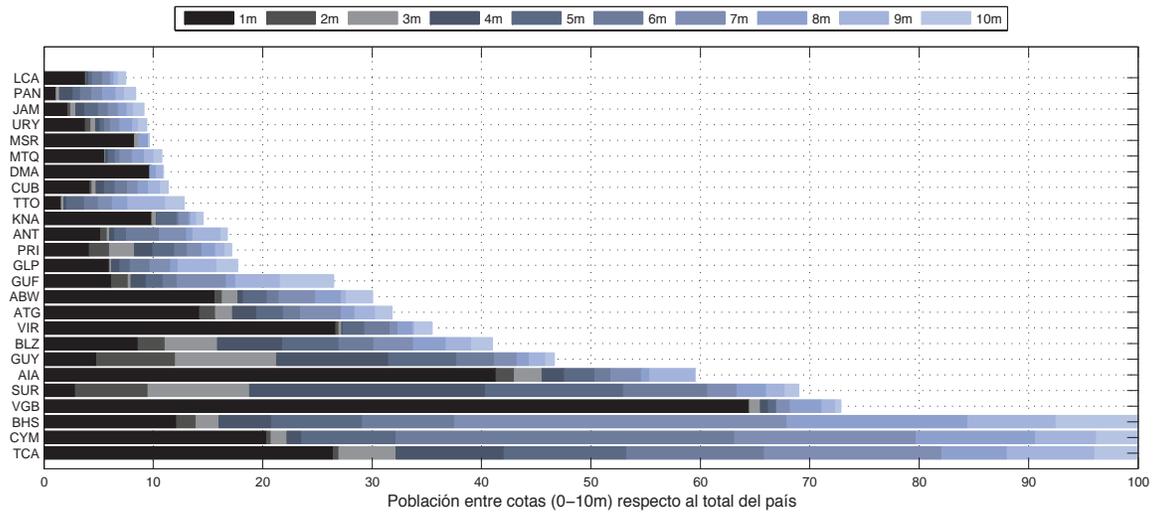


Fuente: Elaboración propia.

Nota: La resolución es de 1 m en vertical.

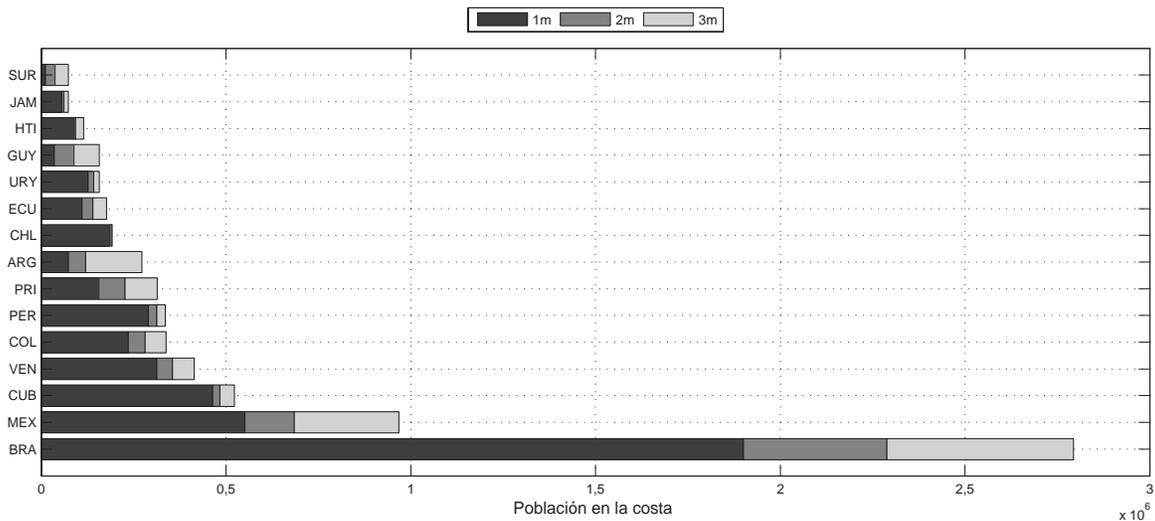
Análogamente, la figura 3.5 resume los datos de población obtenidos para los 15 países con mayor número de habitantes entre las cotas 0 y 10 m, en relación con la población total del país. Este gráfico ilustra las diferencias en la distribución de población en los primeros metros de elevación entre los distintos países. Son destacables varios casos como las Islas Vírgenes Británicas (VGB), donde más del 60% de la población se localiza en las cotas más bajas. La figura 3.6 muestra la distribución de población por cotas en los tres primeros metros (0 a 3 m, metro a metro). En vista de las cotas máximas afectada por elevación del nivel medio en los escenarios o situaciones contempladas (figura 3.3) el número de habitantes en estos primeros metros es la que determina el mayor impacto esperable para la población por subidas del nivel del mar.

FIGURA 3.5
DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN ENTRE LAS COTAS 0 Y 10 M EN RELACIÓN A LA POBLACIÓN TOTAL DE CADA PAÍS
(Porcentaje del total)



Fuente: Elaboración propia.
 Nota: La resolución es de 1 m en vertical.

FIGURA 3.6
DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN ENTRE LAS COTAS 0 Y 3 M
(Número de habitantes)



Fuente: Elaboración propia.
 Nota: La resolución es de 1 m en vertical.

Los datos analizados para la evaluación de la vulnerabilidad en las costas de la región (documento 2 “Vulnerabilidad”) han sido cruzados con las situaciones o escenarios de subida del nivel del mar de estudio (cuadro 3.3) y se han obtenido cuadros de resultados para cada país para las distintas variables analizadas.

Debido a que los datos de población tienen como año de estudio el 2001 y que las resoluciones del modelo topográfico (STRM-90) y de los datos de densidad de población (CIESIN) difieren, es más conveniente analizar la distribución por cotas, más que los valores de población en sí. Por ello, se ha creído más conveniente expresar los resultados en proporción respecto a la población estimada hasta la cota de 10 m como indicador de impacto. Con datos actualizados sobre la distribución de la población y la topografía local se podría llegar a resultados concretos sobre la población impactada exacta. Esta representación del impacto (reflejada en el cuadro 3.7), además, presenta una ventaja adicional ya que el orden de los países en la clasificación se corresponde con los países más impactados en términos de población afectada. Sin embargo, al analizar los porcentajes de población costera afectada, los ratios más altos corresponden a países que no destacarían por el número total de personas afectadas. Esta doble visión del impacto es sin duda útil y necesaria.

CUADRO 3.6
POBLACIÓN QUE HABITA EN LA COSTA HASTA LA COTA 10 M

País	Código país	Cota 10 m (Número de habitantes)	País	Código país	Cota 10 m (Número de habitantes)
BRA	76	10 464 998	NIC	558	115 462
MEX	484	3 363 474	BLZ	84	107 743
ARG	32	2 812 740	CRI	188	92 078
CUB	192	1 704 496	GLP	312	86 520
VEN	862	1 192 815	GUF	254	46 834
COL	170	1 039 008	MTQ	474	58 767
PRI	630	759 651	VIR	850	63 114
PER	604	877 139	AIA	660	54 350
DOM	214	560 644	CYM	136	40 000
HTI	332	562 235	ANT	530	36 213
ECU	218	520 242	ABW	533	40 784
CHL	152	537 077	ATG	28	25 941
GUY	328	374 798	BRB	52	29 611
URY	858	421 393	VGB	92	21 271
SUR	740	272 555	LCA	662	16 082
PAN	591	265 903	TCA	796	12 496
BHS	44	260 886	DMA	212	13 336
JAM	388	280 531	GRD	308	10 939
HND	340	245 089	KNA	659	8 825
SLV	222	200 002	VCT	670	8 730
TTO	780	171 772	MSR	500	623
GTM	320	148 406			

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3.7
RELACIÓN DE INCREMENTO DE LA POBLACION AFECTADA POR PAÍS EN CADA
ESCENARIO CONTEMPLADO

(Porcentaje respecto a la población total en la cota 10 m)

Código país	País	Escenario										
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
76	BRA	1,87	2,58	4,12	10,88	21,76	0,35	13,33	0,00	13,11	-	-
484	MEX	1,46	2,01	3,21	9,50	18,99	1,09	12,43	0,04	11,79	17,97	26,53
32	ARG	0,22	0,31	0,49	1,34	2,69	0,04	2,25	0,00	2,20	-	-
192	CUB	3,03	4,16	6,65	18,61	37,23	0,93	19,90	0,00	19,40	37,48	42,30
862	VEN	2,95	4,06	6,48	16,65	33,29	0,20	19,41	0,04	19,32	7,54	37,92
170	COL	2,43	3,34	5,34	14,43	28,85	0,89	18,24	0,00	17,74	27,51	37,45
630	PRI	1,97	2,71	4,33	12,06	24,12	0,82	18,10	0,00	17,51	41,36	52,78
604	PER	3,06	4,22	6,73	24,04	48,09	6,77	28,37	0,00	24,80	-	-
214	DOM	0,93	1,28	2,05	5,74	11,48	0,60	6,52	0,00	6,20	12,77	14,11
332	HTI	1,51	2,08	3,31	9,31	18,61	1,01	10,36	0,00	9,82	20,56	25,83
218	ECU	0,70	0,96	1,53	12,31	24,62	5,62	20,21	0,00	16,31	-	-
152	CHL	4,18	5,76	9,20	26,05	52,09	1,35	26,95	0,00	26,26	-	-
328	GUY	0,89	1,22	1,95	5,19	10,38	0,00	12,85	0,10	12,97	-	-
858	URY	3,37	4,64	7,41	20,18	40,36	1,07	23,31	0,01	22,72	-	-
740	SUR	0,36	0,49	0,79	2,09	4,18	0,00	6,92	0,02	6,96	-	-
591	PAN	0,97	1,33	2,12	6,49	12,98	1,17	7,49	0,00	6,88	4,36	14,38
44	BHS	1,10	1,52	2,43	6,06	12,13	0,16	7,59	0,00	7,50	16,18	19,96
388	JAM	1,98	2,72	4,34	12,04	24,08	1,24	14,00	0,00	13,32	29,45	36,64
340	HND	0,61	0,84	1,35	3,59	7,19	0,31	4,64	0,00	4,44	7,24	10,70
222	SLV	0,76	1,04	1,66	7,16	14,32	3,05	8,62	0,00	7,08	12,22	14,30
780	TTO	0,63	0,86	1,38	6,25	12,51	0,00	3,63	0,01	3,64	3,24	7,37
320	GTM	0,43	0,59	0,95	3,19	6,38	1,19	4,27	0,00	3,66	5,26	7,52
558	NIC	0,96	1,33	2,12	8,67	17,34	2,91	9,83	0,00	8,35	16,17	19,51
84	BLZ	2,40	3,30	5,27	10,49	20,97	0,24	17,12	0,00	16,97	39,03	53,53
188	CRI	1,11	1,52	2,43	9,34	18,67	3,11	11,75	0,00	10,11	4,43	21,30
312	GLP	2,86	3,93	6,27	16,80	33,59	0,87	17,48	0,00	17,04	34,56	37,29
254	GUF	2,03	2,79	4,46	11,69	23,37	0,05	14,64	0,00	14,61	-	-
474	MTQ	4,43	6,08	9,71	25,76	51,51	0,99	26,34	0,00	25,84	51,86	53,16
850	VIR	6,24	8,58	13,70	37,56	75,13	2,47	39,24	0,00	38,00	76,65	76,96
660	AIA	5,77	7,94	12,67	34,71	69,43	2,48	37,40	0,00	36,12	75,09	78,77
136	CYM	1,84	2,53	4,04	10,19	20,37	1,06	11,74	0,00	11,20	23,16	24,65
530	ANT	2,67	3,68	5,87	15,51	31,02	0,00	17,26	0,01	17,27	34,23	35,63
533	ABW	4,51	6,21	9,92	26,06	52,12	0,74	27,52	0,00	27,13	54,05	58,63
28	ATG	3,76	5,18	8,26	22,39	44,77	1,46	25,47	0,00	24,67	52,52	58,70
52	BRB	5,99	8,24	13,15	34,49	68,97	0,10	35,47	0,00	35,42	70,84	70,84
92	VGB	7,34	10,10	16,12	44,23	88,46	2,94	45,74	0,00	44,27	89,45	90,57
662	LCA	4,41	6,05	9,66	25,40	50,79	0,45	26,33	0,00	26,09	52,19	54,24
796	TCA	2,63	3,61	5,77	13,22	26,45	0,87	16,72	0,00	16,28	35,04	43,42
212	DMA	7,58	10,43	16,65	44,15	88,31	1,69	45,00	0,00	44,15	88,31	88,31

(continúa)

(conclusión)

Código país	País	Escenario										
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
308	GRD	7,06	9,72	15,51	40,66	81,31	0,00	40,66	0,00	40,66	81,31	81,31
659	KNA	5,70	7,85	12,52	33,93	67,84	2,18	35,01	0,00	33,93	69,45	70,84
670	VCT	6,45	8,89	14,18	37,16	74,32	0,04	37,18	0,00	37,16	74,32	75,80
500	MSR	7,19	9,88	15,87	43,41	86,53	2,69	44,61	0,00	43,41	89,22	90,12

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de población muestran a Brasil, México y Argentina como los tres países con más población afectados por subidas del nivel del mar en las próximas décadas. Sin embargo, los casos de Perú, Chile y Uruguay destacan por la gran proporción de población comprometida en el escenario E (1 m de elevación) respecto al total de la población residente en la zona costera (hasta 10 m). Destacan a su vez las situaciones de los países insulares como Barbados, Islas Vírgenes Británicas, Dominica, etc. con porcentajes de población afectada por encima del 70% de la población total en la costa, identificándolos como grandes focos de impacto.

CUADRO 3.8
RELACIÓN DE INCREMENTO DE LA SUPERFICIE DE SUELO AFECTADA POR PAÍS
EN CADA ESCENARIO CONTEMPLADO
(Kilómetros cuadrados)

Código país	País	Escenario										
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
484	MEX	272,04	374,11	597,22	1 725,00	3 449,47	214,79	4 327,98	11,18	4 072,47	4 768,54	9 085,75
76	BRA	87,42	120,43	192,25	509,00	1 017,48	16,96	1 334,49	0,00	1 310,91	-	-
192	CUB	39,42	54,21	86,54	240,00	480,86	20,49	756,35	0,00	725,02	1 266,36	2 613,09
32	ARG	100,59	138,70	221,42	596,00	1 192,96	18,58	1 536,24	0,26	1 522,41	-	-
44	BHS	34,71	47,73	76,20	206,00	412,72	5,19	509,23	0,00	502,22	1 393,89	2 819,87
170	COL	31,33	43,07	68,75	196,00	391,97	15,77	468,97	0,00	451,45	420,27	993,10
862	VEN	39,41	54,19	86,51	225,00	450,83	2,34	453,92	0,70	452,13	211,10	770,73
340	HND	10,59	14,57	23,26	59,00	118,58	3,65	119,45	0,00	115,78	232,95	529,90
740	SUR	4,56	6,28	10,02	26,00	52,85	0,00	374,64	0,30	377,50	-	-
558	NIC	27,62	38,02	60,70	164,00	328,23	2,01	312,45	0,00	309,98	335,72	877,16
328	GUY	9,95	13,69	21,85	59,00	117,70	0,00	465,71	0,97	469,78	-	-
152	CHL	13,15	18,12	28,92	79,00	158,61	1,55	240,26	0,00	237,98	-	-
604	PER	59,69	82,20	131,23	629,00	1 258,12	270,21	987,99	0,00	813,72	-	-
218	ECU	6,44	8,85	14,12	109,00	218,41	50,48	321,76	0,00	260,19	-	-
591	PAN	8,65	11,88	18,97	59,00	117,81	11,58	104,51	0,00	95,21	30,02	172,75
84	BLZ	15,71	21,61	34,50	86,00	172,17	1,60	228,56	0,00	226,57	581,65	949,83
214	DOM	3,05	4,19	6,69	19,00	37,45	1,90	56,36	0,00	53,62	133,71	228,77
858	URY	6,65	9,18	14,65	41,00	81,17	1,78	202,27	0,09	199,17	-	-
254	GUF	10,36	14,26	22,77	60,00	119,71	0,14	88,42	0,00	88,33	-	-
320	GTM	0,07	0,10	0,16	1,00	1,39	0,26	2,53	0,00	2,11	1,89	7,77

(continúa)

(conclusión)

Código país	País	Escenario										
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
188	CRI	1,20	1,66	2,64	10,00	20,35	3,29	27,34	0,00	23,70	9,55	56,15
332	HTI	0,78	1,08	1,72	5,00	9,69	0,53	18,52	0,00	17,55	53,90	154,07
222	SLV	0,16	0,21	0,34	1,00	2,92	0,63	4,59	0,00	3,77	3,33	9,69
630	PRI	3,70	5,09	8,12	23,00	45,23	1,52	83,53	0,00	80,77	206,19	315,66
388	JAM	4,55	6,27	10,00	28,00	55,05	2,77	48,46	0,00	46,14	120,80	181,54
796	TCA	0,28	0,38	0,61	2,00	3,27	0,09	7,87	0,00	7,66	46,79	171,71
780	TTO	0,12	0,16	0,26	1,00	1,62	0,00	1,88	0,00	1,88	1,88	4,96
136	CYM	0,39	0,54	0,86	2,00	4,65	0,23	3,61	0,00	3,45	9,69	17,16
530	ANT	0,11	0,15	0,24	1,00	1,30	0,00	13,03	0,00	13,06	23,95	35,44
28	ATG	0,26	0,35	0,56	2,00	3,05	0,10	4,69	0,00	4,54	13,97	27,24
312	GLP	0,18	0,25	0,40	1,00	2,15	0,06	4,45	0,00	4,34	13,02	24,83
474	MTQ	0,05	0,07	0,11	0,00	0,58	0,01	0,84	0,00	0,83	2,76	6,22
660	AIA	0,80	1,09	1,75	5,00	9,57	0,34	7,04	0,00	6,80	19,02	25,99
92	VGB	0,34	0,47	0,76	2,00	4,15	0,14	5,45	0,00	5,27	16,48	25,66
850	VIR	0,04	0,06	0,10	0,00	0,53	0,02	1,14	0,00	1,11	3,48	6,92
533	ABW	0,07	0,09	0,15	0,00	0,77	0,01	1,07	0,00	1,05	1,97	3,71
662	LCA	0,02	0,03	0,05	0,00	0,27	0,00	0,38	0,00	0,38	1,67	3,34
659	KNA	0,04	0,05	0,08	0,00	0,45	0,01	0,76	0,00	0,73	2,52	4,92
52	BRB	0,00	0,01	0,01	0,00	0,06	0,00	0,09	0,00	0,09	0,28	0,58
308	GRD	0,01	0,01	0,02	0,00	0,08	0,00	0,18	0,00	0,18	0,45	0,85
212	DMA	0,02	0,02	0,04	0,00	0,19	0,00	0,22	0,00	0,21	0,88	1,49
670	VCT	0,01	0,01	0,02	0,00	0,12	0,00	0,20	0,00	0,20	0,52	0,99
500	MSR	0,01	0,01	0,02	0,00	0,12	0,00	0,18	0,00	0,18	0,57	0,82

Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados para los distintos escenarios contemplados, en primer lugar, merece la pena destacar que los escenarios D y E (ascenso del nivel del mar de 0,5 y 1 m, respectivamente) tendrían un impacto notable en comparación con los valores obtenidos a partir de las tendencias estadísticas obtenidas (véase documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”). De obtenerse cambios del orden de las tendencias estadísticas (continuación de los cambios pasados registrados) las medidas de adaptación necesarias serían mucho más leves que en el caso de un ascenso del nivel del mar de 1 m. Es necesario realizar la observación de que los valores para todos los escenarios (excepto el F) resultan de interpolaciones entre las cotas de 1 y 2 m ya que tan solo se cuenta con resolución de 1 m en cota en el modelo digital del terreno. Esta proporción, pese a ser lineal, aporta no obstante una idea de la magnitud del impacto permitiendo la comparación de situaciones.

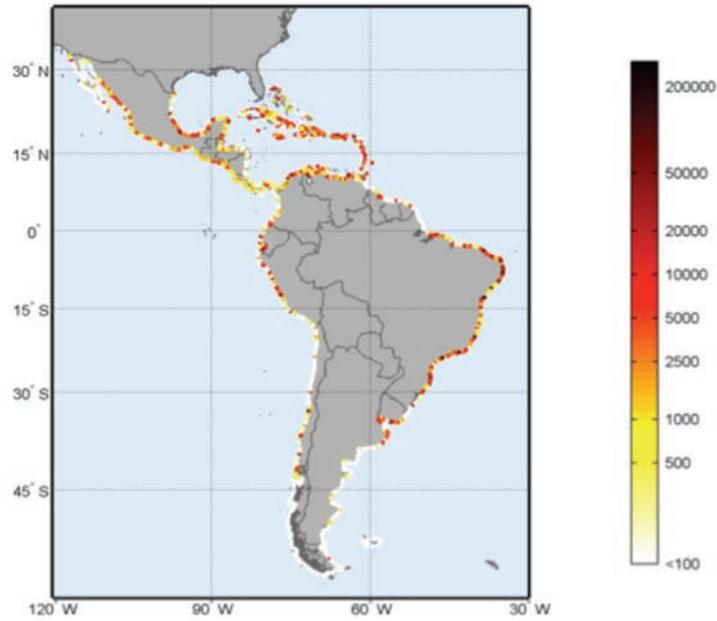
Ante un escenario de 1 m de ascenso y un eventual efecto Niño, se aprecia que los efectos no son proporcionales al daño causado en el primer metro de elevación. En este caso, tanto los valores de superficie como de población se ven aumentados, interviniendo en este caso la distinta distribución por cotas de los países. Este efecto se verá repetido en el análisis de los eventos extremos de inundación costera posteriormente.

Ante la consideración de la sobrelevación histórica de los huracanes junto a un escenario de subida del nivel del mar de 1 m se obtienen diversas conclusiones. En primer lugar, la proporción entre superficie afectada y población no es la misma según el país. Así, Honduras, por ejemplo, multiplicaría prácticamente cuatro veces la superficie de terreno afectada de considerarse huracanes con este nuevo nivel de referencia. Sin embargo, el cambio en población afectada no guarda la misma proporción y se encontraría en el mismo orden de magnitud. Igualmente, México y Cuba, apenas sufrirían cambios en población afectada mientras que los km² se verían multiplicados por 2,5 y 5 aproximadamente en cada caso. No ocurre esto en todos los países pues, por ejemplo en Belice, la población afectada prácticamente se doblaría en el caso de un huracán con las nuevas condiciones de nivel. Igual ocurre con Puerto Rico donde la población afectada se doblaría. Jamaica o Haití son otros ejemplos de esta situación.

Comparando las situaciones de huracanes entre sí, respecto al nivel actual y un posible escenario con 1 m de ascenso del mismo, las superficies prácticamente en todos los casos al menos se doblan. Sin embargo, la proporción en habitantes afectados no es la misma, dependiendo de la distribución poblacional de cada país. Países donde el impacto variaría en gran proporción ante el ascenso del nivel del mar con situación de huracán serían Honduras, Panamá, Belice, Costa Rica y la República Bolivariana de Venezuela, entre otros. Sin embargo, para otros países, como las Islas Caimán, la situación no cambiaría significativamente en cuanto a huracanes y habitantes afectados se refiere.

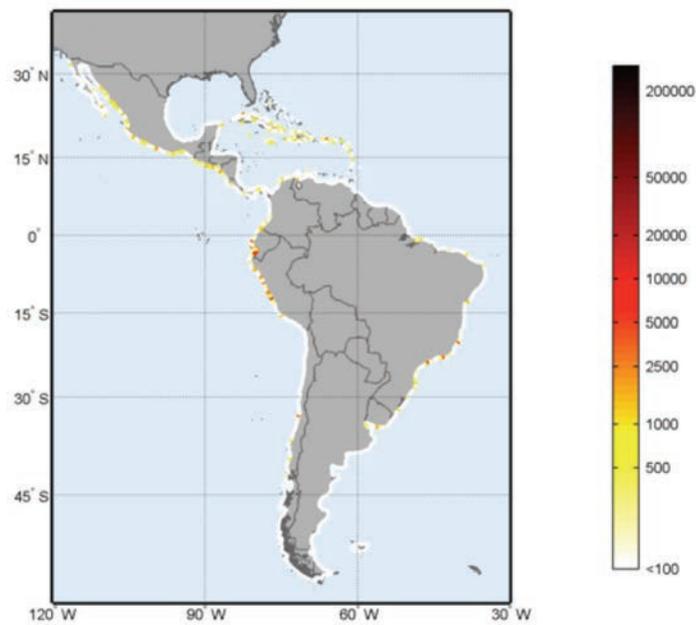
Como se puede apreciar en la figura 3.7 y figura 3.8 la situación de subida del nivel del mar es altamente variable espacialmente. En términos de población afectada, un ascenso de 1 m del nivel del mar impactaría en gran medida en las costas del Brasil, con fuertes impactos en las grandes aglomeraciones urbanas. Otras costas bastante afectadas serían las islas caribeñas, especialmente las más orientales, así como extensas partes de México, especialmente la costa Este, y diversos puntos singulares de Perú y Ecuador, así como las principales aglomeraciones humanas de Chile. Comparando esta situación con la de un eventual ascenso del nivel del mar provocado por un evento Niño de la misma magnitud que el máximo histórico (1998), se puede apreciar que la costa Oeste está claramente más afectada que la Este y que la magnitud del impacto es claramente inferior a una subida del nivel del mar de 1 m, dada la menor magnitud del ascenso del nivel por esta causa. No obstante, merece la pena resaltar el caso del Ecuador y algunos puntos del Perú, donde, sin llegar a los valores del escenario E, sí se vería afectado un gran número de personas ante tal situación.

FIGURA 3.7
POBLACIÓN AFECTADA HASTA LA COTA 1 M EN EL ESCENARIO E
(Número de habitantes)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.8
POBLACIÓN AFECTADA HASTA LA COTA ASOCIADA AL ESCENARIO F1
(NIÑO DE 1998)
(Número de habitantes)



Fuente: Elaboración propia.

También se ha contemplado en el análisis la afección a las infraestructuras (carreteras y ferrocarriles) para cada escenario de estudio. Los resultados se contabilizan en tramos de estudio afectados y corresponden aproximadamente a las unidades de estudio de 5 km cuadros 3.9 y 3.10. Las conclusiones que se pueden extraer de estos resultados son análogas a las obtenidas anteriormente para la superficie y la población. Una situación de ascenso del nivel del mar de 1 m implicaría impactos considerablemente mayores que los esperados de seguir la suave tasa de aumento obtenida por extrapolación de los cambios observados hasta ahora. Respecto a los huracanes, para países como la República Bolivariana de Venezuela, Honduras, Panamá o Costa Rica, la situación ante un ascenso de 1 m cambiaría significativamente, mientras que en otros países la variación del impacto no sería tan considerable respecto al impacto con el nivel actual (véase el caso de República Dominicana).

CUADRO 3.9
RELACIÓN DE TRAMOS DE CARRETERAS AFECTADAS POR PAÍS EN CADA
ESCENARIO CONTEMPLADO
(Tramos afectados de aproximadamente 5 km)

País	Escenario										
	A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
MEX	25	35	55	171	341	30	350	1	344	322	419
BRA	16	22	36	94	187	3	188	0	187	-	-
CUB	5	7	11	32	64	2	64	0	64	77	101
BHS	9	13	20	55	109	1	109	0	109	143	174
ARG	5	7	10	28	56	0	56	0	56	-	-
VEN	5	7	11	29	58	0	59	0	59	14	81
PER	5	7	11	38	76	11	77	0	76	-	-
COL	8	11	18	49	97	2	96	0	96	81	109
CHL	2	3	5	15	30	0	30	0	30	-	-
HND	3	4	6	18	35	1	35	0	35	37	50
DOM	1	2	3	9	18	1	18	0	18	20	22
ECU	0	1	1	6	12	2	13	0	11	-	-
CRI	1	2	3	14	28	5	26	0	26	2	29
HTI	2	3	4	12	24	1	24	0	24	32	35
JAM	2	3	5	15	30	2	30	0	30	36	44
PRI	2	2	4	10	20	1	20	0	20	31	38
PAN	1	1	2	7	13	2	15	0	15	6	16
NIC	1	1	2	6	12	1	13	0	12	13	20
URY	2	3	4	12	23	0	23	0	23	-	-
SUR	0	0	0	1	1	0	2	0	2	-	-
GUY	1	2	3	8	15	0	14	0	14	-	-
GTM	1	1	2	6	12	3	14	0	14	8	15
SLV	0	0	0	3	6	1	4	0	4	4	4
GUF	0	0	1	2	3	0	3	0	3	-	-
TTO	0	0	1	2	4	0	4	0	4	1	5
GLP	1	2	2	7	13	0	13	0	13	16	17
ANT	0	0	0	1	1	0	1	0	1	7	9
VIR	1	1	2	6	11	0	11	0	11	11	11

(continúa)

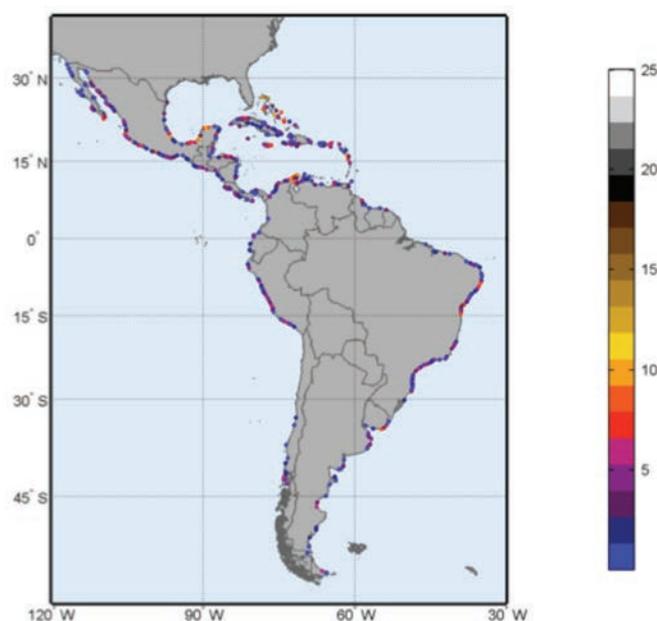
(conclusión)

País	Escenario										
	A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
BLZ	1	1	1	4	7	0	7	0	7	7	12
CYM	0	0	1	2	3	0	3	0	3	3	3
MTQ	0	1	1	3	5	0	5	0	5	5	5
ATG	0	0	0	1	2	0	2	0	2	3	5
LCA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
DMA	1	1	2	5	9	0	9	0	9	9	9
VGB	0	1	1	3	6	0	6	0	6	6	6
TCA	0	0	1	2	4	0	4	0	4	4	5
AIA	0	1	1	3	5	0	5	0	5	6	6
ABW	0	0	0	1	1	0	1	0	1	3	3
KNA	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
GRD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BRB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MSR	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.9 muestra la distribución espacial de los tramos de carretera afectados hasta la cota de 1 m. Como se puede apreciar, los impactos se concentrarían en ciertas partes de las costas de Brasil, México y República Bolivariana de Venezuela, así como en algunas de las islas caribeñas.

FIGURA 3.9
CARRETERAS AFECTADAS EN EL ESCENARIO E POR SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR
HASTA LA COTA 1 M
(Número de tramos)



Fuente: Elaboración propia.

Como ya se vio en el documento 2 “Vulnerabilidad”, los tramos de ferrocarril afectados son menos que en el caso de las carreteras, aunque presentan una importancia relativa mayor desde el punto de vista de infraestructuras ya que la incidencia sobre la red de transportes sería esperable que fuera mayor. No obstante, tan solo en los casos de Cuba, México y Brasil, y Puerto Rico frente a los escenarios de huracanes en concreto, los resultados son reseñables, en comparación con el resto de variables.

CUADRO 3.10
RELACIÓN DE TRAMOS DE FERROCARRIL AFECTADOS POR PAÍS
EN CADA ESCENARIO CONTEMPLADO
(Tramos afectados de aproximadamente 5 km)

País	Escenario										
	A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
CUB	2	3	5	15	30	1	30	0	30	32	43
MEX	2	2	4	11	22	2	23	0	22	19	30
BRA	2	2	4	11	21	0	21	0	21	-	-
ARG	0	0	1	2	3	0	3	0	3	-	-
PRI	1	1	2	5	9	0	9	0	9	19	25
CRI	0	0	1	2	4	1	4	0	4	2	8
GUY	0	0	1	2	4	0	4	0	4	-	-
HND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DOM	0	0	0	1	2	0	2	0	2	3	3

(continúa)

(conclusión)

País	Escenario										
	A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	H1	H2
URY	0	0	1	2	3	0	3	0	3	-	-
HTI	0	0	1	2	4	0	4	0	4	4	5
CHL	0	1	1	3	6	0	6	0	6	-	-
VEN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JAM	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
PER	0	0	0	2	3	0	3	0	3	-	-
COL	0	1	1	3	6	0	6	0	6	5	6
TTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
GTM	0	0	0	2	3	1	3	0	3	2	3
LCA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MTQ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
VIR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TCA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KNA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MSR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GLP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GRD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GUF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
SLV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
DMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CYM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VGB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BLZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BRB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BHS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.4 Inundación en los deltas más importantes de la región

De manera semejante a como se ha procedido para el análisis de la vulnerabilidad por países y el de la distribución espacial, los resultados en los polígonos de estudio (5 km) pueden agregarse para otras zonas geográficas de interés. Este es el caso de los deltas que se caracterizan por ser zonas bajas, con subsidencia adicional al efecto del ascenso del nivel del mar y con una gran importancia ecológica y/o económica. El estudio de los deltas requiere de información particularizada y local de cada uno de ellos, así como de un estudio específico de cada uno; los datos aquí recogidos de los mayores deltas pueden ser orientativos. Los deltas contemplados en este análisis han sido: río San Francisco, Río de la Plata, Orinoco, Magdalena, Grijalva, Atrato y Amazonas.

La subida del nivel del mar puede afectar con mayor severidad a las zonas de desembocadura de los grandes ríos de ALyC, ya que los deltas son formaciones de escasa elevación con una predominancia de zonas llanas. Para cuantificar este efecto, se han estudiado el área inundada y población afectada como consecuencia de una subida del nivel del mar hasta la cota 1 m, que corresponde al escenario E, y hasta la cota 2 m, que constituye un valor del lado de la seguridad en caso de subsidencias adicionales.

La forma de cálculo ha sido explicada en documentos anteriores, de forma que para cada uno de los deltas, se ha obtenido la extensión de la zona inundada en ambas situaciones de nivel de inundación y la población que se vería afectada. El cuadro 3.11 recoge los valores obtenidos para cada uno de los deltas analizados.

CUADRO 3.11
ÁREA Y POBLACIÓN EN LOS DELTAS MÁS IMPORTANTES DE ALyC
HASTA LAS COTAS 1 Y 2 M

Deltas	Entre las cotas 0 y 1 m		Entre las cotas 0 y 2 m	
	Área inundada (Has.)	Población afectada (habs.)	Área inundada (Has.)	Población afectada (habs.)
San Francisco	3 403,62	60 516	12 005,84	108 279
Río de la Plata	79 824,22	103 180	130 481,38	148 472
Orinoco	3 454,77	339	6 373,20	365
Magdalena	16 901,40	103 962	36 292,86	128 334
Grijalva	28 928,93	27 490	6 5401,78	37 897
Atrato	5 588,19	6 894	17 761,60	8 131
Amazonas	7 353,99	103 482	14 382,73	103 668

Fuente: Elaboración propia.

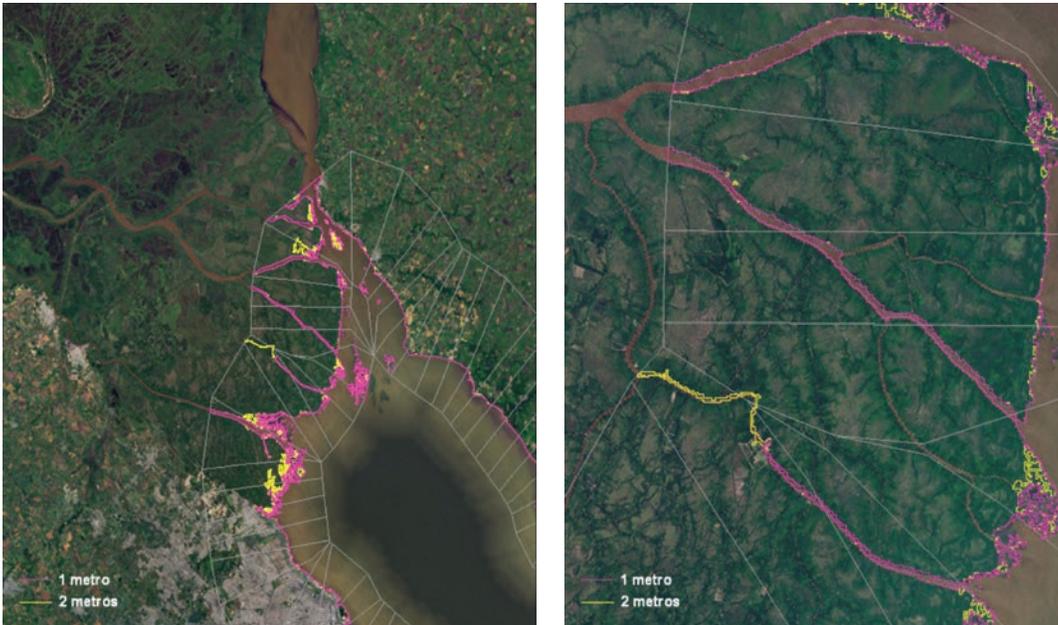
Las siguientes figuras muestran las isolíneas de nivel para las cotas 1 y 2 metros en los deltas estudiados, que representan el alcance de las situaciones de inundación. Los deltas del Río de la Plata y río Magdalena se verían los más afectados en términos de población por una subida de 1 m del nivel del mar, mientras que el primero destaca por tener la mayor superficie de terreno comprometida.

FIGURA 3.10
ISOLÍNEAS DE NIVEL PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA
DEL RÍO SAN FRANCISCO



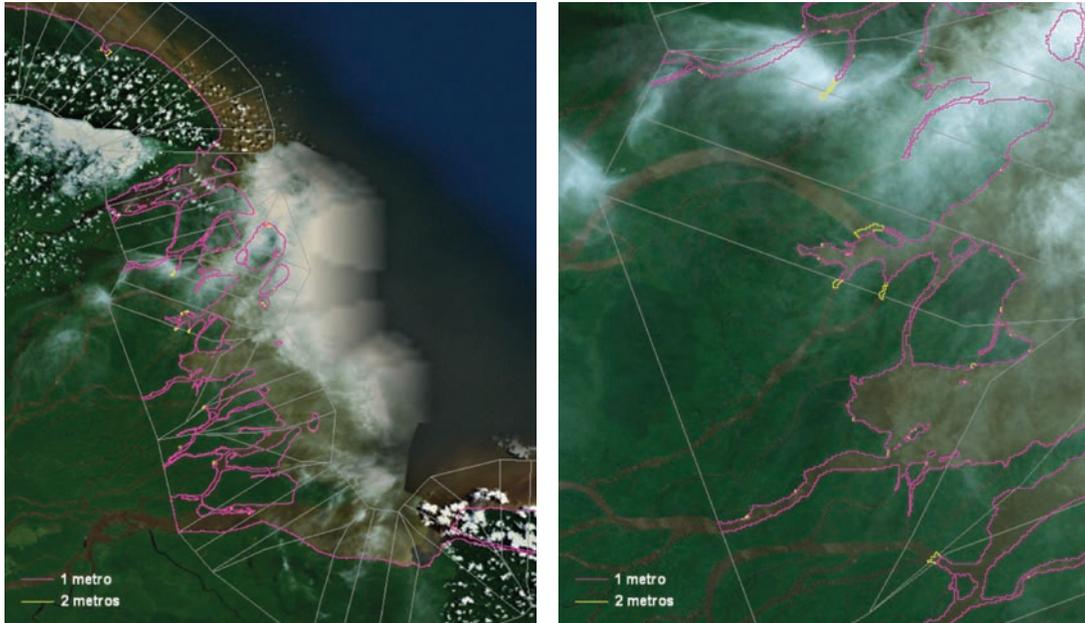
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.11
ISOLÍNEAS DE NIVEL PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA
DEL RÍO DE LA PLATA



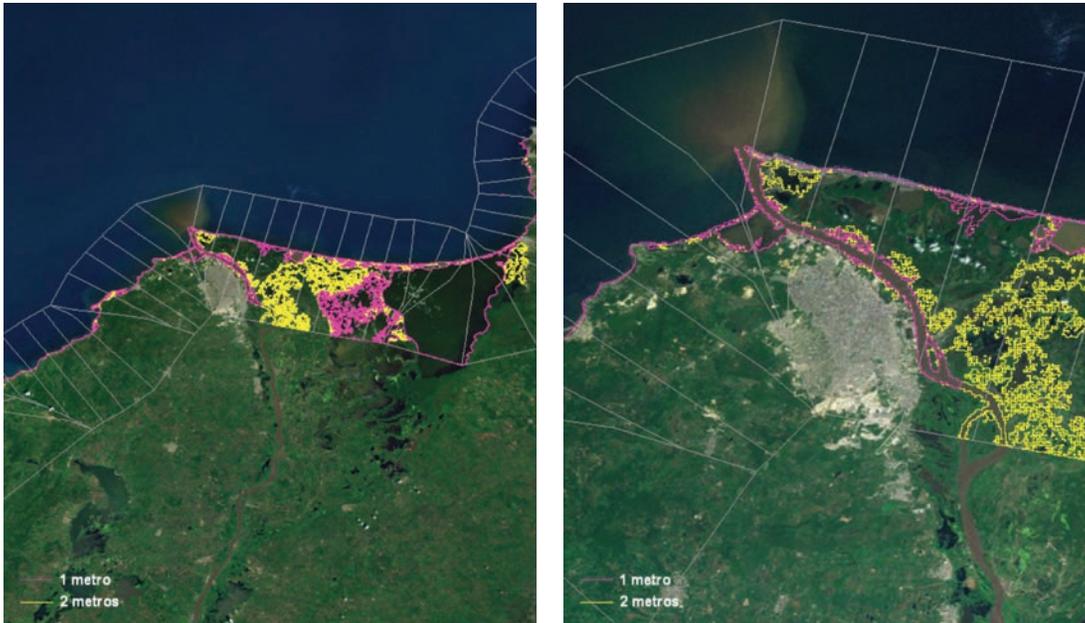
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.12
ISOLÍNEAS DE NIVEL PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA
DEL RÍO ORINOCO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.13
ISOLÍNEAS DE NIVEL PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA
DEL RÍO MAGDALENA



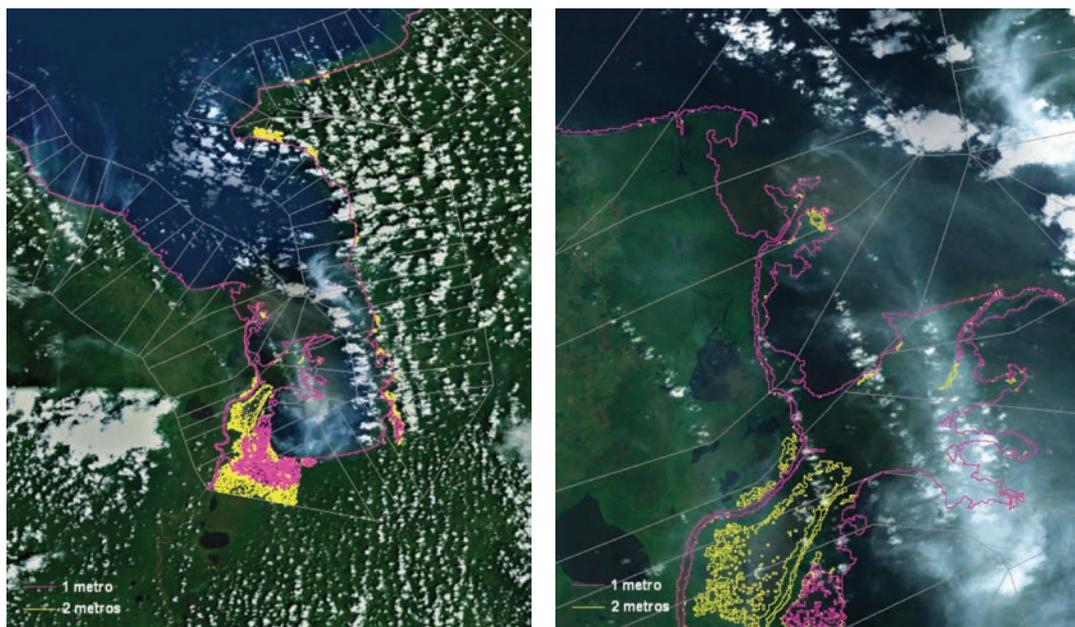
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.14
ISOLÍNEAS PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA DEL RÍO GRIJALVA



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.15
ISOLÍNEAS PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA DEL RÍO ATRATO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.16
ISOLÍNEAS DE NIVEL PARA LAS COTAS 1 Y 2 M EN EL DELTA DEL RÍO AMAZONAS



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Determinación del nivel del mar total o cota de inundación

La inundación permanente en la costa se analiza teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Subida del nivel medio del mar (*Sea Level Rise, SLR*): determina el nivel de referencia, o nivel medio, sobre el cual actúan el resto de dinámicas.
- Marea astronómica (MA): es una variable determinista que oscila en la escala temporal de horas, sobre el nivel medio del mar.
- Marea meteorológica (MM): es una componente de sobrelevación o descenso del nivel del mar debido al efecto del viento y/o presión barométrica.
- *Set-up* del oleaje (*set-up*): esta componente sobreleva el nivel en la línea de costa debido a la energía del oleaje liberada en la rotura del mismo. A partir de las condiciones de oleaje *offshore*, se puede determinar el *set-up* en la línea de costa a partir de la formulación de Guza y Thornton (1981), como:

$$\eta = 0,17 H_0 \quad (3.2)$$

donde H_0 es la altura de ola en rotura.

- *Run-up* del oleaje ($Ru_{2\%}$): determina el ascenso de la lámina de agua sobre el talud de playa provocado por el oleaje. No es en sí una sobrelevación del nivel, pero afecta a la cota a la que llega el agua en casos de playas.

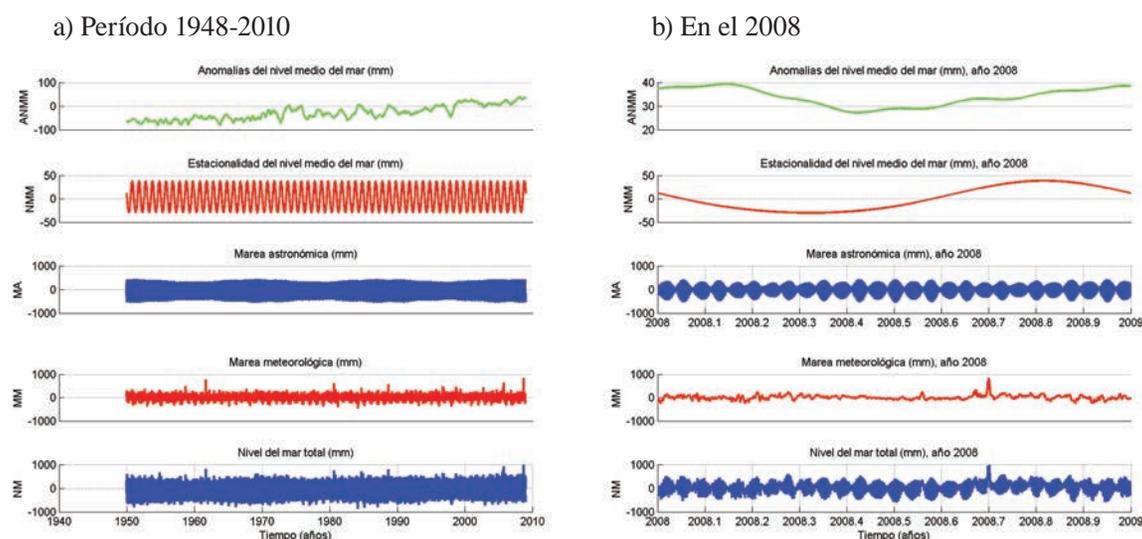
El *Run-up*, a falta de datos más específicos podrá adoptarse como cota máxima alcanzada por el oleaje en una playa, será el ascenso del 2% debido al oleaje (*Run-up* del 2%) obtenido a partir de las formulaciones empíricas de Nielsen y Hanslow (1991) descrito en el documento auxiliar de efectos teóricos.

La forma de recoger la variación del nivel del mar es la combinación de estos factores en una variable agregada de nivel del mar, de forma que, si en la costa no hay playa será:

$$NM = NMM + MA + MM + Set-up \tag{3.3}$$

La cota de inundación forma una serie temporal que puede ser analizada con la metodología de riesgo planteada en el estudio, con algunas peculiaridades. Primero, la marea astronómica es una variable determinista y, por tanto, no debe ser agregada en el cálculo de la incertidumbre. Además, las tendencias, se evalúan tan sólo en el NMM (SLR), de forma que sobre esta tendencia se evalúa la incertidumbre del residuo formado por la marea meteorológica, nivel medio y *set-up*. En la figura siguiente se presenta un ejemplo de las series de cada componente y la serie de cota de inundación calculada hasta el 2008.

FIGURA 3.17
SERIES TEMPORALES EN EL PERÍODO 1948-2010 Y EN EL 2008 PARA LOS COMPONENTES DE LA COTA DE INUNDACION



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Cota de inundación (eventos de inundación temporales)

Este impacto es análogo al caso de nivel medio con la salvedad que se refiere a eventos extremos de inundación, de forma que se analiza por medio de un régimen extremal de la variable cota inundación calculada como:

a) Si la costa en la unidad de estudio presenta playa:

$$CI = NMM + MA + MM + Run-up \tag{3.4}$$

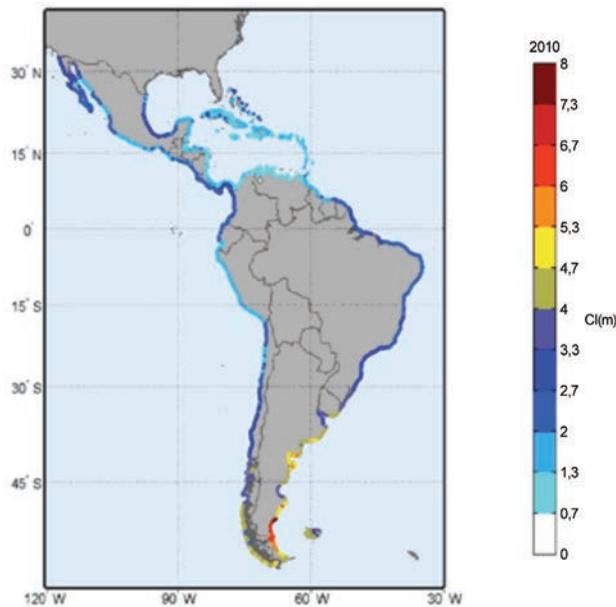
b) Si la costa en la unidad de estudio no presenta playa:

$$CI = NMM + MA + MM + Set-up \tag{3.5}$$

Esta variable se analiza con un método específico para extremos, de manera que se aislan las cotas de inundación más extremas para analizar la frecuencia y la intensidad de los eventos extremos de inundación provocados por tormentas (*storm surges*) en las costas de ALyC.

En la figura 3.18 se muestra la cota de inundación de 50 años de período de retorno (que tiene una probabilidad anual de superación de 0,02) a lo largo de la costa de ALyC. Como se vio en el documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad costera”, la cota de inundación, influenciada por las distintas componentes del nivel del mar, presenta una marcada variabilidad espacial. Los mayores valores se obtienen en el sur del continente, en las costas de Chile, Argentina y Uruguay, con valores por encima de los 4 m. En el mar Caribe, en general los valores de la cota de inundación rondarían el metro de elevación, mientras que en las costas de Brasil y la costa Pacífica se obtienen valores en torno a 3 m aproximadamente.

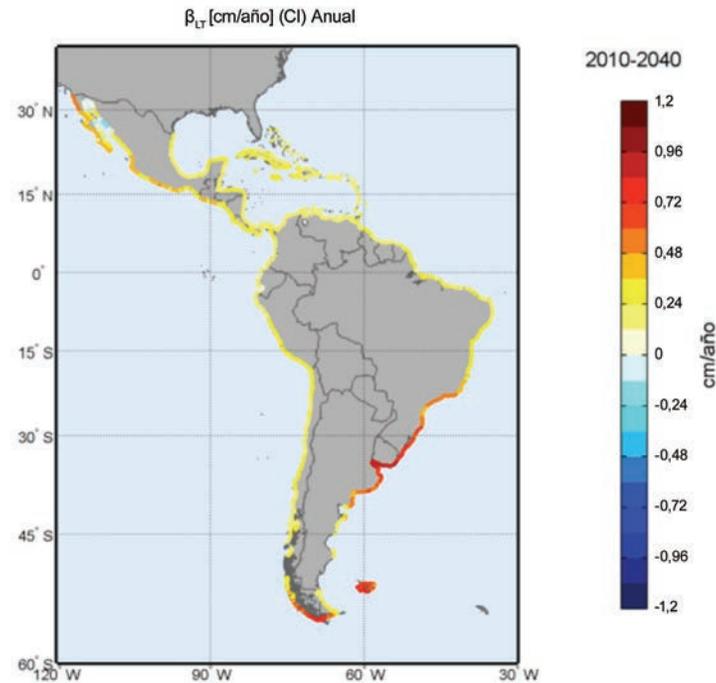
FIGURA 3.18
COTA DE INUNDACIÓN DE PERÍODO DE RETORNO 50 AÑOS EN 2010
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.19 refleja la tasa de cambio detectada en los eventos extremos de la cota de inundación. Las partes con mayor cambio (hasta 1 cm/año) son las regiones alrededor del Río de la Plata, precisamente la zona geográfica con mayores valores de cota de inundación. En el resto de la región las tendencias obtenidas no superan en general 0,5 cm/año.

FIGURA 3.19
TENDENCIA DE LARGO PLAZO DE LOS EXTREMOS DE LA COTA DE INUNDACIÓN
(Centímetros/año)

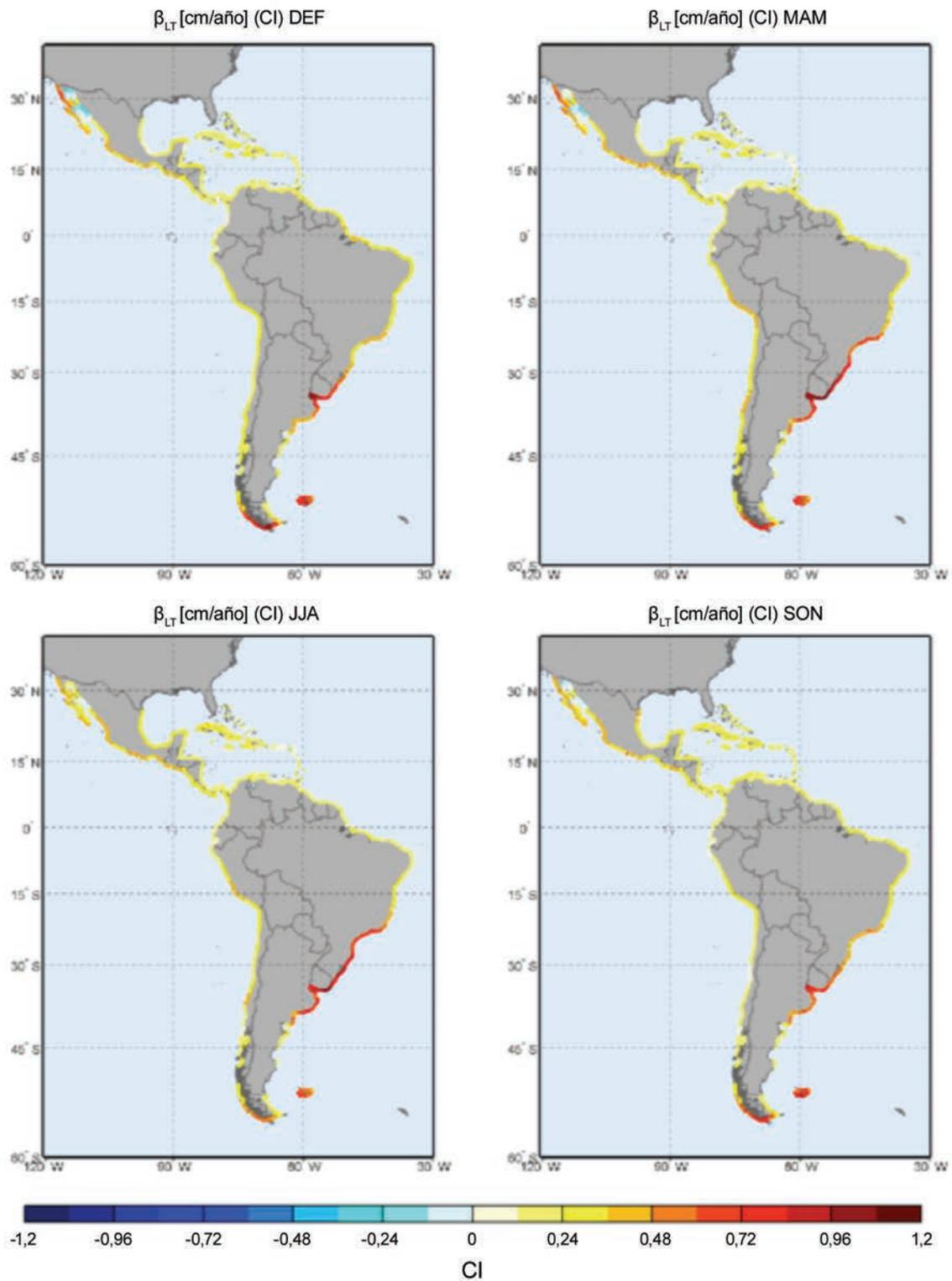


Fuente: Elaboración propia.

Nota: En negro se representan los puntos donde la tendencia no es significativa estadísticamente.

En la figura 3.20 se muestra la misma tendencia obtenida por estaciones, reforzándose los valores más altos en los meses de invierno y primavera en el Río de la Plata y en el golfo de California. En la costa sur de Brasil, se observa una tendencia en las estaciones de primavera y verano que se debilita el resto del año. Esta variabilidad estacional resulta importante debido a que lo que provoca es un aumento del rango de variación entre los meses del año, es decir, las condiciones en parte del año no aumentarán mientras que en ciertas estaciones los extremos sí lo harán. En otros lugares, sin embargo, este cambio es sostenido a lo largo de todo el año. No obstante, en el Río de la Plata, la variación estacional no es muy marcada y se puede considerar que la tendencia será prácticamente homogénea en todos los meses.

FIGURA 3.20
TENDENCIA DE LARGO PLAZO DE LA COTA DE INUNDACIÓN POR ESTACIONES
(Centímetros/año)

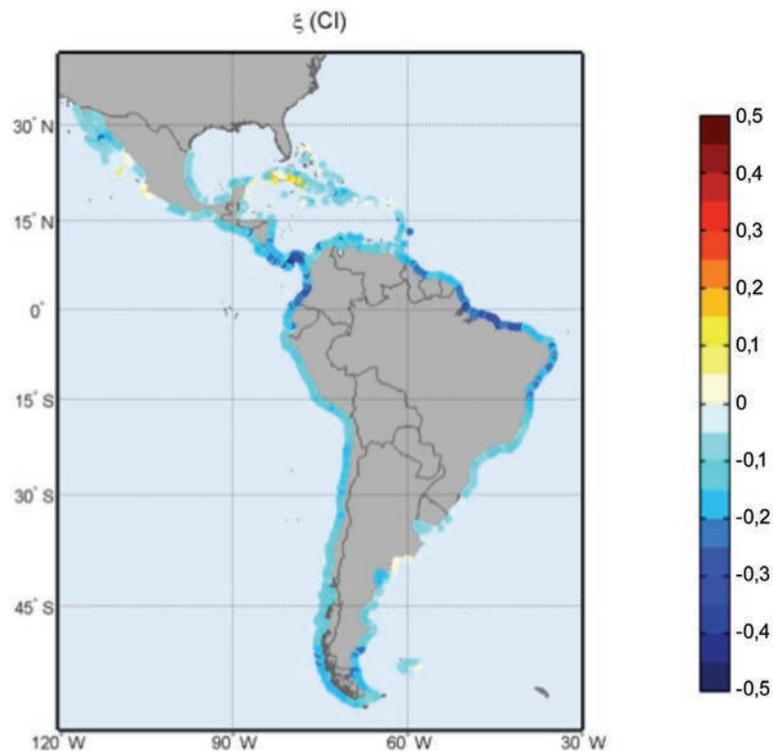


Fuente: Elaboración propia.

Nota: En negro se representa los puntos donde la tendencia no es significativa estadísticamente.

En la figura 3.21 se muestra el parámetro de forma obtenido para el análisis de extremos de cota de inundación. Se obtiene un valor negativo en gran parte de la costa de ALyC, salvo en el sur de Cuba y en algunos puntos de Baja California, donde es positiva y prácticamente nula, respectivamente. Esto indica que en la mayoría de las costas de la región la distribución de los extremos de inundación está acotada, ya que como se puede apreciar en la figura 3.22 correspondería a una distribución de extremos de tipo Weibull.

FIGURA 3.21
PARÁMETRO DE FORMA DE FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GENERALIZADA DE EXTREMOS PARA LA COTA DE INUNDACIÓN

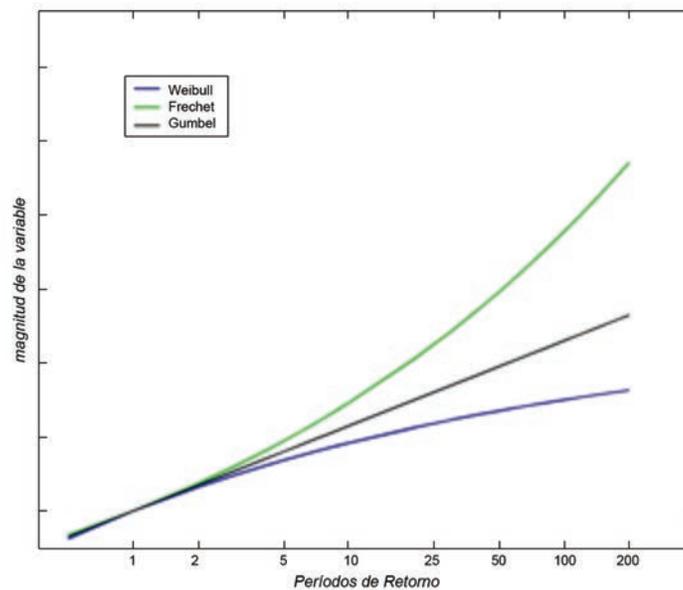


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se refiere a un parámetro adimensional, como se indica a continuación en la figura 3.22.

Como se puede ver en la figura 3.22 y en las siguientes, se observa que las tendencias de la CI han aumentando en los últimos 61 años debido al aumento experimentado en las condiciones de oleaje, nivel medio del mar y la componente meteorológica del nivel del mar (véanse documentos anteriores para una descripción de los cambios en los agentes).

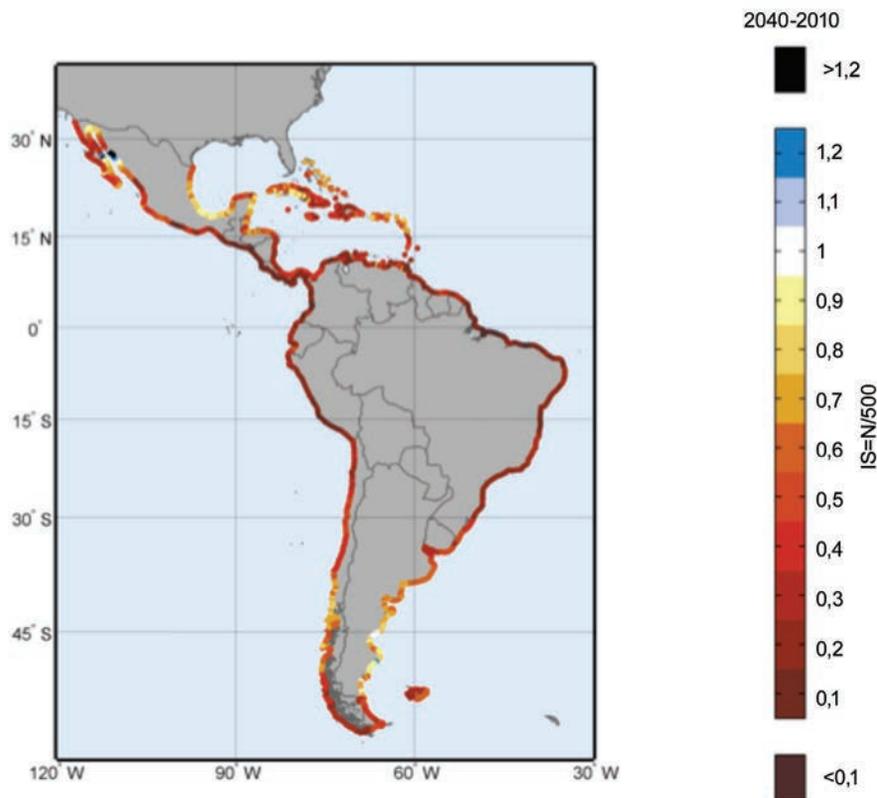
FIGURA 3.22
FORMA DE DISTRIBUCIÓN DE EXTREMOS (GEV)
SEGÚN EL PARÁMETRO DE FORMA



Fuente: Elaboración propia.

Por analogía a la práctica habitual en ingeniería para diseño de obras, se ha analizado la recurrencia de los valores extremos asociado a un determinado período de retorno (recurrencia media del evento con una cierta intensidad), en este caso 500 años, y se ha construido el índice que relaciona el período de retorno en el futuro respecto al actual (500) para dos años horizonte: 2040 –figura 3.23 y 2070 –figura 3.24-. En todos los casos se produce una disminución del índice, lo que implica una mayor frecuencia de los eventos extremos de inundación. Al contrario de lo que ocurre con los extremos de oleaje que no aumentan en toda la región, en este caso debido a la acción conjunta de las distintas componentes del nivel del mar se produce un aumento generalizado del nivel de inundación en las costas de la región. Así, puntos con recurrencia de 50 años (dentro del período de simulación del estudio) se reducirían a menos de 10 años en muchos de los casos –cuadro 3.12–.

FIGURA 3.23
ÍNDICE DE SEGURIDAD PARA LA COTA DE INUNDACIÓN CON UNA RECURRENCIA
DE 500 AÑOS EN EL HORIZONTE DE 2040. ESCENARIO A

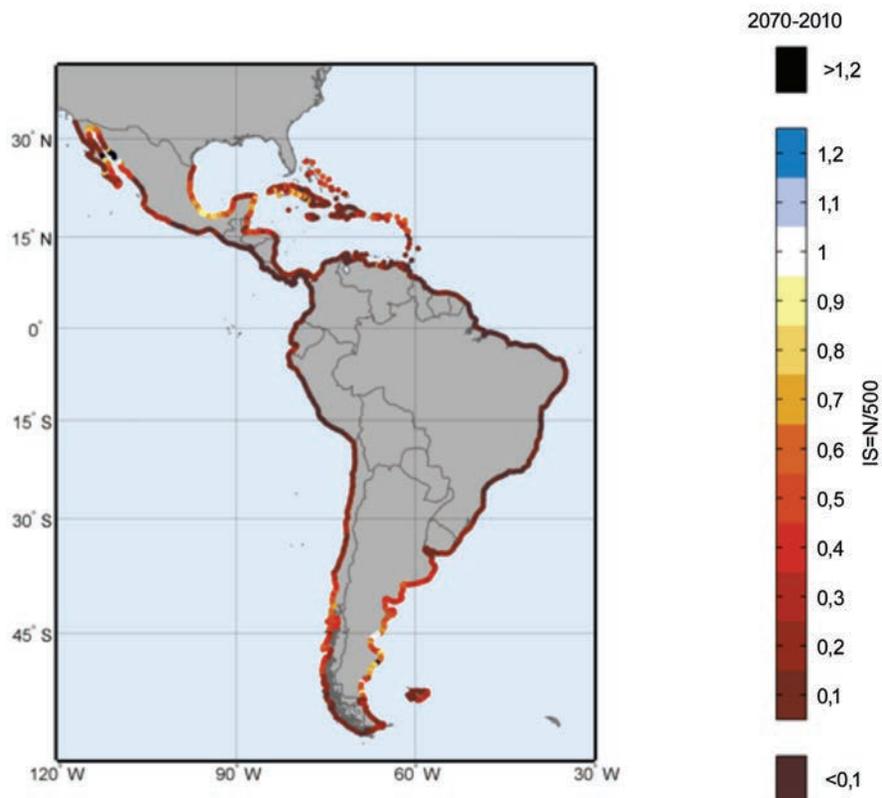


Fuente: Elaboración propia.

Al contrario de lo que ocurre con el ascenso del nivel del mar (SLR), este tipo de inundación costera no tiene un “desarrollo” lento e inapreciable, sino que cambios lentos pero sostenidos sobre el conjunto de las dinámicas hacen que la probabilidad de ocurrencia aumente en situaciones de temporales o tormentas. Por ello, en este caso el efecto no es diferido en el tiempo y las medidas a adoptar son de otro tipo a las asociadas a tendencias de largo plazo y de evolución suave. Los efectos esperables se pueden dar en unas décadas por eventos de duración desde las horas a los días, de mayor intensidad que los actuales, convirtiendo a los eventos extremos actuales en eventos que se producirán con una mayor frecuencia.

Por todo ello, se ha analizado la influencia sobre la población, superficie de terreno y cultivos afectados en cada país en las situaciones de eventos de inundación (con la estadística actual) en las distintas situaciones de variaciones de nivel del mar contemplados en los escenarios de estudio. Los eventos de inundación que se analizan son los de recurrencia 50 y 500 años, debido a que, el primero representa un nivel ya recogido en la historia de eventos simulada y, el segundo, es una recurrencia típica en el diseño de obras marítimas.

FIGURA 3.24
ÍNDICE DE SEGURIDAD PARA LA COTA DE INUNDACIÓN CON UNA RECURRENCIA
MEDIA DE 500 AÑOS EN EL HORIZONTE DE 2070. ESCENARIO C



Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 3.12 recoge los cambios esperados en estos dos períodos de retorno en los años 2040 y 2070. En ambos casos, tanto para el caso de recurrencia cubierta por el período de simulación (Tr de 50 años) como para el caso de extrapolación estadística de extremos, los eventos de inundación se hacen más frecuentes. En algunos lugares, el aumento de la frecuencia va a ser considerablemente mayor que en otros, aunque en la mayoría de los puntos mostrados la recurrencia en el 2070 estará por debajo de los 10 años, lo cual indica que los valores más extremos registrados en las últimas seis décadas, dentro de 60 años se verán, de media, cada década (al menos) en muchos puntos de la región.

CUADRO 3.12
CAMBIOS EN LOS PERIODOS DE RETORNO DE LA COTA DE INUNDACIÓN (SERIES DE INUNDACIÓN COSTERA) EN DIVERSAS LOCALIZACIONES DE ALYC

Unidad de estudio	Período de retorno de 50 y 500 años							
	Longitud	Latitud	2010	2040	2070	2010	2040	2070
Río de Janeiro (BRA)	-43,23	-22,99	50	12,22	3,89	500	83,11	18,78
Santos (BRA)	-46,24	-23,93	50	11,99	3,76	500	81,91	18,22
Montevideo (URY)	-56,00	-34,86	50	24,07	11,71	500	237,64	112,97
Concepción (CHL)	-73,09	-36,83	50	23,89	11,98	500	204,55	88,57
Valparaíso (CHL)	-71,63	-32,96	50	23,12	11,24	500	180,93	71,05
Arica (CHL)	-70,45	-18,38	50	17,52	6,92	500	131,65	40,70
Chorrillos (PER)	-77,04	-12,09	50	7,73	2,27	500	34,56	6,08
Talara (PER)	-81,26	-4,63	50	16,93	6,75	500	111,02	32,04
Machala (ECU)	-80,28	-3,40	50	29,82	18,04	500	269,96	148,40
La Libertad (ECU)	-80,78	-2,36	50	15,52	5,96	500	98,68	26,76
Bahía Solano (COL)	-77,38	6,05	50	12,39	4,32	500	65,01	14,90
Los Santos (PAN)	-80,26	7,34	50	13,91	5,01	500	78,61	19,13
S. José (CRI)	-83,97	9,29	50	7,90	2,29	500	34,88	6,02
Managua (NIC)	-86,57	11,88	50	9,53	2,70	500	59,18	10,87
Acapulco (MEX)	-99,73	16,78	50	9,45	2,42	500	67,11	11,74
Ensenada (MEX)	-116,69	31,74	50	19,94	8,48	500	174,72	64,82
Cabo (MEX)	-109,85	22,98	50	30,18	17,81	500	333,41	218,64
Veracruz (MEX)	-96,02	19,05	50	45,25	40,89	500	448,38	401,60
Cancún (MEX)	-86,85	21,04	50	42,34	35,76	500	436,97	381,22
P. Plata (DOM)	-70,66	19,70	50	13,00	4,49	500	79,18	18,87
Bridgetown (BRB)	-59,56	13,20	50	19,30	8,54	500	131,26	43,48
Caracas (VEN)	-67,02	10,59	50	18,98	8,14	500	140,19	46,79
Georgetown (GUY)	-57,95	6,70	50	12,10	4,08	500	68,64	15,49
Fortaleza (BRA)	-38,49	-3,81	50	11,25	3,59	500	65,50	13,94
Maceio (BRA)	-35,60	-9,52	50	16,83	6,81	500	104,76	30,40
P. Segura (BRA)	-39,00	-16,28	50	11,68	3,74	500	70,05	15,19
P. Sta Cruz (ARG)	-68,26	-50,14	50	40,65	32,27	500	364,75	247,99
I. Taggart (CHL)	-75,58	-49,45	50	32,61	21,94	500	269,10	153,42

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 3.13 muestra la superficie afectada para cada cota de inundación asociada a los distintos escenarios contemplados. Los valores mostrados se refieren al aumento diferencial respecto a la situación actual, es decir, muestran el impacto asociado a una inundación de 50 años de recurrencia media en el futuro menos la actual. En comparación con los resultados obtenidos para el ascenso del nivel del mar (el orden de estas tablas corresponde al mismo que para las de inundación por subida del nivel del mar), los resultados son de al menos, un orden de magnitud más (aproximadamente 3.500 km² para México en el escenario E del cuadro 3.8 frente a más de 15.000 en este; en ambos el país con más superficie comprometida).

En el caso de la cota de inundación el evento Niño no tiene tanta importancia relativa como ocurría con el nivel del mar ya que tan solo contribuye en una pequeña parte respecto al efecto combinado del resto de factores. Por ello, los resultados de los escenarios F son similares al resto.

CUADRO 3.13
AUMENTO DE SUPERFICIE AFECTADA PARA CADA ESCENARIO DE COTA DE
INUNDACIÓN, PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS CON RESPECTO A 2010
(Kilómetros cuadrados)

Código país	País	Escenario									Año de referencia 2010
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	
484	MEX	411	564	899	2 677	5 579	355	5 987	29	5 610	11 867
76	BRA	421	582	944	2 630	6 341	97	6 519	0	6 341	6 663
192	CUB	99	137	222	664	1 470	51	1 544	0	1 470	1 206
32	ARG	133	185	298	821	1 570	20	1 590	1	1 571	7 382
44	BHS	54	75	119	519	1 190	10	1 218	0	1 190	1 294
170	COL	42	57	92	263	755	21	861	0	755	644
862	VEN	31	42	67	180	379	2	381	0	379	475
340	HND	17	29	54	170	471	6	496	0	471	237
740	SUR	83	114	186	518	1 017	0	1 017	6	1 022	842
558	NIC	26	36	57	151	466	3	476	0	466	418
328	GUY	89	122	195	522	1 016	0	1 016	9	1 024	974
152	CHL	45	62	98	267	537	6	544	0	537	1 300
604	PER	18	25	39	181	362	73	447	0	362	1 597
218	ECU	10	14	22	157	322	75	401	0	322	442
591	PAN	16	21	34	127	263	22	287	0	263	288
84	BLZ	23	30	46	118	242	2	244	0	242	357
214	DOM	6	9	14	40	86	4	91	0	86	93
858	URY	12	17	27	79	165	4	169	0	165	791
254	GUF	6	8	13	34	75	0	76	0	75	200
320	GTM	1	1	1	5	16	2	24	0	16	6
188	CRI	2	3	4	16	40	5	47	0	40	51
332	HTI	2	3	4	18	59	1	64	0	59	24
222	SLV	1	1	1	5	12	2	17	0	12	10
630	PRI	7	10	17	48	102	3	106	0	102	159
388	JAM	3	4	7	20	45	2	48	0	45	76
796	TCA	8	10	17	46	129	2	134	0	129	55
780	TTO	0	0	0	2	20	0	20	0	20	3
136	CYM	0	0	0	2	5	0	5	0	5	6
530	ANT	2	3	5	12	19	0	19	0	19	11
28	ATG	1	1	1	4	10	0	11	0	10	11
312	GLP	1	1	2	4	8	0	9	0	8	9
474	MTQ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
660	AIA	1	1	1	4	8	0	8	0	8	16

(continúa)

(conclusión)

Código país	País	Escenario									Año de referencia 2010
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	
92	VGB	1	1	2	4	9	0	9	0	9	13
850	VIR	0	0	0	1	2	0	2	0	2	2
533	ABW	0	0	0	1	2	0	2	0	2	1
662	LCA	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
659	KNA	0	0	0	1	2	0	2	0	2	1
52	BRB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
308	GRD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
212	DMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
670	VCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	MSR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

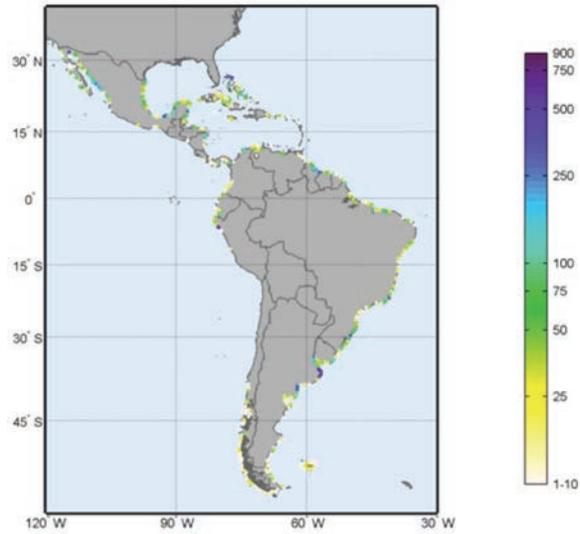
La figura 3.25 muestra la superficie afectada por una inundación de período de retorno 50 años en la actualidad. Los valores por debajo de 5 km² no han sido considerados en la representación. Como se puede observar, la costa Este está mucho más impactada que la Oeste por este tipo de fenómenos costeros. El sur de Chile, pese a estar sometido a valores altos de cota de inundación, debido a la configuración de la costa, elevada y poco expuesta, no se encuentra prácticamente impactado.

La figura 3.26 muestra los resultados de la superficie afectada respecto a la actualidad en los escenarios C (2040) y E (subida de 1 m del nivel del mar) manteniendo la estadística de extremos de inundación. Una vez más, las consecuencias merecen la pena ser tenidas en cuenta en la situación de una subida del nivel del mar de 1 m, mientras que con los cambios observados el impacto previsible es diferencial respecto a la actualidad.

Los focos de impacto son los mismos en ambos casos puesto que para un escenario de subida del nivel del mar de 1 m se acentúa la afección en las zonas más bajas ya afectadas por ascensos más leves (aproximadamente 30 cm). Adicionalmente, en el escenario de 1 m se aprecia zonas afectadas en la costa oeste, Centroamérica y más intensidad en la costa oriental de la región. Principalmente, las zonas más afectadas en cualquier caso en superficie también coinciden con zonas de grandes urbes y especialmente en los países isleños.

Comparando los resultados para los dos periodos de retorno se puede concluir que son sensiblemente parecidos. Esto es debido a que la distribución de extremos de inundación está acotada para valores muy extremos lo cual hace que la intensidad entre los dos periodos de retorno no sea muy elevada. En esta situación un aumento del nivel del mar tiene más importancia relativa sobre la inundación temporal puesto que permite que más zonas estén expuestas ante los eventos de inundación extremos y esporádicos.

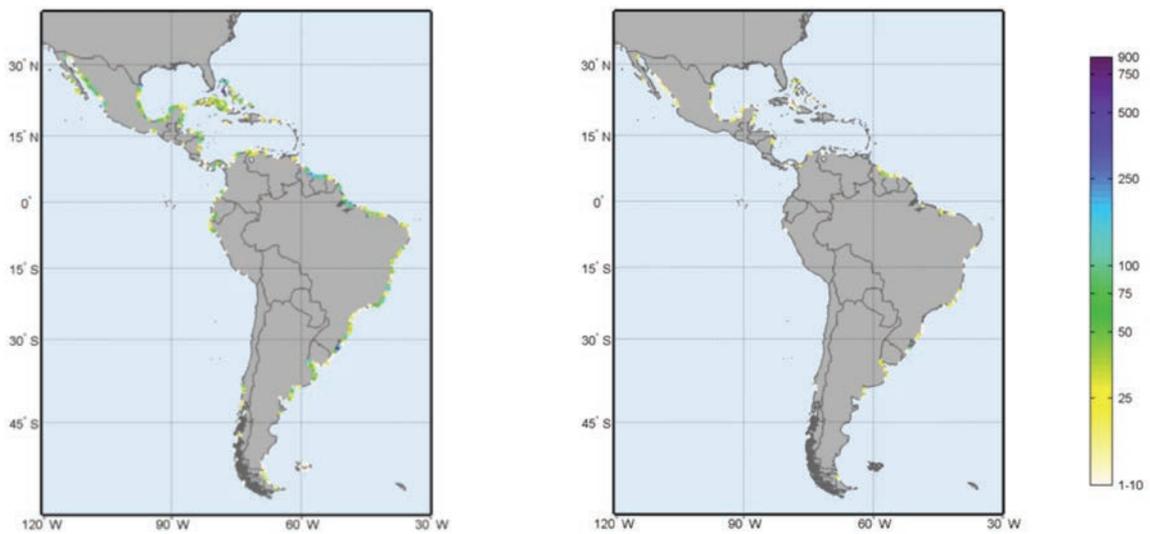
FIGURA 3.25
SUPERFICIE AFECTADA POR UNA INUNDACIÓN COSTERA DE PERÍODO
DE RETORNO DE 50 AÑOS CON RESPECTO A 2010
(Kilómetros cuadrados)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.26
SUPERFICIE AFECTADA POR UNA INUNDACIÓN COSTERA, PERÍODO DE RETORNO
DE 50 AÑOS RESPECTO A 2010 EN LOS ESCENARIOS C Y E
(Kilometros cuadrados)

- a) Escenario E Subida del nivel del mar de 1 m
- b) Escenario C Extrapolación de tendencias estadísticas a 2070



Fuente: Elaboración propia.

Los cuadros 3.14 y 3.15 recogen los porcentajes de la población afectada por escenarios y países para las inundaciones de periodos de retorno de 50 y 500 años. Los resultados para cada escenario se expresan en porcentaje respecto a la población afectada en 2010 por una inundación con el periodo de retorno correspondiente en cada caso, que se recoge en la última columna en porcentaje de la población costera (población hasta la cota 10 m). Los escenarios F2 y G2 recogen el efecto de los eventos Niño y Niña de producirse con un aumento del nivel de 1 m, por lo que se han descontado de los mismos la población del escenario E.

En comparación con el cuadro equivalente de ascenso del nivel del mar (cuadro 3.7), países como la República Dominicana, Haití o Suriname, se ven menos impactados por estos eventos extremos respecto a la posición en el *ranking* de países. Respecto al impacto en número de personas afectadas, destacan Brasil, México y Argentina. En esta última, la inundación en el escenario E supondría un 70% adicional al impacto de producirse en la actualidad. El resto de países aumentan el impacto en término porcentual menos de un 30% en general, salvo Suriname y Guyana, con más de un 80% respecto al previsible actual. En general, se puede afirmar que alrededor del 25% de la población entre los 0 y 10 m se ven afectados en los países continentales por eventos de inundación (asociados a periodos de retorno de 50 años), mientras que del orden de 45% en casos de países insulares. La afección cambiará significativamente en muchos países en las próximas décadas. En algunos países, como Panamá o Haití, la incidencia de eventos Niño en una situación de un metro de elevación (escenario F2) puede suponer menor daño que en la actualidad. Sin embargo, en otros casos, como en Guatemala, la población afectada aumentaría (del 2,4 al 7% para 50 años de retorno).

CUADRO 3.14
VARIACIÓN DE LA POBLACIÓN AFECTADA EN CADA ESCENARIO DE COTA DE INUNDACIÓN, PERÍODO DE RETORNO DE 50 AÑOS, RESPECTO DE 2010
(Porcentaje de habitantes en la costa)

Código país	País	Escenario										Población costera afectada en año 2010 hasta 10 m
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2		
76	BRA	1,69	2,32	3,69	10,33	21,91	0,43	0,53	0,00	0,00	25,09	
484	MEX	2,56	3,52	5,64	14,02	25,47	1,09	1,31	0,16	0,09	25,35	
32	ARG	4,12	6,61	12,01	33,97	69,47	1,13	2,47	0,01	0,01	14,07	
192	CUB	0,36	0,50	0,82	2,65	6,43	0,19	0,32	0,00	0,00	27,66	
862	VEN	3,31	4,41	6,78	14,79	22,84	0,08	0,10	0,09	0,02	24,29	
170	COL	1,60	2,16	3,38	8,97	18,62	0,37	1,59	0,00	0,00	24,05	
630	PRI	3,02	4,29	6,84	18,57	37,92	1,10	1,33	0,00	0,00	28,71	
604	PER	0,15	0,21	0,34	2,37	5,44	0,76	1,27	0,00	0,00	34,06	
214	DOM	0,94	1,30	1,97	4,88	9,25	0,62	0,42	0,00	0,00	10,58	
332	HTI	2,52	2,91	3,70	5,57	14,99	2,11	1,11	0,00	0,00	15,70	
218	ECU	0,91	1,24	1,98	15,16	28,84	7,48	8,23	0,00	0,00	25,63	
152	CHL	0,21	0,30	0,52	1,81	3,92	0,07	0,11	0,00	0,00	35,50	
328	GUY	5,93	8,15	13,35	39,14	81,54	0,00	0,00	0,64	0,81	21,58	
858	URY	0,56	0,78	1,20	3,23	6,93	0,17	0,27	0,00	0,00	40,47	
740	SUR	6,29	8,63	13,80	41,49	89,00	0,00	0,00	0,45	0,51	13,93	
591	PAN	5,16	6,96	10,89	35,63	71,83	6,70	3,78	0,00	0,00	14,25	

(continúa)

(conclusión)

Código país	País	Escenario									Población costera afectada en año 2010 hasta 10 m
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	
44	BHS	1,19	1,64	2,64	7,45	16,13	0,13	0,21	0,00	0,00	12,68
388	JAM	0,84	1,16	1,85	5,15	14,15	0,51	1,04	0,00	0,00	20,65
340	HND	1,42	1,96	3,26	10,35	26,02	1,25	3,46	0,00	0,00	7,58
222	SLV	0,22	0,30	0,48	2,00	4,60	0,87	2,94	0,00	0,00	12,72
780	TTO	0,03	0,04	0,06	0,33	11,21	0,00	0,00	0,00	0,05	11,14
320	GTM	0,60	0,84	1,34	5,62	12,90	2,42	6,97	0,00	0,00	6,19
558	NIC	0,22	0,30	0,48	1,54	12,88	0,32	3,72	0,00	0,00	15,17
84	BLZ	1,91	2,63	4,06	10,66	27,22	0,19	0,36	0,00	0,00	18,98
188	CRI	0,56	0,76	1,22	3,99	9,69	0,94	1,47	0,00	0,00	16,80
312	GLP	0,12	0,17	0,32	1,07	2,38	0,04	0,07	0,00	0,00	25,42
254	GUF	0,27	0,36	0,57	1,51	7,83	0,01	0,04	0,00	0,00	24,96
474	MTQ	9,90	13,61	15,24	15,36	15,55	2,21	0,01	0,00	0,00	29,51
850	VIR	0,10	0,13	0,21	0,47	0,95	0,04	0,03	0,00	0,00	43,25
660	AIA	0,32	0,45	0,71	2,58	5,55	0,14	0,21	0,00	0,00	47,12
136	CYM	0,15	0,21	0,33	1,21	4,74	0,09	0,34	0,00	0,00	16,92
530	ANT	0,94	1,30	2,07	5,48	9,17	0,00	0,00	0,02	0,01	24,39
533	ABW	0,35	0,49	0,77	2,03	5,54	0,06	0,13	0,00	0,00	34,73
28	ATG	0,78	1,08	1,78	4,93	9,94	0,31	0,33	0,00	0,00	34,88
52	BRB	0,23	0,32	0,51	0,88	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	42,03
92	VGB	0,04	0,09	0,20	0,68	1,44	0,00	0,05	0,00	0,00	46,99
662	LCA	0,24	0,33	0,51	1,02	1,02	0,02	0,00	0,00	0,00	34,26
796	TCA	1,52	2,12	3,38	9,36	21,69	0,52	0,97	0,00	0,00	21,54
212	DMA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,90
308	GRD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,58
659	KNA	0,00	0,00	0,00	0,00	1,79	0,00	0,14	0,00	0,00	40,46
670	VCT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,63
500	MSR	0,00	0,00	0,00	0,00	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00	46,39

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3.15
VARIACIÓN DE LA POBLACIÓN AFECTADA EN CADA ESCENARIO DE COTA DE
INUNDACIÓN. PERÍODO DE RETORNO DE 500 AÑOS, RESPECTO DE 2010
(Porcentaje de habitantes en la costa)

Código país	País	Escenario									Población costera afectada en año 2010 hasta 10 m
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1	G2	
76	BRA	1,76	2,45	3,98	10,44	21,54	0,42	0,53	0,00	0,00	26,48
484	MEX	1,55	2,14	3,41	10,02	21,25	0,97	1,27	0,08	0,09	28,60
32	ARG	4,17	5,77	9,32	25,35	43,26	1,77	1,17	0,01	0,01	19,66
192	CUB	0,46	0,64	1,05	3,34	8,04	0,24	0,39	0,00	0,00	28,15
862	VEN	2,81	3,82	6,01	12,39	20,48	0,06	0,10	0,05	0,02	25,23
170	COL	1,47	2,02	3,22	8,59	19,46	0,31	1,55	0,00	0,00	24,47
630	PRI	2,68	3,69	5,90	16,58	31,92	1,10	0,91	0,00	0,00	31,91
604	PER	0,16	0,23	0,37	2,63	5,71	0,88	1,31	0,00	0,00	34,19
214	DOM	0,78	1,05	1,65	4,44	8,43	0,53	0,46	0,00	0,00	10,83
332	HTI	1,00	1,37	1,79	5,14	15,09	0,69	1,32	0,00	0,00	16,12
218	ECU	0,87	1,20	1,91	13,85	28,60	7,23	7,98	0,00	0,00	26,42
152	CHL	0,31	0,43	0,67	1,90	4,05	0,11	0,11	0,00	0,00	35,86
328	GUY	5,80	8,23	13,60	38,11	78,33	0,00	0,00	0,61	0,76	22,92
858	URY	0,76	1,05	1,68	5,17	11,50	0,26	0,33	0,00	0,00	42,54
740	SUR	5,65	7,78	13,44	40,54	81,90	0,00	0,00	0,38	0,44	15,54
591	PAN	4,84	6,57	10,36	35,08	67,72	6,32	3,66	0,00	0,00	14,80
44	BHS	1,19	1,64	2,63	7,64	19,20	0,14	0,37	0,00	0,00	13,49
388	JAM	0,82	1,13	1,81	6,07	15,77	0,50	1,02	0,00	0,00	21,09
340	HND	1,59	2,27	3,83	12,14	31,90	1,35	4,31	0,00	0,00	8,01
222	SLV	0,22	0,30	0,48	1,99	5,72	0,87	2,92	0,00	0,00	12,78
780	TTO	0,03	0,04	0,06	1,13	13,48	0,00	0,00	0,00	0,05	11,14
320	GTM	0,61	0,84	1,34	5,54	16,08	2,38	6,83	0,00	0,00	6,28
558	NIC	0,22	0,30	0,48	1,53	17,87	0,32	3,72	0,00	0,00	15,22
84	BLZ	1,81	2,50	3,99	10,89	30,04	0,19	0,34	0,00	0,00	19,95
188	CRI	0,55	0,76	1,21	3,97	10,11	0,93	1,46	0,00	0,00	16,92
312	GLP	0,22	0,30	0,48	1,30	2,77	0,07	0,32	0,00	0,00	25,56
254	GUF	0,26	0,36	0,57	1,51	9,93	0,01	0,04	0,00	0,00	25,06
474	MTQ	2,39	2,40	2,42	2,53	2,70	1,96	0,01	0,00	0,00	33,21
850	VIR	0,02	0,05	0,11	0,42	0,91	0,00	0,05	0,00	0,00	43,40
660	AIA	0,49	0,66	1,06	2,91	5,52	0,21	0,16	0,00	0,00	48,16
136	CYM	0,15	0,21	0,32	2,46	5,97	0,09	0,34	0,00	0,00	17,00
530	ANT	0,93	1,29	2,05	5,41	8,26	0,00	0,00	0,02	0,00	24,71
533	ABW	0,35	0,49	0,77	2,03	6,01	0,06	0,13	0,00	0,00	34,86
28	ATG	0,81	1,11	1,77	4,81	10,82	0,32	0,45	0,00	0,00	36,31
52	BRB	0,23	0,32	0,50	0,56	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	42,16
92	VGB	0,13	0,17	0,28	0,76	1,38	0,05	0,04	0,00	0,00	47,23

(continúa)

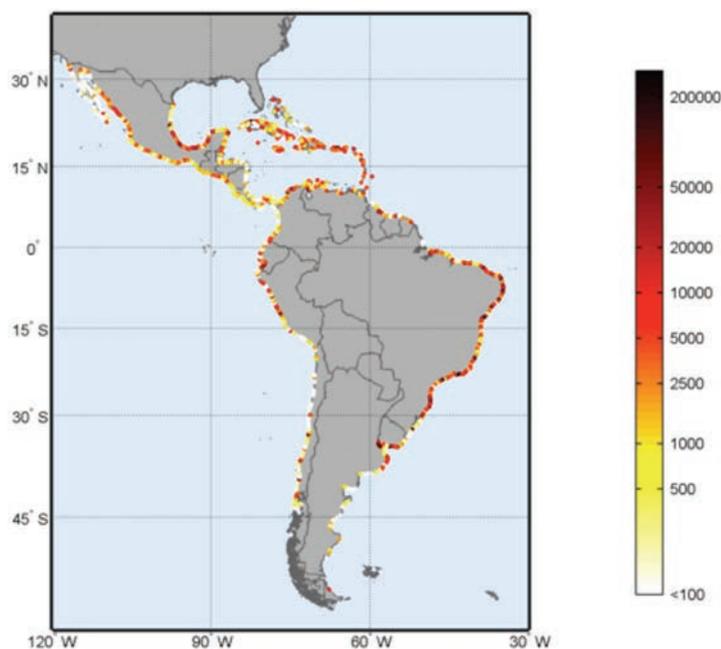
(conclusión)

Código país	País	Escenario								Población costera afectada en año 2010 hasta 10 m	
		A	B	C	D	E	F1	F2	G1		G2
662	LCA	0,23	0,33	0,51	0,52	0,52	0,02	0,00	0,00	0,00	34,43
796	TCA	1,45	2,02	3,22	8,93	24,80	0,50	0,92	0,00	0,00	22,59
212	DMA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,90
308	GRD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,58
659	KNA	0,00	0,00	0,00	0,90	2,97	0,00	0,14	0,00	0,00	40,46
670	VCT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,63
500	MSR	0,00	0,00	0,00	0,69	2,77	0,00	0,00	0,00	0,00	46,39

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.27 muestra la distribución espacial de la población afectada ante una inundación de recurrencia media de 50 años. La mayor parte de la población se concentra en la costa Este, especialmente en el Brasil, pese a contar con menor inundación que en las costas más al sur, claramente provocado por una mayor concentración de la población. Un alto impacto también se produciría en las ciudades del Río de la Plata, que es donde se obtienen los valores más altos de cota de inundación (véase figura 3.18).

FIGURA 3.27
POBLACIÓN AFECTADA POR EVENTOS DE INUNDACIÓN.
PERÍODO DE RETORNO 50 AÑOS RESPECTO DE 2010
(Número de habitantes)

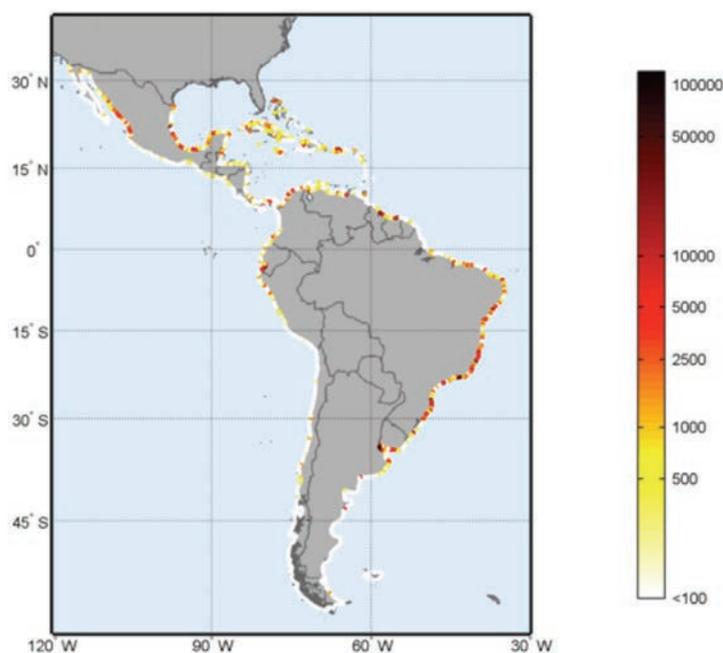


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Referencia de población en año 2000.

En la figura 3.28 se representa la diferencia de población entre la situación de ascenso del nivel del mar de 1 m (escenario E) y el obtenido por extrapolación de tendencias estadísticas en 2070 (escenario C), junto a eventos extremos de inundación costera. Merece la pena resaltar el posible impacto por aumento de población afectada en la costa Este del Hemisferio Sur y las grandes aglomeraciones urbanas en el Caribe, México y Perú. Los mayores aumentos son acordes con las mayores tendencias detectadas en la costa Atlántica sur (Río de la Plata y sur del Brasil), destacando también la afección en México aunque las tendencias son bastante inferiores. Este resultado claramente identifica focos de impacto en las ciudades costeras de los distintos países, especialmente en el norte de Argentina, Uruguay y de manera generalizada en las costas del Brasil.

FIGURA 3.28
DIFERENCIA DE POBLACIÓN AFECTADA POR EVENTOS DE INUNDACIÓN ENTRE
LOS ESCENARIOS E Y C, PERIODO DE RETORNO PARA 500 AÑOS
(Número de habitantes)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Referencia de población en año 2000.

4.1.4 Inundación por huracanes

Una vez presentados, analizados, ejecutados y validados los diferentes modelos de presión, viento, oleaje y marea meteorológica para diferentes eventos de huracán (véase anexos dentro de los documentos anteriores), en este apartado se presentan los resultados del nivel de inundación máximo alcanzado a partir de la base de datos de huracanes (con resolución temporal horaria) de 54 años.

La finalidad de este análisis es definir y complementar los mapas estadísticos de marea meteorológica y oleaje aportados por los modelos numéricos para el reanálisis de 61 años a lo largo de la costa Atlántica y Pacífica, a través de mapas que muestren los máximos potenciales de oleaje y marea meteorológica en las mismas localizaciones, para los eventos históricos de huracán.

Esta información es crucial por dos motivos: el primero, para tener un orden de magnitud de los máximos del oleaje y marea meteorológica alcanzados históricamente por eventos de alta energía como son los huracanes, para de esta forma poder conocer el comportamiento y las limitaciones de las bases de datos GOW y GOS; y en segundo lugar, para contar con mapas históricos de máximos potenciales, que se empleen como primera aproximación y en ausencia de otro tipo de información más detallada, al diseño de estructuras de protección costera y portuarias de las costas de América del Norte (México), América Central y América del Sur en ambas vertientes, tanto la Atlántica como la Pacífica.

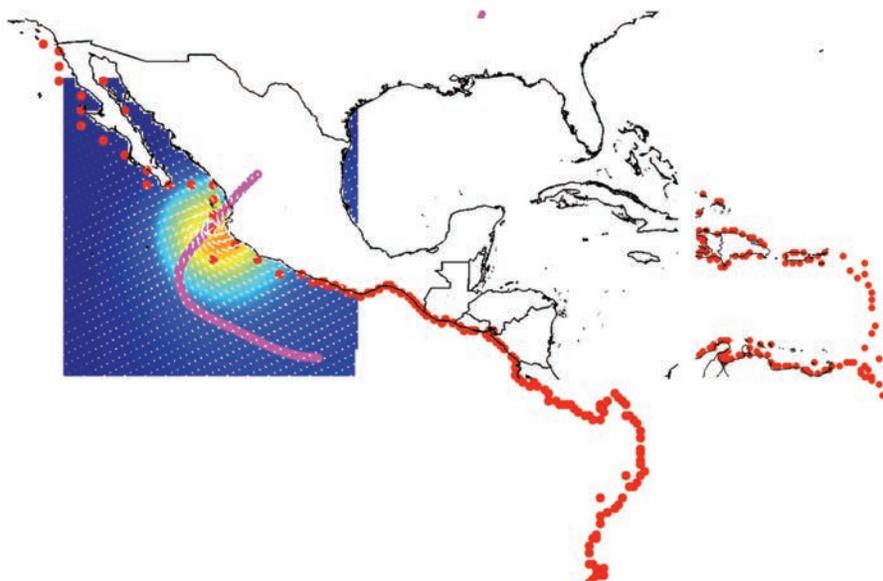
Con esta aproximación no se pueden determinar tendencias de cambio en los huracanes, ya que es un tema de gran complejidad que requiere un estudio más detallado para llegar a conclusiones fiables. Algunos de los más recientes estudios al respecto que se pueden consultar son Bender y otros (2010), Knutson webpage (<http://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes>), Webster y otros (2005) y Emanuel (2005).

En general, los modelos de circulación global proyectan un aumento en la frecuencia de los ciclones tropicales de categoría 4 y 5 para finales del siglo y una disminución de la frecuencia de ocurrencia general. Precisamente, la zona de mayor aumento se espera que sea el Atlántico Oeste hasta los 20°N (Bender y otros, 2010).

Debido a la importancia de estos fenómenos en la región y sus efectos, se ha creído conveniente incluirlos en el análisis de riesgo contemplado. Si bien en el presente estudio no se consideran cambios a futuro en los huracanes, la situación o escenario H, considera los impactos por un huracán (el máximo efecto histórico en cada punto) en el caso de que se repitiera (H1) y el impacto del mismo sobre un escenario de cambio climático con una subida de nivel del mar de 1 m (H2).

Para llevarlo a cabo, se han empleado los 369 puntos de control de la costa Atlántica y los 257 puntos de control en la costa del Océano Pacífico –figura 3.29–.

FIGURA 3.29
PUNTOS DE CONTROL PARA EL ESTUDIO, Y MAPAS DE VIENTO Y OLEAJE PARA
LOS HURACANES KENNA (2001) Y KATRINA (2005)

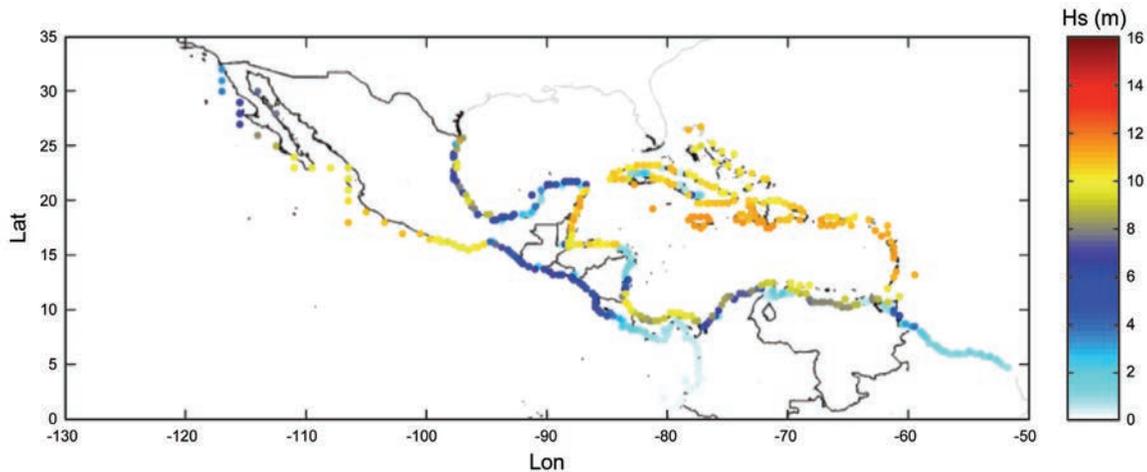


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los puntos rojos son los analizados en el presente estudio.

Para cada uno de los puntos de control se ha obtenido los máximos anuales (54 años) para los parámetros de presión, velocidad del viento, altura de ola significativa, periodo de punta, marea meteorológica por viento, presión y conjunta, algunos mostrados a continuación.

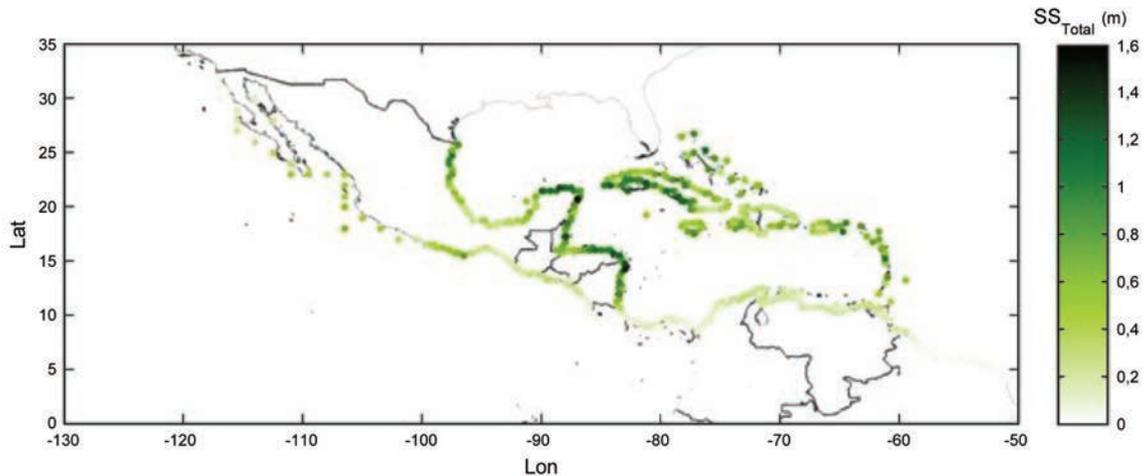
FIGURA 3.30
MÁXIMOS HISTÓRICOS DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE PARA LOS
HURACANES EN EL PERÍODO 1955 A 2009
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El análisis se hizo para los puntos de control analizados en el presente estudio considerando 54 años de datos de huracanes.

FIGURA 3.31
MÁXIMOS HISTÓRICOS DE MAREA METEOROLÓGICA CONJUNTA PARA LOS
HURACANES EN EL PERÍODO 1955 A 2009
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El análisis se hizo para los puntos de control analizados en el presente estudio considerando 54 años de datos de huracanes. La marea meteorológica conjunta se refiere a (suma lineal $SS_{\text{presión}} + SS_{\text{viento}}$)

4.1.5 Conclusiones del impacto producido por inundaciones costeras

Ascenso del nivel del mar

- La tendencia es inequívocamente de aumento del nivel del mar en todos los puntos de la región. Los mayores valores de las tendencias se obtienen en la franja costera Atlántica, con valores de aproximadamente 3 mm al año para el primer periodo de estudio en la costa del Norte de Sudamérica y la costa del Caribe, con menores valores en las islas caribeñas. En los deltas, debido a una sumergencia adicional, la inundación podría ser mayor.
- La distribución de población y del territorio por cotas es un factor principal en el estudio del impacto causado por las inundaciones en la franja costera. La distribución por cotas de superficie afectada resalta que la distribución es variable según el país por la distinta configuración de la costa (principalmente pendiente del terreno). En los primeros metros de países como Honduras o Guyana, la superficie de terreno por debajo de la cota 1 m es muy inferior en proporción con el área de terreno a cotas superiores. Por el contrario, por ejemplo, en el Perú la situación es la opuesta, con una parte significativa de la superficie total por debajo del primer metro de elevación.
- La superficie afectada en cada cota en porcentaje con respecto a la superficie total de cada país muestra la complicada situación de muchos países insulares. En este caso, las islas caribeñas adquieren gran importancia ya que la mayor parte de su territorio está por debajo de la cota 10 m. En estos casos, el peso relativo de la franja costera es mucho mayor que en el caso de países con gran superficie de terreno como México, Brasil o Argentina. Las Islas Turcas y Caicos, las Bahamas y las Islas Caimán son las más comprometidas en caso de impactos por inundación.
- Un ascenso del nivel del mar de 0,5 y 1 m (escenarios IPCC-AR4) tendrían un impacto notable en comparación con los valores obtenidos a partir de las tendencias estadísticas obtenidas de series históricas. Como se puede apreciar en las figuras 3.7 y 3.8, la situación de subida del nivel del mar es altamente variable espacialmente.
- En términos de población afectada, un ascenso de 1 m del nivel del mar impactaría en gran medida en las costas del Brasil, con grandes trastornos en las grandes aglomeraciones urbanas. Otras costas bastante afectadas serían las islas caribeñas, especialmente las más orientales, así como extensas partes de México, especialmente la costa Este, y diversos puntos singulares de Perú y Ecuador, así como las principales aglomeraciones humanas de Chile.
- Comparando esta situación con la de un eventual ascenso del nivel del mar provocado por un evento Niño de la misma magnitud que el máximo histórico (1998), se puede apreciar que la costa Oeste está claramente más afectada que la Este y que la magnitud del impacto es claramente inferior a una subida del nivel del mar de 1 m.
- En un escenario de 1 m de elevación del nivel y con la situación actual de huracanes, se obtienen diversas conclusiones. La proporción entre superficie afectada y población no es la misma según el país, así, Honduras, por ejemplo, multiplicaría prácticamente por 4 la superficie de terreno. Sin embargo, el cambio en población afectada no guarda la misma proporción y se encontraría en el mismo orden de magnitud. México y Cuba apenas sufrirían cambios en población afectada mientras que los km² de terreno inundado se verían multiplicados por 2,5 y 5 aproximadamente. No ocurre esto en todos los países, por ejemplo en Belice o Puerto Rico, la población afectada prácticamente se doblaría. Jamaica o Haití son otros ejemplos con esta problemática.

- Comparando las situaciones de huracanes entre sí, respecto al nivel actual y un posible escenario con 1 m de ascenso del mismo, las superficies prácticamente en todos los casos se doblan. Países donde el impacto variaría en gran proporción ante el ascenso del nivel del mar con situación de huracán serían Honduras, Panamá, Belice, Costa Rica y República Bolivariana de Venezuela, entre otros. Sin embargo, para otros países, como las islas Caimán, la situación no cambiaría significativamente en cuanto a huracanes y habitantes afectados se refiere.
- El caso particular de los deltas se caracteriza por corresponder a zonas costeras bajas, con subsidencia adicional al efecto del ascenso del nivel del mar y con una gran importancia ecológica y/o económica. Los deltas de Río de la Plata y río Magdalena se verían más afectados en términos de población por una subida de 1 m de ascenso del nivel del mar, mientras que el primero destaca por tener la mayor superficie de terreno comprometida.
- Respecto a la afección a las infraestructuras (carreteras y ferrocarriles) los resultados indican que una situación de ascenso del nivel del mar de 1 m implicaría impactos considerablemente mayores que los esperados de seguir la suave tasa de aumento obtenida por extrapolación de los cambios observados hasta ahora. En tramos de carretera afectados hasta la cota de 1 m, los impactos se concentrarían en partes de las costas de Brasil, México y República Bolivariana de Venezuela, así como en algunas de las islas caribeñas. Los tramos de ferrocarril afectados son mucho menos que en el caso de las carreteras, aunque estos presentan una importancia relativa mayor desde el punto de vista de infraestructuras y de incidencia en la red de transportes. No obstante, tan solo en los casos de Cuba, México y Brasil, y Puerto Rico frente a los escenarios de subida del nivel del mar, y con presencia de huracanes en especial, la situación es comprometedora.
- Respecto a los huracanes, para países como la República Bolivariana de Venezuela, Honduras, Panamá o Costa Rica, la situación ante un ascenso de 1 m cambiaría significativamente, mientras que en otros países la variación del impacto no es tan considerable respecto al impacto con el nivel actual, como por ejemplo la República Dominicana.

Cota de inundación (eventos extremos del nivel del mar)

- Se ha estudiado la cota de inundación como variable que define el nivel hasta el que llegan los eventos extremos de nivel del mar por distintos factores. Las tendencias de la cota de inundación han aumentado en los últimos 61 años debido al aumento de las condiciones de oleaje, nivel medio del mar y sobrelevaciones debidas a tormentas. Respecto a la tasa de cambio detectada en los eventos extremos de la cota de inundación, las partes con mayor cambio (hasta 1 cm/año) son la regiones alrededor del Río de la Plata, precisamente la zona geográfica con mayores valores de cota de inundación. En el resto de la región las tendencias obtenidas no superan en general 0,5 cm/año.
- La estacionalidad del cambio es importante porque puede aumentar el rango de variación a lo largo del año. No obstante, en el Río de la Plata, la variación estacional no es muy marcada y se puede considerar que la tendencia será prácticamente homogénea en todos los meses.
- La cota de inundación de 50 años de periodo de retorno es mayor en las costas de Chile, Argentina y Uruguay, con valores por encima de los 4 m. En el mar Caribe, en general los valores de la cota de inundación rondarían el metro de elevación (en ausencia de huracanes).
- En todos los casos se produce una disminución del índice que relaciona los periodos de retorno futuros con respecto a la actualidad, lo que implica una mayor frecuencia de los eventos extremos de inundación. Al contrario de lo que ocurre con los extremos de oleaje

que no aumentan en toda la región, en este caso debido a la acción conjunta de las distintas componentes del nivel del mar, se produce un aumento generalizado del nivel de inundación en las costas de la región.

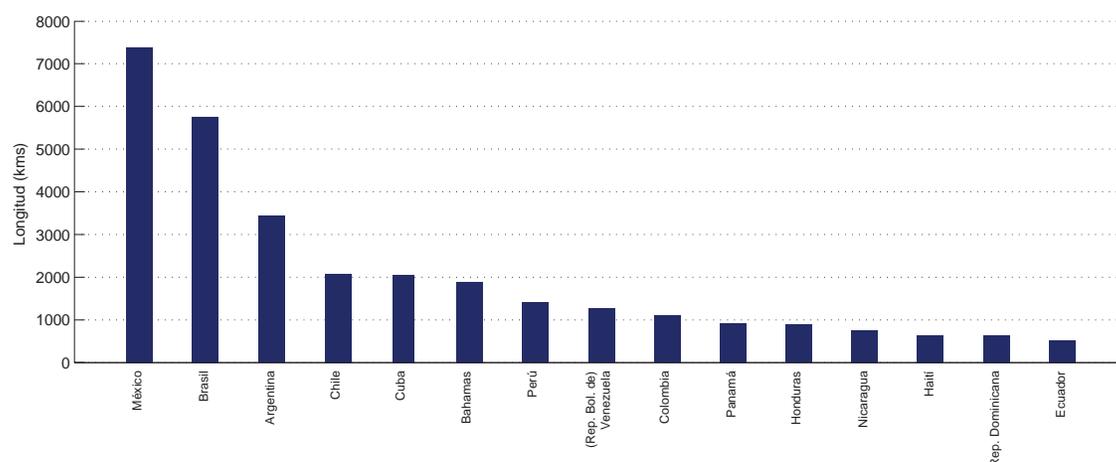
- En comparación con los resultados obtenidos para el ascenso del nivel del mar, los resultados de extremos de inundación muestran un aumento de las pérdidas de superficie de terreno de un orden de magnitud más mayor, mostrando la importancia de los eventos esporádicos de inundación.
- Respecto al impacto en número de personas afectadas, destacan en magnitud Brasil, México y Argentina, en esta última la inundación con un metro de ascenso del nivel supondría un 70% adicional al impacto de producirse en la actualidad. En el resto de países el impacto aumentan menos de un 25% respecto a la actualidad, salvo Suriname y Guyana, con más de un 80%.
- La afección cambiará significativamente en muchos países en las próximas décadas. En algunos países, como Panamá o Haití, la incidencia de eventos Niño en una situación de un metro de elevación puede suponer menor daño que en la actualidad. Sin embargo, en otros casos, como en Guatemala, la población afectada aumentaría (del 2,4 al 7% para 50 años de retorno).
- Los mayores impactos para la población se producirían en la costa Este del Hemisferio Sur, con focos de impactos en las ciudades costeras del norte de Argentina, Uruguay y Brasil, así como en las grandes aglomeraciones urbanas del Caribe, México y Perú.

4.2 Erosión en playas

4.2.1 Características de las playas en ALyC

La tipología de playas en la región es muy heterogénea encontrándose desde playas de árido fino a grueso, pequeñas calas encajadas, arenales de cientos de kilómetros prácticamente ininterrumpidos o playas barrera que separan el mar abierto de lagunas intermareales. Frente a esta diversidad no es posible analizar con detalle cada tipo por lo que se ha analizado las playas asumiendo ciertas hipótesis simplificadoras del problema. En primer lugar, se ha supuesto homogeneidad, tanto en el diámetro del grano como el perfil de equilibrio (perfil de Dean), independientemente del régimen mareal y las condiciones dinámicas locales. Estas hipótesis serían inadecuadas para un análisis a escala local para lo que sería necesario una caracterización detallada, tanto de las condiciones de las dinámicas como de las características concretas de cada playa de estudio. Sin embargo, para una evaluación global estas hipótesis son más que aceptables y suponen una estimación del orden de magnitud, y sobre todo, una forma de comparación entre las distintas zonas de la región, para determinar cómo los cambios en las dinámicas van a afectar, en mayor o menor magnitud, en cada zona, en igualdad de condiciones.

FIGURA 3.32
LONGITUD TOTAL DE PLAYAS DE ALYC POR PAÍSES
(Kilómetros)



Fuente: Elaboración propia.

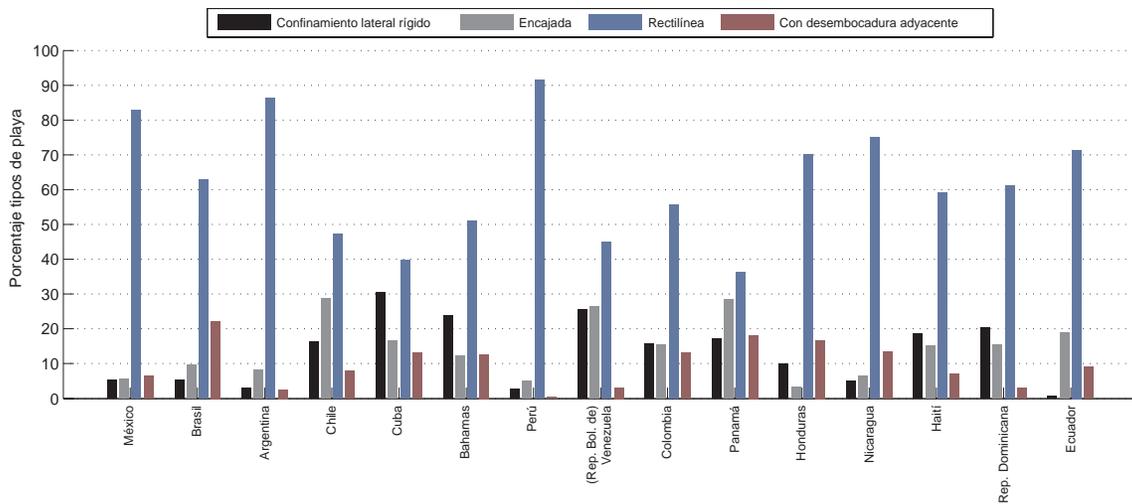
Nota: Lista de 15 países con mayor longitud de playas en la región.

En cuanto a la variabilidad de playas entre países, atendiendo a la longitud de playas –figura 3.32–, el país con mayor longitud de playas es México, seguido de Brasil, Argentina, Chile y Cuba.

En un estudio de la erosión en las costas es de vital importancia determinar la configuración que ésta presenta –figura 3.33 y siguientes–. En los países con costa, parte de la misma está urbanizada en los primeros metros desde la línea de costa, con menos posibilidades de un posible retroceso en el caso de que la costa se erosionase que en el caso de costas con playas, sin influencia antropogénica, donde es posible un retraqueo natural a partir del movimiento tierra adentro del sistema dunar. Por ello, en este estudio se ha analizado en cada unidad de estudio de 5 km de ALyC la longitud de la unidad de estudio con presencia de costa urbanizada de forma consolidada, la longitud de playa y la longitud común de ambas en su caso (playa urbana). En la figura 3.34 y la figura 3.35 se muestra esta información ordenada por longitud de playa y longitud de frente urbano, respectivamente, distinguiendo, tanto la longitud de playas, la longitud de ciudad en primera línea de costa, como la parte común de playa y ciudad. Esta información es de gran valor para analizar, no sólo la vulnerabilidad de las costas, sino también el riesgo asociado a la erosión. Desde el punto de vista de la longitud total de playas, circunstancia de especial importancia puesto que supone el factor de exposición de cada país, México, Brasil y Argentina son los países con mayor longitud como ya se ha visto previamente. Sin embargo, de estos tres países, la longitud de frente urbano construido frente a la línea de costa destaca sobremanera en el caso de Brasil. Además, la mayor parte del frente marítimo construido coincide con playas, lo cual indica que en la mayoría de casos, las playas ejercen de obra de defensa frente a las dinámicas marinas protegiendo las construcciones que se disponen tras ellas. Por tanto, en estos casos, la función de las playas no es solo recreativa sino también defensiva. El país con mayor longitud de costa construida (en primera línea de costa) en términos porcentuales es Barbados, seguido de Aruba, Anguila, Jamaica y Uruguay. En estos casos, la longitud de frente marítimo urbanizado es del mismo orden que la longitud total del playa, pero, sin embargo, se dan diferencias al compararlo con la parte común, lo cual indica que existen zonas de la costa donde las construcciones están a salvo de las dinámicas por otros medios (presumiblemente zonas elevadas como acantilados). No obstante, en todos los casos de la figura 3.35 se observa que la mayor parte de la costa urbanizada coincide con playas.

La conclusión que se puede extraer del análisis de estas dos figuras es que existe una doble dimensión de un análisis sobre erosión en la costa en la región. Por un lado, existen países con gran longitud de playas sin actividades urbanas inmediatamente tras de sí, mientras que en otros países, la longitud de frente urbano en primera línea de costa es comparable a la longitud de playas (en gran parte coincidente con zonas urbanizadas). Por tanto, será necesario analizar esta dualidad funcional en el estudio analizando, por un lado, la función de las playas como recurso ecológico y turístico (uso recreativo) y, por otro lado, la función que representan como obra de defensa marítima (uso defensivo).

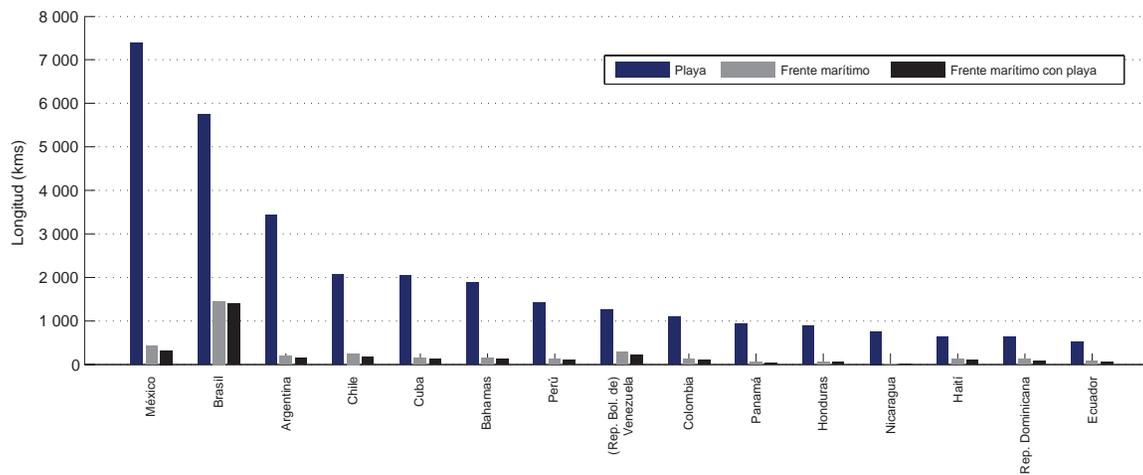
FIGURA 3.33
TIPOS DE PLAYA DISTINGUIDAS EN EL ESTUDIO POR PAÍSES
(Porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se muestran los 15 primeros países en orden descendente de acuerdo con la longitud total de playa.

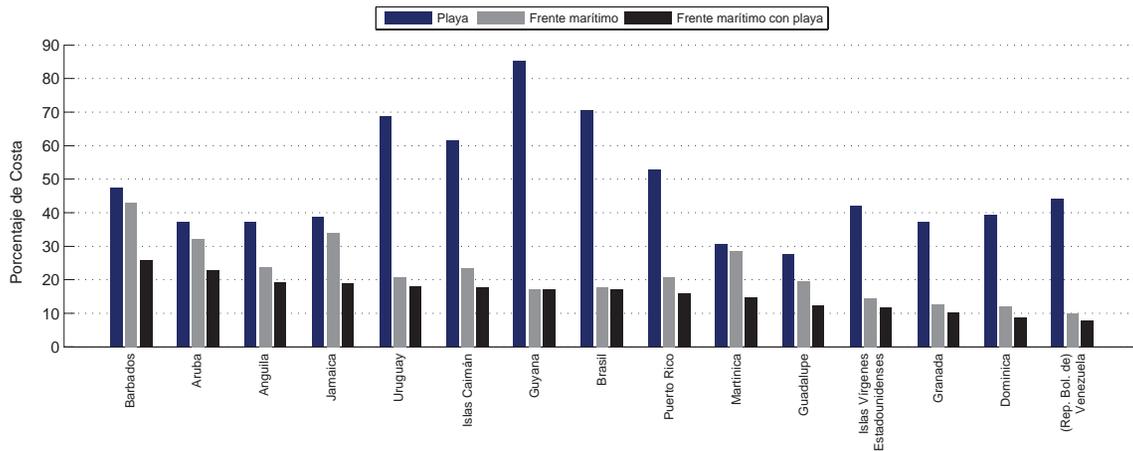
FIGURA 3.34
LONGITUD DE COSTA, ORDENADA SEGÚN LONGITUD DE PLAYA, DISTINGUIENDO
LONGITUD DE PLAYA Y SU FRENTE URBANO
(Kilómetros)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se muestran los 15 primeros países en orden descendente de acuerdo con la longitud total de playa.

FIGURA 3.35
LONGITUD DE COSTA, ORDENADA SEGÚN LONGITUD DE FRENTE URBANO,
DISTINGUIENDO LONGITUD DE PLAYA Y SU FRENTE URBANO
(Porcentaje del total de la costa)

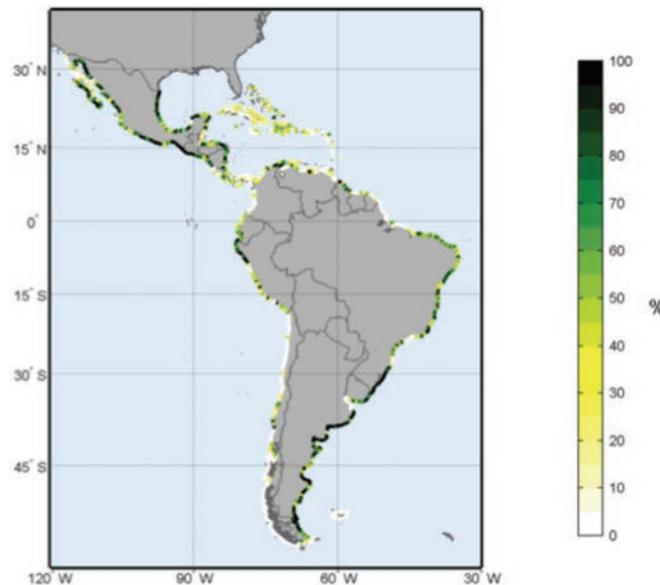


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se muestran los 15 primeros países en orden descendente de porcentaje de longitud de frente marítimo del total de costa.

Como se vio en documentos anteriores, gran parte de las playas se pueden considerar susceptibles de erosión por la acción conjunta del nivel del mar y del oleaje –figura 3.36–. Analizando las figuras 3.36 y 3.37 se pueden extraer varias conclusiones de las playas de ALyC como, por ejemplo, que predominan las playas rectilíneas sobre las encajadas, particularmente en la parte continental de la región.

FIGURA 3.36
COSTA CON PLAYAS RECTILÍNEAS EN UNIDADES DE 50 KM
(Porcentaje)



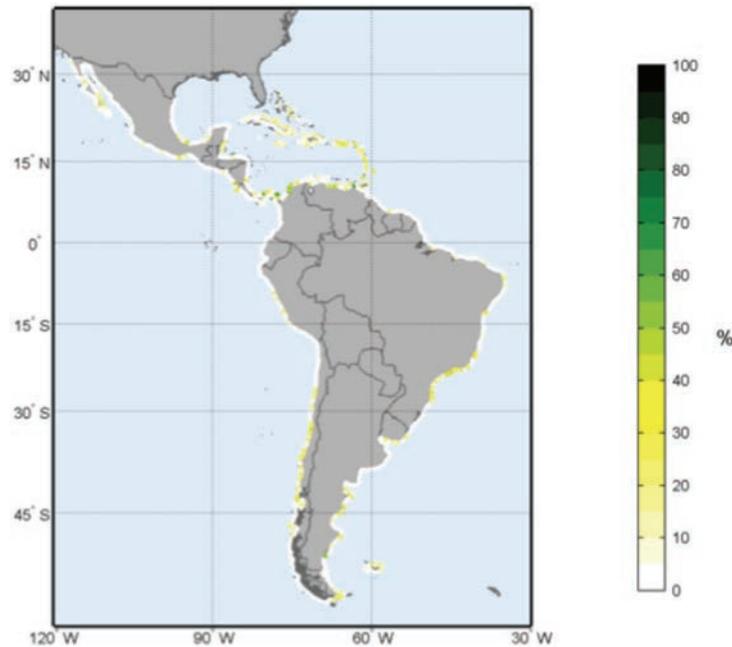
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las playas rectilíneas son aquellas sin ningún confinamiento rígido lateral en las unidades de estudio de 5 km.

Para analizar las playas se ha utilizado la información recogida de imágenes de satélite donde se clasifica las playas en cuatro tipos, entre ellas, playas rectilíneas: aquellas que, en una unidad de estudio de 5 km, no presenta ningún límite rígido dentro de la unidad. Estas playas se asume que son susceptibles de ser analizadas con la formulación planteada (expresión 3.7) pese a que no es estrictamente cierto debido a que los procesos de transportes de sedimentos pueden ser de escalas de cientos de kilómetros, muy por encima del rango espacial de las unidades de estudio de 5 km.

Otro de los tipos de playas que se han analizado son las que presentan dos confinamientos laterales dentro de los límites de la unidad de estudio de 5 km, denominadas en este trabajo playas encajadas. Estas playas presentan la peculiaridad de que el transporte de sedimentos en ellas está delimitado longitudinalmente a la costa por los confinamientos laterales, de tal modo que la forma que adoptan responde a fenómenos de transporte de sedimentos internos a la unidad de estudio. Esta peculiaridad las hace candidatas idóneas para ser analizadas mediante el modelo planteado, ya que su comportamiento en planta se puede suponer inicialmente independiente de su comportamiento en perfil. Por ello, en este tipo de playas, como se verá en el apartado siguiente, por un lado se analiza su evolución previsible mediante la regla de Bruun y, por otro, su variación por giro de la planta para adecuarse a la tendencia de giro de procedencia del oleaje dominante (dirección del Flujo Medio de Energía del oleaje), el cual en muchas ocasiones supone un impacto mucho mayor que el primero.

FIGURA 3.37
COSTA CON PLAYAS ENCAJADAS EN UNIDADES DE 50 KM
(Porcentaje)

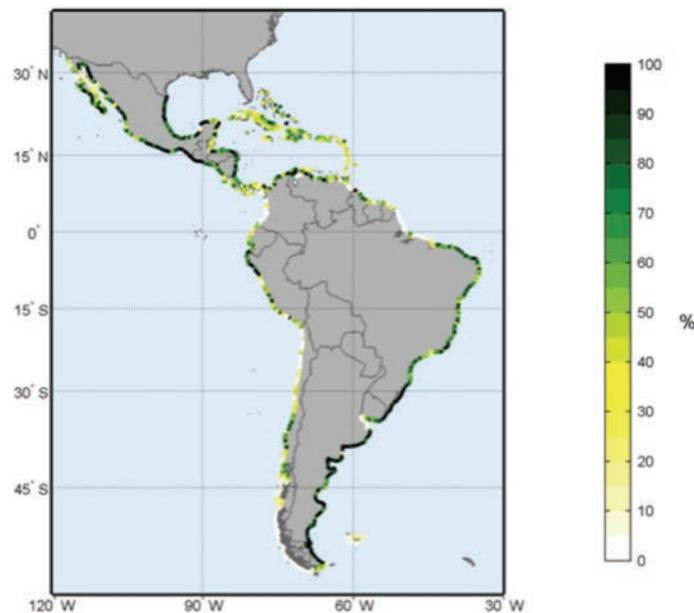


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las playas encajadas son aquellas con confinamiento rígido por ambos laterales dentro de una misma unidad de estudio de 5 km.

Las playas rectilíneas dominan y configuran la mayor parte de las costas de México, especialmente en el golfo de México, y desde el sur del Brasil hasta el sur del continente, con otras zonas aisladas a lo largo de toda la región de ALyC. Las playas encajadas dominan en las costas de Chile, sur de Brasil e islas caribeñas. Si bien todas se pueden analizar como confinadas en una unidad de estudio, en Chile los confinamientos son rígidos, normalmente acantilados y rocas elevadas, mientras que en el Caribe suelen ser accidentes del terreno menos pronunciados que configuran un cambio en la orientación de la costa.

FIGURA 3.38
COSTA CON PLAYAS SIN EFECTO DE DESEMBOCADURAS EN UNIDADES DE 50 KM
(Porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Erosión y equilibrio dinámico en las playas

La acción conjunta de los distintos procesos de la dinámica marina sobre los sedimentos de una playa da lugar al transporte de arena y, consecuentemente, a una variación del fondo. El estudio de este conjunto de acciones y respuestas, conocido usualmente por el nombre de procesos litorales, ha de realizarse de un modo aproximado, dado su complejidad y la escala de estudio. Las aproximaciones existentes se basan en dos hipótesis de partida. La primera se refiere a la tridimensionalidad de los procesos litorales y admite que el estudio de los mismos puede efectuarse analizando por separado los procesos transversales (perfil de playa) y los procesos longitudinales (planta). La segunda es relativa a la escala temporal y espacial de los procesos y a la necesidad de utilizar formulaciones específicas en función de la escala de interés.

Todos los procesos hidrodinámicos y sedimentarios que acontecen en una playa son, en mayor o menor medida, procesos tridimensionales. Sin embargo, las limitaciones de las herramientas, formulaciones e incluso de nuestra capacidad de entendimiento de dichos procesos no nos permiten analizarlos en toda su complejidad. De este modo, surge como primera y más importante hipótesis de trabajo en el estudio de la estabilidad de una playa, la relativa a la ortogonalidad de los movimientos longitudinales y transversales de la misma.

De acuerdo con esta hipótesis de ortogonalidad, cualquier movimiento de una playa, como por ejemplo el ocurrido tras un temporal, puede ser analizado estudiando los movimientos longitudinales y transversales de la misma, los cuales se asume que son independientes entre sí. Nótese que la hipótesis de ortogonalidad permite analizar la estabilidad de una playa estudiando por separado:

- Estabilidad del perfil de playa (eje transversal).
- Estabilidad de la planta de la playa (eje longitudinal).

La hipótesis de ortogonalidad es, en general, suficientemente aproximada a la realidad, especialmente en playas abiertas con estados morfodinámicos extremos (disipativas o reflejantes). En playas con estados morfodinámicos intermedios, o en playas encajadas con una forma en planta de gran curvatura, existe, sin embargo, una notable interacción planta-perfil, por lo que el análisis por separado del perfil y la planta debe realizarse con cautela.

La erosión en las playas se produce como respuesta al cambio en las condiciones del oleaje. Debido a que el cambio climático afecta al oleaje, las playas modificarán su planta y su perfil de forma que se sitúen en un equilibrio dinámico respecto a las nuevas condiciones hidrodinámicas. Esta respuesta morfodinámica de las playas provoca zonas de erosión y otras de sedimentación, tanto en el perfil como en la planta.

Llegados a este punto, es necesario distinguir la erosión-sedimentación en el perfil de playa y en la planta de equilibrio, debido a que las variables que gobiernan el equilibrio en cada situación difieren. Una hipótesis habitual en la ingeniería de costas es asumir la independencia entre el perfil y la planta de las playas, lo que supone que una determinada playa, en su posición de equilibrio de largo plazo, es decir, no sujeto a variaciones de corto plazo temporal (véase documento auxiliar 1 “Guía metodológica”), se puede definir por medio de un perfil y una planta de equilibrio. Con esta aproximación, la erosión puede ser afrontada mediante el estudio de la erosión en el perfil de largo plazo por un lado, y las modificaciones en la planta por otro. Respecto al perfil, las variables que determinan cuál es el retroceso del perfil de equilibrio, son la altura significativa superada 12 horas al año (H_{s12}) y el nivel medio del mar, en adelante, denominado erosión en perfil. Sin embargo, en el caso de la planta, esta se dispone de forma ortogonal a la dirección del flujo medio de energía, provocando que la playa gire y genere una zona de avance y otra de retroceso respecto a la situación previa, en adelante, erosión en planta.

Para el estudio de la erosión, ya que se distingue entre perfil y planta, se hace una clasificación de las playas según sus características morfodinámicas en las unidades de estudio en las que se ha dividido la costa. Las playas se clasifican en:

- **Playas rectilíneas:** Son aquellas que dentro del tramo de estudio no presentan confinamientos laterales y, por tanto, su giro es de una escala mayor a la del tramo de estudio (5 km) y podría existir transporte de sedimentos entre tramos adyacentes.
- **Playas encajadas:** son las que presentan confinamiento por ambos lados, es decir, su giro se puede evaluar de forma aproximada mediante la hipótesis de ortogonalidad de la forma en planta y la dirección del Flujo Medio de Energía del oleaje. Además, en este caso, no cabe la posibilidad de que exista transporte de sedimentos con los tramos adyacentes.

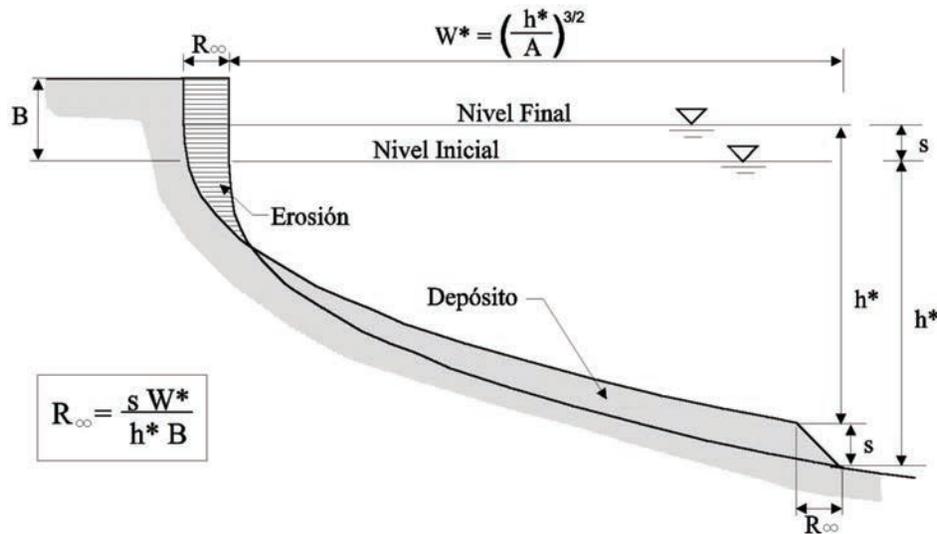
Más adelante se representarán la tasa anual de retroceso del perfil de playa para cada uno de los elementos del litoral, así como la probabilidad de exceder ciertos umbrales de erosión en los años horizonte de estudio.

4.2.3 Erosión del perfil de equilibrio por subida del nivel del mar

El estudio de la erosión en las playas es un problema complicado y específico de cada playa. Entre otros factores depende de las características físicas del sedimento, las condiciones locales de oleaje, batimetría de la costa y la orientación y configuración de la costa. Además, las playas presentan una variabilidad temporal marcada, ya que su forma no es fija a lo largo del tiempo sino que en función de la variación de diversos factores están en continuo cambio. No obstante, presentan una situación media, o también denominada de equilibrio dinámico, sobre la cual se producen variaciones temporales.

Respecto al perfil de equilibrio, es de general aplicación el perfil de Dean como forma de equilibrio de una playa en dirección transversal a la línea de costa. Para estudiar los cambios en el perfil se suele utilizar la regla de Bruun, que determina la erosión por cambios en el nivel del mar y la profundidad de cierre. Esta relación determina el orden de magnitud de la erosión a largo plazo debido al cambio climático en ausencia de otras fuentes de cambios morfodinámicos (Zhang y otros, 2004).

FIGURA 3.39
ESQUEMA DE LA REGLA DE BRUUN, CON PERFIL DE EQUILIBRIO DE LA PLAYA Y RETROCESO (R) DEBIDO A SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR (S)



Fuente: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas - Universidad de Cantabria (UC).

Para más detalles sobre las formulaciones consúltese el documento auxiliar 1 “Guía metodológica”.

La respuesta que puedan presentar las diferentes playas frente el aumento del nivel medio inducido por el cambio climático, puede ser cuantificado haciendo uso de la conocida Regla de Bruun, que establece que un ascenso del nivel medio del mar, $\Delta\eta$, provocará un retroceso del perfil de playa.

Con base en la formulación propuesta por Dean (1977) y en los diversos estudios existentes sobre la forma del perfil de las playas, se puede afirmar que la forma de un perfil de playa queda definida una vez conocida la velocidad de caída de grano de la arena que compone la playa, que es función del diámetro medio D_{50} y de la densidad del sedimento, siendo la forma del perfil independiente de los parámetros que definen el oleaje incidente en la playa.

Imponiendo como hipótesis que en el nuevo nivel del mar se establecerá un perfil de equilibrio con forma idéntica al existente antes del ascenso del nivel del mar y que el volumen de arena de la playa debe conservarse y asumiendo que la forma del perfil de equilibrio está determinada por la formulación de Dean (1977), y que la profundidad de cierre de la playa es la correspondiente a la dada por la formulación de Birkemeier (1985), se obtiene:

$$RE = \frac{\Delta\eta \cdot W_*}{h^* + B} = \Delta\eta \frac{(1,57 H_{S12})^{1,5}}{(0,51 w^{0,44})^{1,5} (1,57 H_{S12}) + B} \quad (3.6)$$

donde:

W_* = extensión del perfil (m), función del diámetro medio del sedimento, parametrizado por medio de la velocidad de caída del sedimento (w)

h^* = profundidad de cierre (m)

w = velocidad de caída del grano (m/s)

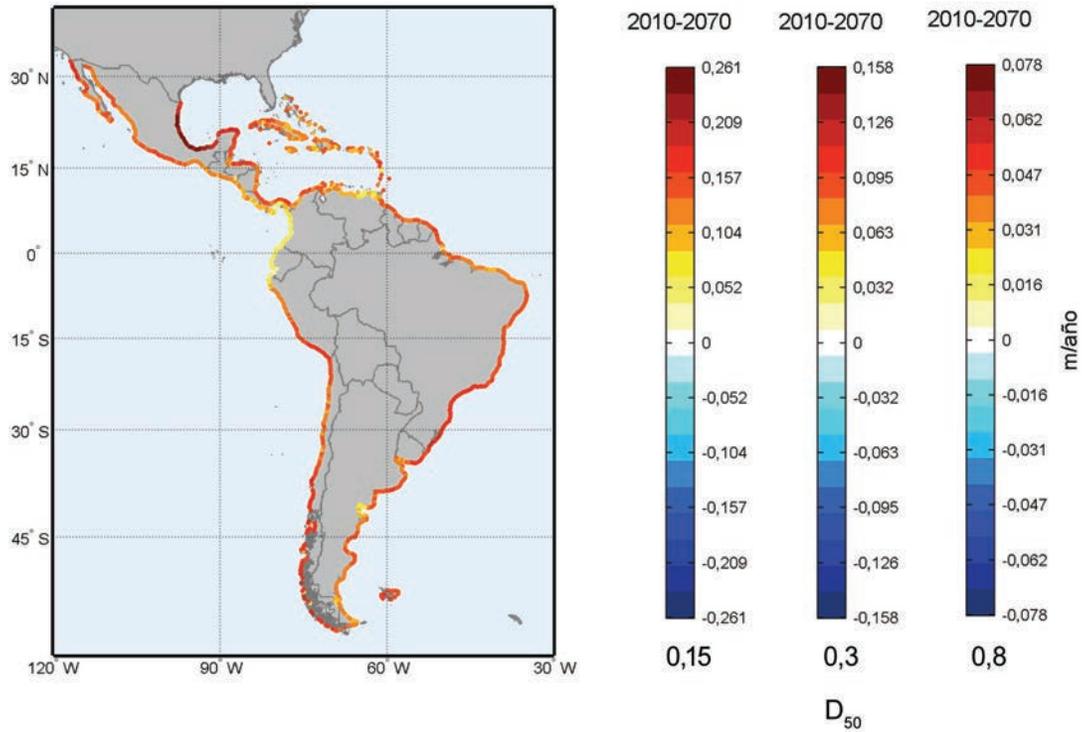
A partir de la formulación (3.6) se puede observar que el retroceso del perfil de playa es proporcional a la variación del nivel medio, de forma que cuanto mayor sea el aumento del nivel medio, mayor será el retroceso de una determinada playa. Además, el retroceso es función de la altura de ola que es superada 12 horas al año, de la velocidad de caída del grano w , es decir, del tamaño de grano D_{50} de la arena que constituye la playa, y de la altura de la berma de la playa, B .

De los múltiples estudios realizados sobre los perfiles de playa se puede concluir que el parámetro físico relevante en la forma del perfil de equilibrio en el parámetro A es el tamaño representativo del sedimento (D_{50}), siendo despreciables los efectos de la altura de ola y del resto de parámetros que definen el oleaje. Dada la enorme escala espacial que se considera en este estudio y a la falta de información sobre la distribución espacial de los sedimentos en las playas de ALyC, se ha realizado el cálculo para tres diámetros distintos con el fin de obtener una medida de las cotas superior e inferior de erosión en función del diámetro de la arena. Geológicamente, se pueden definir las arenas como aquel material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm. Para arenas de playas, se puede considerar como cotas inferior y superior 0,15 y 0,8 mm, respectivamente, mientras que el valor de 0,3 mm puede ser tomado como un valor promedio representativo. En vista de la gran influencia del tamaño de los sedimentos en la configuración del perfil se ha optado por analizar el retroceso de las playas en perfil considerando los tres diámetros anteriores (figura 3.40) aunque en el resto de los gráficos mostrados se representen los cálculos para el valor de 0,3 mm tomado como valor representativo con fines comparativos en la región. Los resultados para el diámetro de 0,15 mm se pueden adoptar en zonas donde la arena sea muy fina y, por el contrario, se puede aceptar las tendencias del diámetro de 0,8 mm en las playas donde la arena esté cercana a considerarse gravas.

A partir de las tendencias calculadas de ascenso del nivel del mar y variaciones de la altura de ola significativa superada 12 horas al año (H_{S12}), relacionada con la profundidad de cierre, el cambio de las dos variables se incluye conjuntamente en la formulación de erosión determinando la tendencia directamente de la serie temporal de erosión en perfil desde el año 1948.

Los resultados obtenidos muestran un mayor efecto en la costa Atlántica y Caribeña –figura 3.40–, con tasas en torno a 0,16 m de retroceso anual para el diámetro medio representativo (0,3 mm) variando desde 0,3 hasta 0,26 m/año para los otros dos tipos de sedimento contemplados. Merece la pena destacar que en el conjunto de la región se obtienen tasas de erosión positivas (retroceso) debido al efecto combinado del ascenso del nivel del mar (generalizado) y aumento de H_{S12} (en algunas zonas descende aunque levemente, véanse documentos anteriores). También se obtienen tasas altas de erosión en las costas del sur del Brasil y sur de Chile.

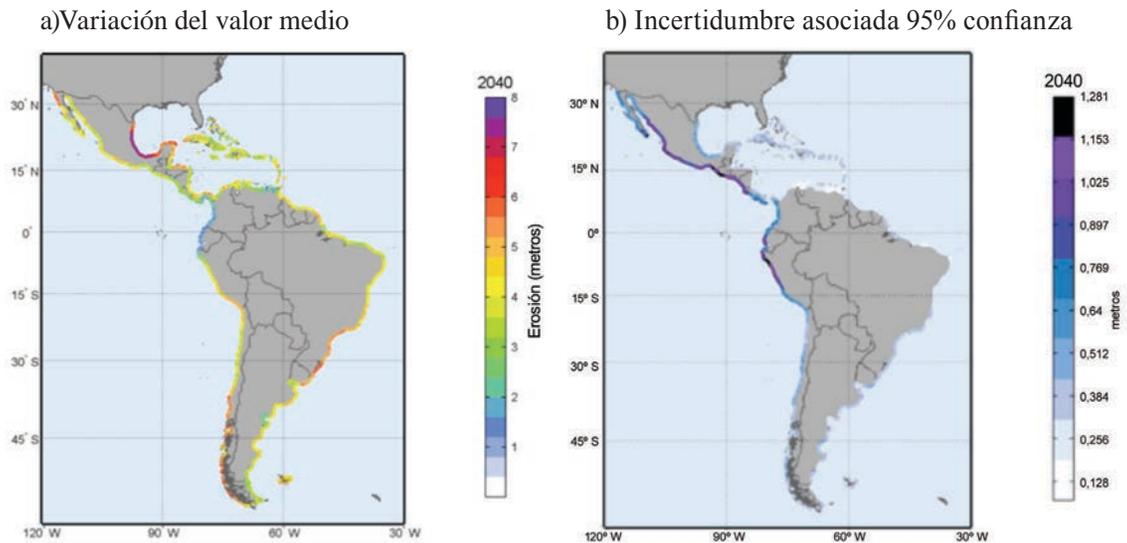
FIGURA 3.40
TENDENCIA MEDIA DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS POR CAMBIOS
EN EL PERFIL DE EQUILIBRIO ENTRE 2010 Y 2070
(Metros/año)



Fuente: Elaboración propia.

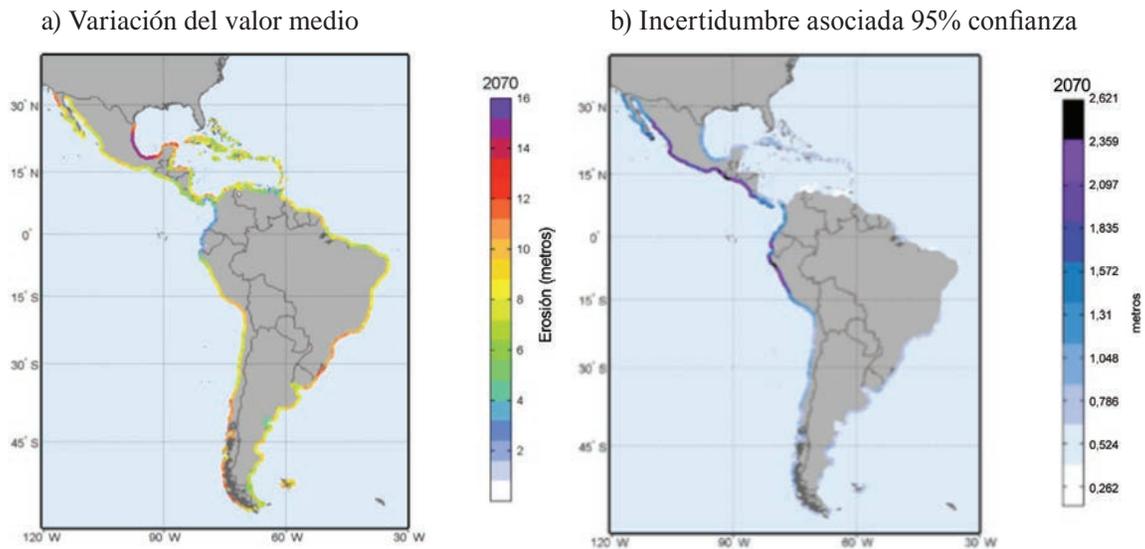
Como valores medios, se podría esperar un retroceso de las playas en el golfo de México de alrededor de 8 m en el año 2040 y de hasta 16 m en el 2070, con una incertidumbre de alrededor de 1 y 1,5 m, respectivamente. En el resto de la región los retrocesos esperables son menores salvo en el sur del Brasil y norte del Uruguay con valores en torno a los 5,5 y 11 m, con incertidumbres por debajo de 1 m.

FIGURA 3.41
EROSIÓN DE LAS PLAYAS POR CAMBIOS EN EL PERFIL DE EQUILIBRIO EN 2040
 (Metros)



Fuente: Elaboración propia.

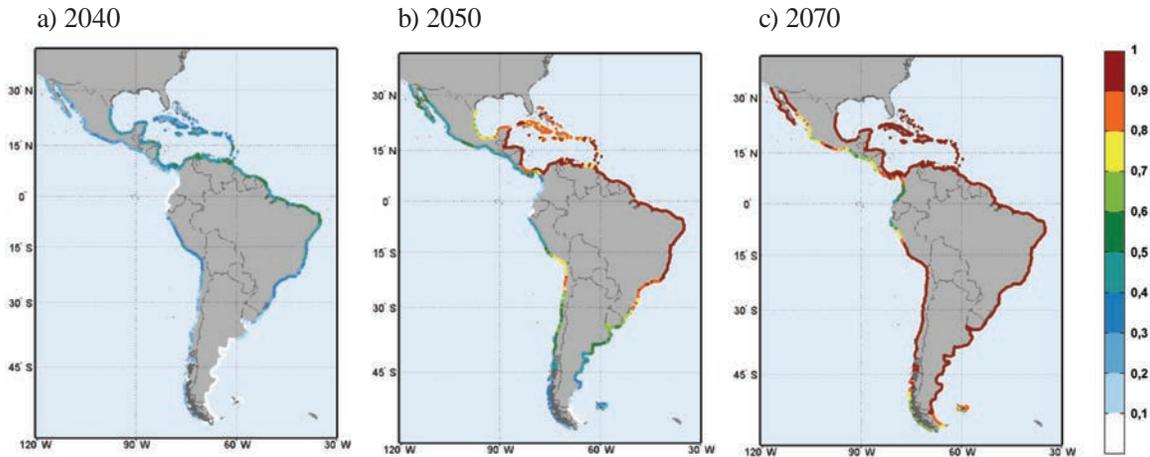
FIGURA 3.42
VARIACION DE LA EROSIÓN DE LAS PLAYAS, POR CAMBIOS EN EL PERFIL DE EQUILIBRIO EN 2070
 (Metros)



Fuente: Elaboración propia.

Bajo estas hipótesis, las zonas más castigadas serían el Caribe Norte y las costas al sur de Brasil hasta el Río de la Plata. Además, la erosión es generalizada especialmente en toda la región en caso de un ascenso del nivel del mar.

FIGURA 3.43
PROBABILIDAD DE QUE LA EROSIÓN SUPERE 5 M EN 2040, 2050 Y 2070

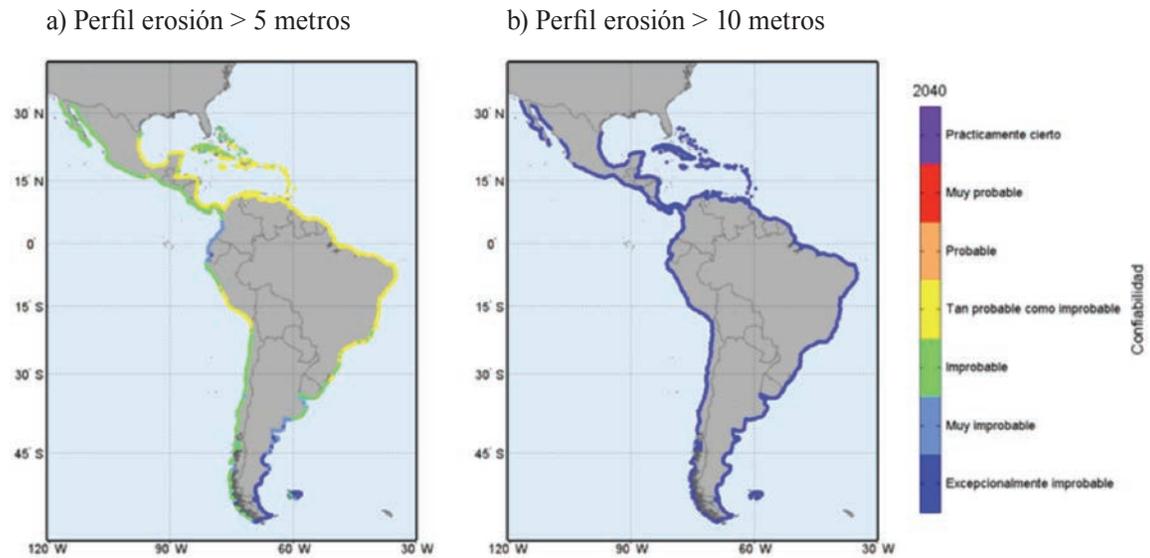


Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que en los resultados anteriores, de manera simplificada, se cumple la regla aproximada de que el retroceso sea 50 veces la subida del nivel del mar (aunque este factor depende del tamaño de grano, la altura de la berma y de las condiciones de oleaje y pese a que en este análisis se ha incluido la variabilidad del oleaje en las costas $-H_{S12}$ — se cumple en gran medida esta regla). Estos aumentos están directamente condicionados por la extrapolación de la tasa de aumento del nivel del mar, que como se vio en documentos anteriores, es suave y alcanzaría del orden de 0,3 m aproximadamente para 2070. La situación sería muy distinta de considerar aumentos del nivel del mar de 1 m o superiores.

La figura 3.44 representa el grado de confianza (escala IPCC) de superar los umbrales de 5 y 10 m de erosión por cambios en el nivel del mar. Mientras que cambios entre 5 y 10 m son *tan probables como improbables* (probabilidades entre 0,33 y 0,66), por encima de 10 m se pueden considerar *excepcionalmente improbables* por esta causa.

FIGURA 3.44
GRADO DE CONFIANZA DE SUPERAR 5 Y 10 M DE EROSIÓN EN EL AÑO 2040
POR SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

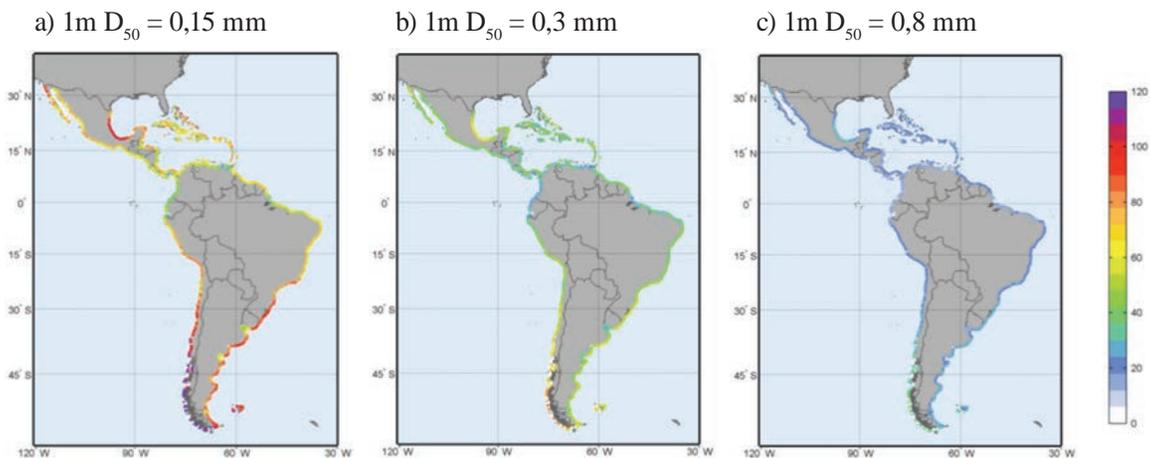


Fuente: Elaboración propia.

Nota: El grado de confianza es en la escala del IPCC y las leyenda de probabilidades son las siguientes: >0,99, prácticamente cierto; 0,9-0,99, muy probable; 0,66-0,9, probable; 0,33-0,66, tan probable como improbable; 0,1-0,33, improbable; 0,01-0,1, muy improbable; <0,01, excepcionalmente improbable.

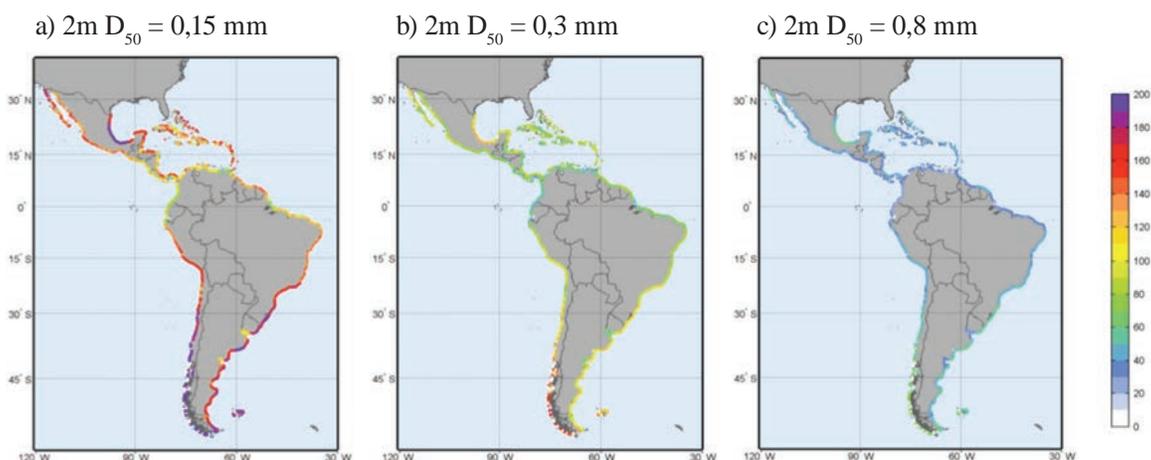
Para un ascenso del nivel del mar de 1 m o incluso 2 m, los resultados son bien distintos en magnitud –figura 3.45 y figura 3.46–, puesto que se contemplarían erosiones en torno a 20, 40 por encima de 60 m para los distintos diámetros de sedimentos considerados. Los resultados son mucho mayores para ascensos de 2 m. La variabilidad de los resultados en estos casos depende exclusivamente de las distintas condiciones de oleaje en cada zona de la región.

FIGURA 3.45
EROSIÓN MEDIA EN PLAYAS DE DIVERSOS DIÁMETROS DE GRANO
CON UNA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR DE 1 M
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.46
EROSIÓN MEDIA EN PLAYAS DE DIVERSOS DIÁMETROS DE GRANO CON UNA
SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR DE 2 M
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 3.16 aporta resultados de la erosión esperable para varias localizaciones de la región para los cinco primeros escenarios (tendencias estadísticas y ascenso de 0,5 m y 1 m). En una situación de ascenso del nivel del mar mayor que los escenarios del AR4, los impactos sobre las playas estarán en el orden de magnitud de los 50 m de retroceso, de manera general.

CUADRO 3.16
EROSIÓN MEDIA ESPERABLE PARA VARIAS LOCALIZACIONES EN ALYC
(Metros)

(Cálculo para una playa tipo con $D_{50}=0,3\text{mm}$ y berma de 1 m)							
	Longitud	Latitud	A	B	C	D	E
			2040	2050	2070	0,5 m	1 m
Río de Janeiro (BRA)	-43,23	-22,99	4,64	6,18	9,28	24,62	49,24
Santos (BRA)	-46,24	-23,93	4,26	5,67	8,51	14,78	29,56
Montevideo (URY)	-56,00	-34,86	4,65	6,20	9,30	21,17	42,34
Concepción (CHL)	-73,09	-36,83	3,58	4,78	7,17	18,18	36,36
Valparaíso (CHL)	-71,63	-32,96	4,04	5,39	8,08	17,49	34,99
Arica (CHL)	-70,45	-18,38	4,85	6,47	9,70	20,41	40,83
Chorrillos (PER)	-77,04	-12,09	5,20	6,93	10,39	23,95	47,89
Talara (PER)	-81,26	-4,63	4,18	5,57	8,35	20,53	41,06
Machala (ECU)	-80,28	-3,40	3,99	5,31	7,97	19,84	39,69
La Libertad (ECU)	-80,78	-2,36	3,92	5,22	7,83	17,08	34,16
Bahía Solano (COL)	-77,38	6,05	3,97	5,30	7,94	18,79	37,59
Los Santos (PAN)	-80,26	7,34	3,92	5,22	7,84	20,60	41,20
S.Jose (CRI)	-83,97	9,29	5,09	6,79	10,18	21,00	42,00
Acapulco (MEX)	-99,73	16,78	4,64	6,19	9,29	19,28	38,55
Ensenada (MEX)	-116,69	31,74	5,75	7,66	11,49	17,40	34,80

(continúa)

(conclusión)

(Cálculo para una playa tipo con $D_{50}=0,3\text{mm}$ y berma de 1 m)							
	Longitud	Latitud	A	B	C	D	E
			2040	2050	2070	0,5 m	1 m
Cabo (MEX)	-109,85	22,98	3,86	5,14	7,72	28,24	56,49
Veracruz (MEX)	-96,02	19,05	3,47	4,63	6,94	25,20	50,40
Cancún (MEX)	-86,85	21,04	4,54	6,06	9,08	28,80	57,60
Caracas (VEN)	-67,02	10,59	1,62	2,16	3,25	17,35	34,71
Georgetown (GUY)	-57,95	6,70	1,55	2,07	3,11	14,84	29,68
Fortaleza (BRA)	-38,49	-3,81	4,89	6,51	9,77	18,48	36,96
Maceio (BRA)	-35,60	-9,52	7,55	10,07	15,10	30,90	61,80
P.Segura (BRA)	-39,00	-16,28	5,95	7,93	11,90	24,73	49,47
P.Sta Cruz (ARG)	-68,26	-50,14	4,21	5,61	8,41	18,87	37,74
I. Taggart (CHL)	-75,58	-49,45	2,74	3,65	5,47	27,95	55,90

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Erosión del perfil de equilibrio por aumento de la altura de ola

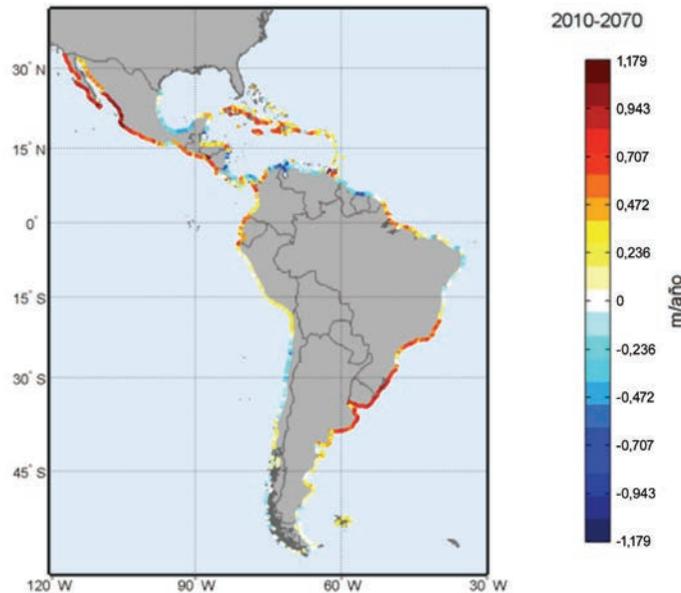
Un aspecto importante a tener en cuenta al analizar los efectos del cambio climático en las playas está altamente relacionado con la interrelación del perfil y la planta. Este hecho es muy importante en playas encajadas colmatadas de arena donde los límites laterales, tales como diques y cabos, determinan el máximo crecimiento de la playa encajada. El valor medio anual de la profundidad de corte (definida en apartados anteriores como h^*), y que está relacionada con la zona activa de transporte sedimentario, depende de la altura de ola que es superada 12 horas al año (H_{S12}), de la sucesión de los temporales y de la persistencia de los mismos. Si el cambio climático produjese una variación en alguno de los parámetros mencionados y la profundidad de corte del perfil de playa se viese reducida, los límites laterales podrían permitir un aumento de la extensión de la playa, de forma que si en el mar exterior existiese material sedimentario que pudiese ser transportado por asimetría del oleaje hacia la playa, la extensión transversal de la misma aumentaría. Por el contrario, si se produjese un aumento de la profundidad de cierre de la playa, los límites laterales de este tipo de playas no serían capaces de contener la extensión de playa seca actual, por lo que se produciría una erosión general de la playa. Dicho retroceso, o en su caso avance, puede ser estimado considerando el perfil de Dean (1977), ya que al no cambiar el tamaño de grano, la forma del perfil no cambiará. Lo único que cambiará es el límite mar adentro del perfil de playa.

El retroceso RE vendrá dado por la diferencia entre la extensión transversal del perfil activo futuro y la extensión actual (ver detalles en el documento auxiliar 1 “Guía metodológica”), lo cual está íntimamente ligado con la variación en el oleaje que tal y como se ha visto en el documento 1 (“Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”), éste está cambiando. La formulación indica que cuanto mayor es la altura de ola significativa incidente en la playa y menor el tamaño del sedimento que compone la playa, mayor es el retroceso; es decir, el efecto del aumento de la profundidad de corte generará un retroceso general de la playa, siempre y cuando la playa esté colmatada de arena. Este retroceso será más importante en las playas disipativas.

Como se observa en las tendencias obtenidas –figura 3.47– el patrón de cambio es homotético del cambio en alturas de ola H_{S12} . Los cambios esperables son mucho mayores por esta causa que los obtenidos en la tendencia de cambio del nivel del mar. No obstante, el estudio de este factor es más delicado que la formulación de Bruun para el cambio en el perfil puesto que depende enormemente de

las características concretas (locales) de cada tramo de playa y del transporte de sedimentos general. No obstante, el análisis sirve de advertencia y de diagnóstico de los posibles cambios para identificar las zonas con mayor probabilidad de erosión por cambios en el oleaje.

FIGURA 3.47
TASA DE EROSIÓN MEDIA EN PLAYAS TENIENDO EN CUENTA LA MODIFICACIÓN
DEL PERFIL POR CAMBIOS EN LA PROFUNDIDAD DE CIERRE ENTRE 2010 Y 2070
(Metros /año)



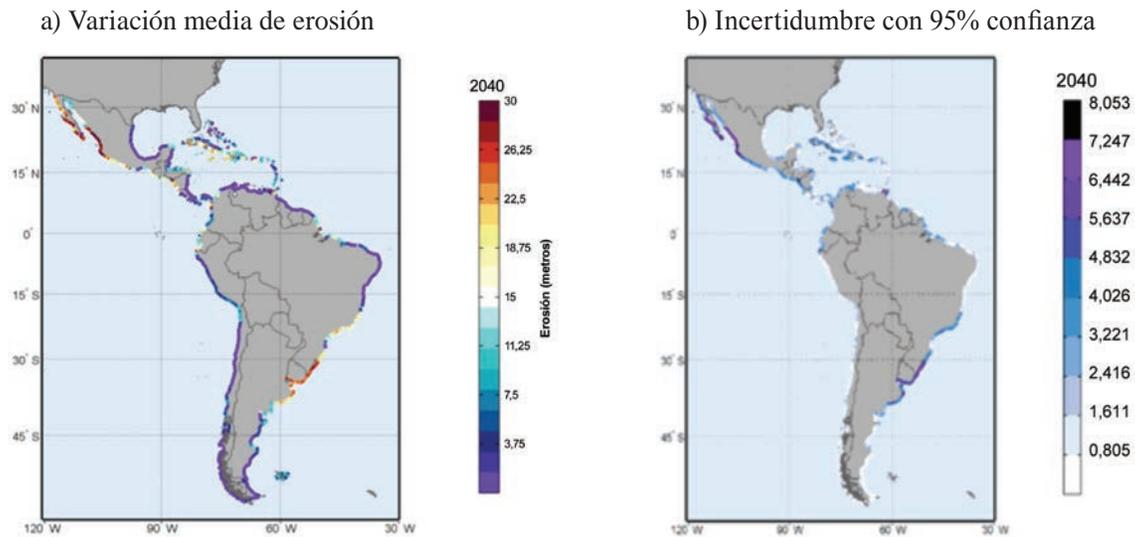
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se analizó la tasa de erosión para un diámetro representativo de 0,8 mm.

Por extrapolación de estos cambios, se obtendrían valores de erosión por encima de 25 m en las costas del sur de Brasil, Uruguay y oeste de México. En puntos de las islas caribeñas se alcanzarían retrocesos entre 10 y 20 m –figura 3.48–.

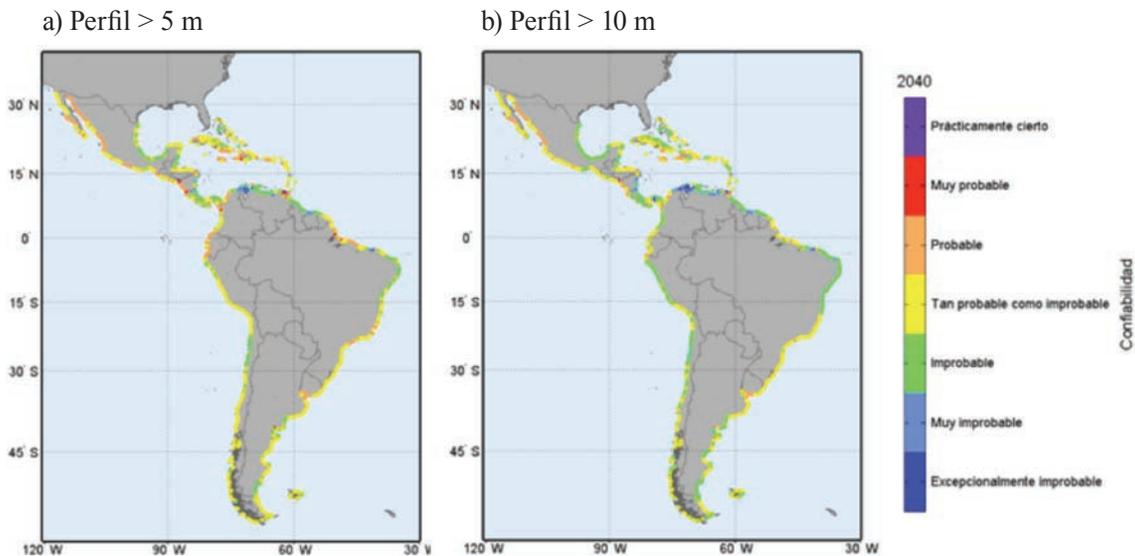
La figura 3.49 muestra el grado de confianza IPCC de superar 5 y 10 m de erosión por cambios en las alturas de ola. En contraste a lo que ocurre con el nivel del mar (figura 3.44), gran parte de la región está sometida a aumentos *tan probables como improbables* (probabilidades entre 0,33 y 0,66) en el rango entre 5 y 10 m. Si bien, en diversas partes de centroamérica y oeste de México los cambios son *probables* e incluso *muy probables* en las costas sur de las islas caribeñas.

FIGURA 3.48
EROSIÓN MEDIA E INCERTIDUMBRE A PARTIR DE CAMBIOS EN LA PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL DE LAS PLAYAS EN 2040 PARA EL ESCENARIO A
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.
 Nota: Los resultados son para un diámetro de grano homogéneo.

FIGURA 3.49
GRADO DE CONFIANZA EN ESCALA DEL IPCC DE SUPERAR 5 Y 10 M DE EROSIÓN
EN EL AÑO 2040 POR CAMBIOS EN LA PROFUNDIDAD DE CIERRE DEL PERFIL



Fuente: Elaboración propia.
 Nota: Las leyendas de probabilidades son las siguientes: >0,99, prácticamente cierto; 0,9-0,99, muy probable; 0,66-0,9, probable; 0,33-0,66, tan probable como improbable; 0,1-0,33, improbable; 0,01-0,1, muy improbable; <0,01, excepcionalmente improbable).

4.2.5 Erosión en playas por cambios en la planta de equilibrio

Las hipótesis en las que se basa el análisis a largo plazo de la forma en planta de una playa son dos: la ortogonalidad entre perfil y planta (implica que el estudio se puede independizar en el análisis de ambas partes) y la diferente escala temporal de los procesos perfil-planta. Esta diferente escala temporal de los procesos da lugar a que en los estudios de forma en planta se asuma que el perfil de playa siempre ha alcanzado su posición de equilibrio. De este modo, la evolución a largo plazo de la forma en planta de una playa se realiza manteniendo constante la forma del perfil.

Dentro del análisis del equilibrio de la forma en planta de una playa a largo plazo cabe distinguir los siguientes casos:

- Playas en equilibrio estático (transporte longitudinal nulo).
- Playas en equilibrio dinámico o en desequilibrio (transporte longitudinal no nulo).

La variabilidad de las condiciones del oleaje en periodos más cortos de tiempo (años o incluso meses) define la forma en planta de una playa en un momento concreto, pero a largo plazo, esta variabilidad oscila sobre una posición promedio o de largo plazo que se puede considerar de equilibrio.

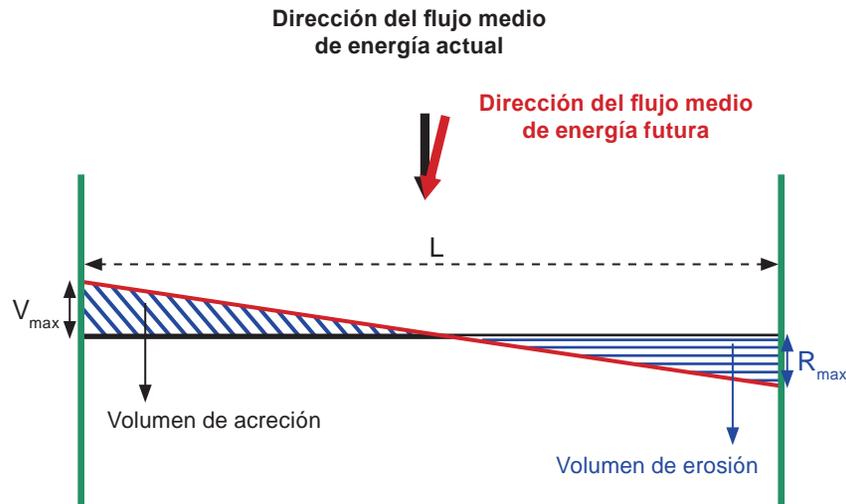
La playa tendrá, por tanto, una posición de equilibrio modal, con oscilaciones alrededor de dicha posición media. Estas oscilaciones son, por lo general, débiles salvo que exista una marcada direccionalidad estacional del oleaje. En cualquier caso, el análisis de los efectos que el cambio climático pueda acarrear en la forma en planta de las playas, se centrará en los efectos a largo plazo, es decir, en los efectos en la posición media anual.

La forma en planta de estas playas está gobernada por la dirección del flujo medio de energía asociada al oleaje incidente en la playa. Si este parámetro se ve modificado la playa sufrirá un giro para que la forma en planta de la playa se vuelva a disponer paralelamente a los frentes de oleaje, es decir, perpendicular a la dirección del flujo medio de energía. Este giro, y dependiendo de si la playa está o no colmatada, se manifestará en un futuro avance o erosión.

En este apartado se analiza el retroceso o avance que experimentarán las playas rectilíneas en equilibrio estático no colmatadas de arena ante un hipotético cambio en la dirección del flujo medio de energía. Para ello se asume que los límites laterales de la playa son capaces de contener la playa sea cual sea el futuro avance, y que además, como ocurre en la actualidad, no existe ningún aporte de arena desde el mar exterior o desde los contornos de la playa.

Si por el efecto del cambio climático se produce una variación en la dirección del flujo medio de energía, la playa cambiará de orientación. Este cambio en la orientación vendrá acompañado por un futuro avance y retroceso de la playa, de forma que el volumen de arena erosionado sea equivalente al volumen de arena depositado en el frente de la playa (figura 3.50).

FIGURA 3.50
EFFECTO DEL CAMBIO DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA EN LAS PLAYAS RECTILÍNEAS EN EQUILIBRIO ESTÁTICO NO COLMATADAS DE ARENA



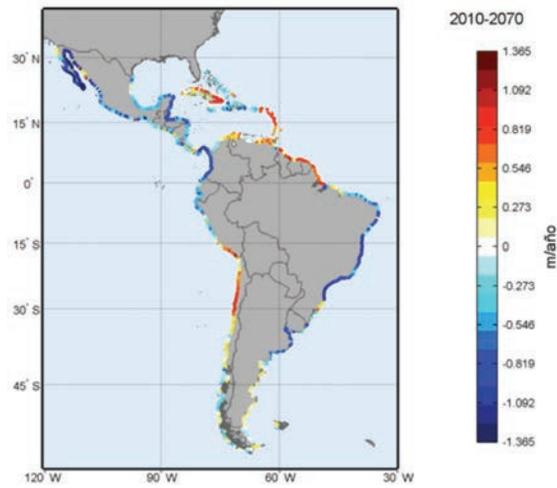
Fuente: Elaboración propia.

El máximo retroceso y avance de la playa se producirá en los extremos de las playas y su valor dependerá de la variación de la dirección del flujo medio de energía y de la longitud de la playa, de forma aproximada (véase documento auxiliar “Efectos teóricos” para una explicación en detalle), a partir de la ecuación:

$$RE_{\max} = \frac{L}{2} \operatorname{tg}(\Delta\beta) \quad (3.7)$$

En la figura 3.51 se muestra la tasa de cambio por giro en la planta de las playas obtenida. Como se aprecia, los mayores cambios se producirían en las costas del sur del Brasil (por encima de 1 m/año), costas caribeñas (especialmente este de Cuba e islas orientales), parte de la costa de Chile y costa noroeste de México; ésta también con valores por encima de 1 m de erosión anual de media. La extrapolación de estos resultados al año 2040 (escenario de estudio A) darían valores de erosión de hasta 40 m.

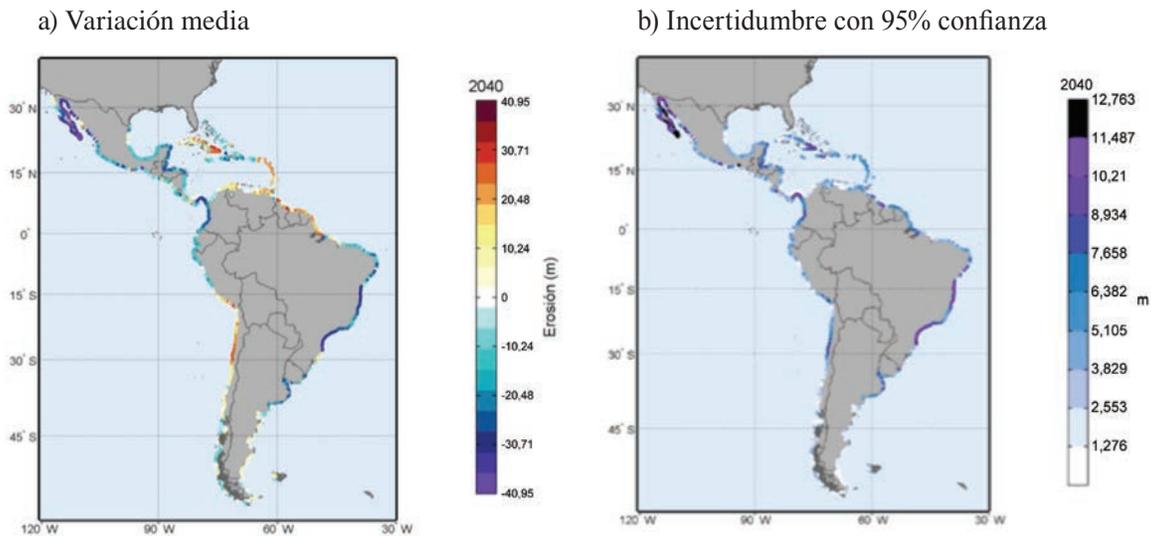
FIGURA 3.51
TENDENCIA MEDIA DE EROSIÓN EN LAS PLAYAS POR CAMBIOS EN LA PLANTA DE EQUILIBRIO ENTRE 2010 Y 2070
(Metros/año)



Fuente: Elaboración propia.

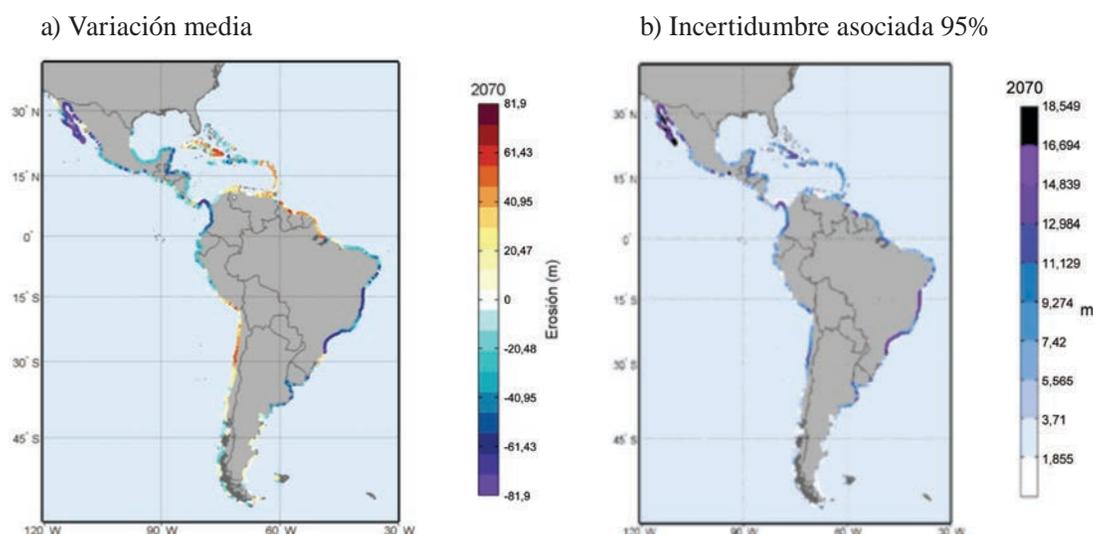
Comparando estos resultados con las zonas con más presencia de playas encajadas y, por tanto, susceptibles a este tipo de erosión (véase figura 3.37) se comprueba que las zonas del Brasil, las costas caribeñas orientales y Chile, así como una parte pequeña de México, serían las más impactadas dado que presentan más cantidad de playas con esta tipología.

FIGURA 3.52
EROSIÓN DE LAS PLAYAS EN 2040 POR CAMBIOS EN LA PLANTA DE EQUILIBRIO
(Metros)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.53
EROSIÓN DE LAS PLAYAS EN 2070 POR CAMBIOS EN LA PLANTA DE EQUILIBRIO
 (Metros)

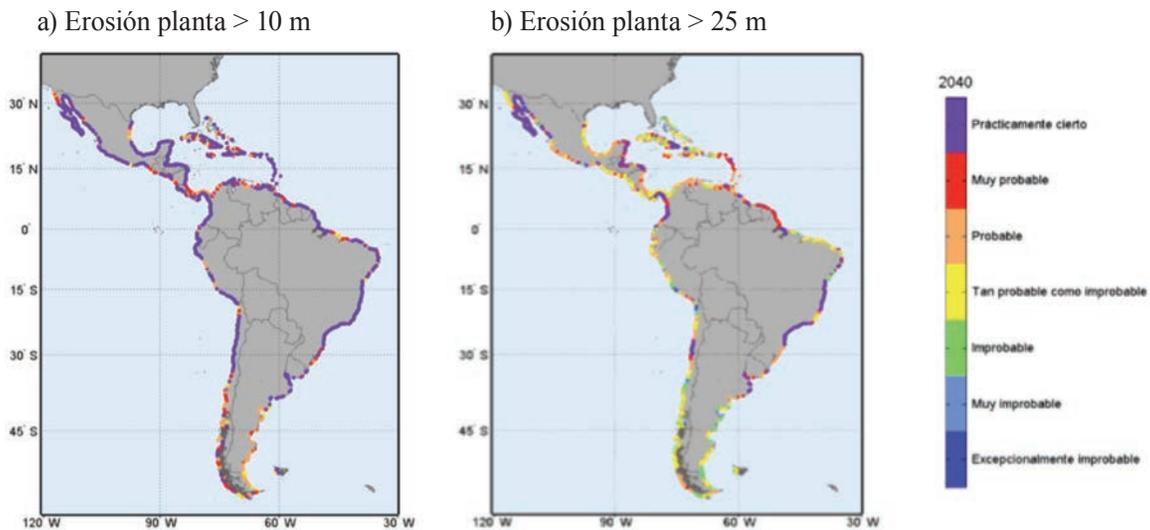


Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.54 muestra el grado de confianza del IPCC de superar 10 y 25 m en el año 2040 por cambios en la dirección del oleaje y el giro de las playas inducido. Tal y como se puede observar, los cambios son de un orden de magnitud superior a los obtenidos por cambios en el nivel del mar y en las alturas de ola, estando en este caso en el orden de las decenas de metros. Si bien, cambios por encima de 10 m de erosión son *prácticamente ciertos* en todas las playas susceptibles de giro en la región, cambios por encima de 25 m son *muy probables* en las costas Este de centroamérica, islas caribeñas y partes de Chile y Uruguay. Son también *probables* cambios por encima de esta magnitud en extensas partes de la costa Pacífica y caribeña.

Este tipo de erosión tan sólo se da en un tipo de playas muy concreto, pero el orden de magnitud de la erosión esperable es muy superior a la obtenida por el impacto del nivel del mar a la vista de los anteriores resultados. En otros tipos de playas, el efecto en el cambio en la dirección del oleaje provocará un cambio en el régimen de transporte de sedimentos, con implicaciones en la erosión de la línea de costa, pero no son evaluables por medio de la formulación de este apartado, siendo el fenómeno de una escala espacial mucho mayor y determinado por condicionantes locales.

FIGURA 3.54
GRADO DE CONFIANZA DE SUPERAR 10 M Y 25 M DE EROSIÓN EN EL AÑO 2040
ANTE CAMBIOS EN LA DIRECCIÓN DEL OLEAJE INCIDENTE



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La escala usada es la del IPCC y las leyendas de probabilidades son las siguientes: >0,99, prácticamente cierto; 0,9-0,99, muy probable; 0,66-0,9, probable; 0,33-0,66, tan probable como improbable; 0,1-0,33, improbable; 0,01-0,1, muy improbable; <0,01, excepcionalmente improbable).

4.2.6 Transporte potencial de sedimentos

Las variaciones en el transporte del sedimento, pueden ser generadas por:

- Variaciones en la altura de ola en rotura.
- Variaciones en la profundidad de rotura.
- Variaciones del ángulo de incidencia del oleaje en rotura.

El volumen de material sólido transportado por unidad de tiempo se puede obtener mediante la fórmula del transporte sólido del CERC (véase documento auxiliar “Guía metodológica”) para una descripción más detallada), en función de la oblicuidad del oleaje:

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho) g \lambda} \frac{1}{16} \rho g^{3/2} H_b^{5/2} \gamma^{-1/2} \text{sen} 2\alpha_b \quad (3.8)$$

Esta ecuación sólo incluye el término de transporte litoral por oblicuidad del oleaje.

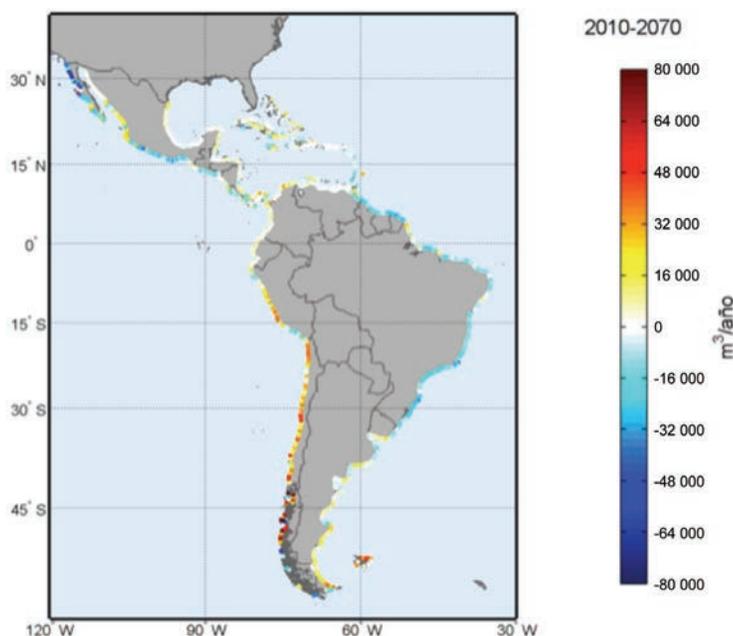
De los tres parámetros involucrados, cuya variación puede inducir cambios en el transporte, los dos primeros están relacionados a partir del índice de rotura:

$$h_b = \frac{H_b}{\gamma} \quad (3.9)$$

la tasa de cambio obtenida se muestra a continuación –figura 3.55–. Los resultados muestran cambios de transporte potencial importantes en las costas de Brasil, Guyana, Suriname, Guayana

Francesa y norte de México. En Perú y Chile se obtienen tasas positivas de transporte lo que indica que la incidencia del oleaje (especialmente asociado a eventos muy energéticos) tiende a transportar el sedimento hacia el sur. El impacto esperado por transporte de sedimentos es de especial relevancia en las zonas donde tasas altas de transporte potencial coincidan con gran disponibilidad de sedimento (véase figura 3.36) como las costas del Brasil, islas caribeñas, México, Costa Rica y norte del Perú.

FIGURA 3.55
TENDENCIA DE CAMBIO EN EL TRANSPORTE POTENCIAL DE SEDIMENTOS
(m³/año)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El signo positivo indica en sentido sur.

4.2.7 Conclusiones generales de los impactos sobre las playas de la región

Del análisis realizado sobre los posibles efectos del cambio climático en la morfología de las playas cabe destacar lo siguiente:

- Un aumento del nivel medio genera un déficit de arena en el perfil activo de playa, que es compensado mediante la erosión de la parte superior del perfil, dando lugar a un retroceso de la playa. Dicho retroceso es mayor, cuanto menor es el tamaño medio del sedimento que compone la playa y cuanto menor es la altura de la berma.
- La variación de la altura de ola significativa que es excedida 12 horas al año, H_{S12} , modifica la profundidad de corte de las playas, de forma que si este parámetro sufre un aumento también lo hará la variable h^* . Asimismo, el aumento de la profundidad de corte puede traducirse en una futura erosión para el caso de las playas colmatadas de arena.
- En cuanto a la dirección del flujo medio de energía, cabe destacar que es este parámetro el que gobierna la forma en planta de equilibrio de las playas y que una variación de este parámetro se traducirá en un retroceso o avance de la línea de playa.

- Por otro lado, en las playas sometidas a un transporte litoral de sedimentos, el transporte potencial puede verse modificado por variaciones en la dirección del flujo medio de energía del oleaje. No obstante, para que se produzca una variación en la posición de la línea de costa, lo que debe verse modificado es el gradiente del transporte potencial de sedimento.

En un estudio de la erosión en las costas es de vital importancia determinar la configuración de la costa y la tipología de las playas ya que los procesos que definen la erosión varían en cada situación.

Existe una doble dimensión de un análisis sobre erosión en la costa en la región. Por un lado, existen países con gran longitud de playas sin desarrollo urbano inmediatamente tras de sí, mientras que en otros países, la longitud de frente urbano en primera línea de costa es comparable a la longitud de playas (en gran parte coincidente con zonas urbanizadas). Por tanto, será necesario analizar esta dualidad funcional en el estudio analizando, por un lado, la función de las playas como recurso ecológico y turístico (uso recreativo) y, por otro lado, la función que representan como obra de defensa marítima (uso defensivo).

Respecto a la tipología, las playas rectilíneas dominan y configuran la mayor parte de las costas de México, especialmente en el golfo de México, y desde el sur del Brasil hasta el sur del continente, con otras zonas aisladas a lo largo de toda la región de ALyC. Las playas encajadas dominan en las costas de Chile, sur del Brasil e islas caribeñas.

Se ha estudiado la afección del cambio en el nivel del mar y la intensidad y dirección del oleaje sobre el perfil y la planta de las playas:

Erosión del perfil de equilibrio por subida del nivel del mar

- Los resultados obtenidos muestran un mayor efecto en la costa Atlántica y Caribeña, con tasas en torno a 0,16 m de retroceso anual para el diámetro medio representativo (0,3 mm) variando desde 0,3 hasta 0,26 m/año para los otros dos tipos de sedimento contemplados. Merece la pena destacar que en el conjunto de la región se obtienen tasas de erosión debido al efecto combinado del ascenso del nivel del mar (generalizado) y aumento del oleaje. También se obtienen tasas altas de erosión en las costas del sur del Brasil y sur de Chile. Como valores medios, se podría esperar un retroceso de las playas en el golfo de México de alrededor de 8 m en el año 2040 y de hasta 16 m en el 2070, con una incertidumbre pequeña (en torno a 1,5 m). En el resto de la región los retrocesos esperables son menores salvo en el sur del Brasil y norte del Uruguay con valores en torno a los 5,5 y 11 m, con incertidumbres por debajo de 1 m.
- Bajo estas hipótesis, las zonas más castigadas serían el Caribe Norte y las costas al sur del Brasil hasta el Río de la Plata. Además, la erosión es generalizada espacialmente en toda la región en caso de un ascenso del nivel del mar.
- Valores de erosión entre 5 y 10 m por cambios en el nivel del mar son *tan probables como improbables* (probabilidades entre 0,33 y 0,66). Cambios por encima de 10 m se pueden considerar *excepcionalmente improbables* por esta causa en la región de forma generalizada.
- Para un ascenso del nivel del mar de 1 m (o incluso 2 m), los resultados son bien distintos en magnitud puesto que se contemplarían erosiones en torno a 20, 40 y por encima de 60 m para los distintos diámetros de sedimentos considerados. Los resultados son mucho mayores para ascensos de 2 m. Obsérvese que para un ascenso del nivel del mar homogéneo en la región, la variabilidad de los resultados en estos casos depende exclusivamente de las distintas condiciones de oleaje en cada zona.

Erosión del perfil de equilibrio por aumento de la altura de ola

- Los cambios en las alturas de ola (H_{s12}) pueden provocar erosiones por cambios en el perfil de las playas cuyos efectos son mucho mayores por el cambio del nivel del mar (cambios hasta superiores a 1 m/año). No obstante, el estudio de este factor es más delicado puesto que depende enormemente de las características concretas (locales) de cada tramo de playa y del transporte de sedimentos general. No obstante, el análisis sirve de advertencia y de diagnóstico de los posibles cambios para identificar las zonas con mayor probabilidad de erosión por cambios en el oleaje.
- Por extrapolación de estos cambios, se obtendrían valores de erosión para el año horizonte 2040 por encima de 25 ± 8 m en las costas del sur de Brasil, Uruguay y oeste de México. En puntos de las islas caribeñas se alcanzarían retrocesos medios entre 8 a 10 m, en general, con incertidumbres asociadas de aproximadamente 5 m.
- Superar 5 y 10 m de erosión por cambios en las alturas de ola se puede considerar como *tan probable como improbable* (probabilidades entre 0,33 y 0,66), en contraste a lo que ocurre con el nivel del mar. Si bien, en diversas partes de Centroamérica y oeste de México cambios por encima de 10 m son *probables* e incluso *muy probables* en las costas sur de las islas caribeñas.

Erosión en playas por cambios en la planta de equilibrio

- Como se aprecia, los mayores cambios por giro en la planta de las playas se producirían en las costas de sur del Brasil (por encima de 1 m/año), costas caribeñas (especialmente Este de Cuba e islas orientales), parte de la costa de Chile y costa noroeste de México, ésta también con valores por encima de 1 m de erosión anual de media.
- La extrapolación de estos resultados al año 2040 daría valores de erosión de $30 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$ en las costas del Brasil, $20 \pm 8 \text{ m}$ en la costa tropical Atlántica, de 10 a $20 \pm 8 \text{ m}$ en el Pacífico tropical y de $20 \pm 8 \text{ m}$ en el norte de Chile.
- Analizando el grado de confianza IPCC de superar 10 y 25 m en el año 2040 por cambios en la dirección del oleaje y el giro de las playas inducido se puede concluir que los cambios esperables son de un orden de magnitud superior a los obtenidos por cambios en el nivel del mar y en las alturas de ola, estando en este caso en el orden de las decenas de metros. Si bien, cambios por encima de 10 m de erosión son *prácticamente ciertos* en todas las playas susceptibles de giro, cambios por encima de 25 m son *muy probables* en las costas del Este de centroamérica, islas caribeñas y partes de Chile y Uruguay. Son también *probables* cambios por encima de esta magnitud en extensas partes de la costa Pacífica y caribeña.
- Comparando estos resultados con las zonas con más presencia de playas encajadas y por tanto susceptibles de ser afectados por este tipo de erosión se comprueba que las zonas del Brasil, las costas caribeñas orientales y Chile, así como una parte pequeña de México, serían las más impactadas dado que presentan más cantidad de playas con esta tipología.

Transporte de sedimentos

- Tanto el ángulo de incidencia del oleaje, como la altura de ola en rotura se están viendo afectados por el cambio climático, por lo que es necesario evaluar el transporte potencial (en condiciones de disponibilidad total de sedimento) para cuantificar las variaciones del transporte neto del sedimento litoral. Los resultados muestran cambios de transporte potencial importantes en las costas de Brasil, Guyana, Suriname, Guayana Francesa, norte de México, Perú y Chile.

- El impacto esperado por transporte de sedimentos es de especial relevancia en las zonas donde tasas altas de transporte potencial coincidan con gran disponibilidad de sedimento como las costas de Brasil, islas caribeñas, México, Costa Rica y norte de Perú.

4.3 Impactos en los puertos

4.3.1 Impactos en la operatividad de los puertos

4.3.1.1 Concepto de operatividad

La operatividad de los puertos se define como el valor complementario de la probabilidad de parada en la fase de proyecto frente a todos los modos de parada principales adscritos a todos los estados límite de parada (ROM 0.0 – Ministerio de Fomento de España).

Varios son los factores físicos que pueden hacer que un puerto deje de ser operativo, entre ellos: el viento, el rebase sobre las obras de defensa, las corrientes o la agitación interior por efectos de onda larga. Evaluar las condiciones límite de los distintos factores que implican la parada del puerto es una tarea compleja y específica para cada puerto. Por la escala del estudio y al nivel de detalle de trabajo planteado no es posible llegar a un análisis tan detallado del problema, por lo cual se va a analizar este problema teniendo en cuenta tan solo el oleaje en el exterior de los puertos.

Por tanto, sí que es posible contemplar las situaciones en las que el puerto no sea operativo por problemas de acceso a él debido a las condiciones de oleaje reinantes. Además, también se puede evaluar, a modo de comparación entre los distintos puertos, según las dinámicas que se presenten en cada localización, cuál sería el rebase actual y en el futuro sobre un dique tipo, que se ha considerado igual en todos los puertos.

4.3.1.2 Paradas por condiciones de navegabilidad

Siguiendo las Recomendaciones para Obras Marítimas del Ministerio de Fomento del Gobierno de España (ROM 3.1) como marco de referencia para obtener valores generales y conservadores, las condiciones del clima marítimo que se consideren límites de operación se determinarán en función del nivel de servicio que se desee obtener. A falta de estudios específicos se recomienda utilizar las siguientes condiciones climáticas (transversales al buque), que son las que se consideran normalmente para el dimensionamiento de las zonas de acceso a puerto:

- Velocidad absoluta del viento $V_{10} \leq 10,00$ m/s (20 nudos)
- Velocidad absoluta de la corriente $V_c \leq 0,50$ m/s (1 nudo)
- Altura de la Ola $H_s \leq 3,00$ m

Las condiciones climáticas longitudinales al buque que se consideran limitantes para el análisis de estas rutas de entrada en temporales se establecen mediante el análisis estadístico de los niveles de servicio que se quieran establecer, recomendándose que a falta de criterios específicos se consideren los límites de operación siguientes:

- Velocidad absoluta del viento $V_{10} \leq 16,00$ m/s (32 nudos)
- Velocidad absoluta de la corriente $V_c \leq 2,00$ m/s (4 nudos)
- Altura de la Ola $H_s \leq 5,00$ m

Estas recomendaciones también aportan valores en función de la altura de ola para las condiciones límites de operación de los fondeaderos (H_s desde 2,5 a 4,5 m según el tipo de operaciones) y para los amarraderos y campos de boyas (H_s de 2,5 o 4,5 m). La condición más restrictiva la presenta la navegabilidad ante las condiciones climáticas transversales ($H_s=3$ m) por lo que se toma este valor como límite de operación. El alcance del presente estudio no nos permite valorar las condiciones del oleaje en el interior de los puertos, por lo que nos limitaremos a estudiar las condiciones de navegabilidad en el acceso al puerto.

Por tanto, para determinar el número de horas de parada en que un puerto no es accesible por condiciones de navegabilidad hay que calcular la probabilidad de que la altura de ola significativa, horaria, supere el umbral de 3 m. Esto es:

$$n^\circ \text{ horas/año} = \text{Prob}(H_s > 3) \cdot 8640 \quad (3.10)$$

Igualmente y para comparar los valores, siguiendo la ROM 3.1, se fija el tiempo medio aceptable de cierre de un área por presentarse condiciones climáticas adversas (superiores a las establecidas como límites de operación para los buques de proyecto), para puertos clasificados como de interés general (puertos internacionales), en 200 horas al año y 20 horas al mes.

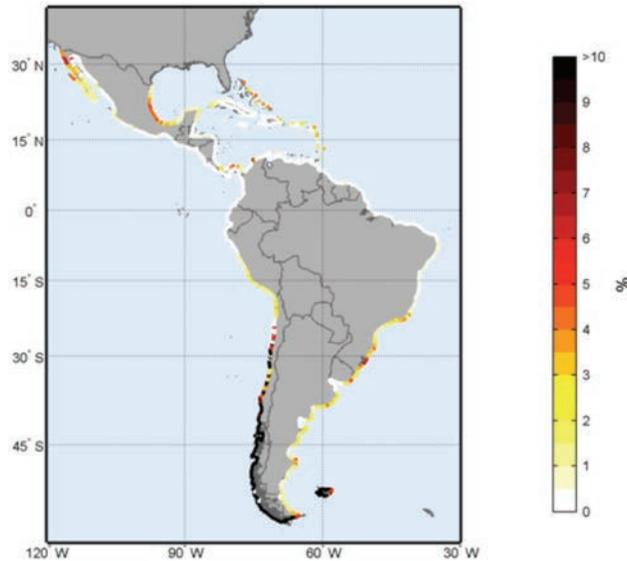
En la figura 3.56 y siguientes se muestran los valores de probabilidad de superar 3 m de altura de ola significativa en la actualidad, la tendencia que están sufriendo las condiciones de oleaje medias mensuales (altura significativa media mensual) y los valores en dos años horizonte (véanse documentos anteriores).

4.3.1.3 Operatividad por condiciones de navegabilidad

La exposición del puerto a una parada operativa viene dado por la duración de las condiciones de oleaje que suponen la limitación para que la actividad portuaria sea practicable por condiciones de navegación en el acceso al puerto. En este caso se ha considerado el número de horas en que, mensualmente, se presenten condiciones de oleaje de altura significativa superior a un umbral, que se ha fijado en $H_u=3$ m, en este estudio, siguiendo el criterio de la ROM 3.1 (Ministerio de Fomento, Gobierno de España) –figura 3.56–. Las pérdidas económicas por parada vendrán dadas en función del número de horas de parada anuales, N .

Nótese que si bien la fiabilidad se valora tanto en los puertos donde se dispone de datos de dique, medidos a través de Google-Earth (apartado dedicado a la metodología), como en los puertos más importantes de ALyC según las estadísticas de CEPAL, en el caso de la operatividad, tan sólo es posible hacerlo para estos últimos, ya que se carece de información de producción mercantil en el resto de los puertos.

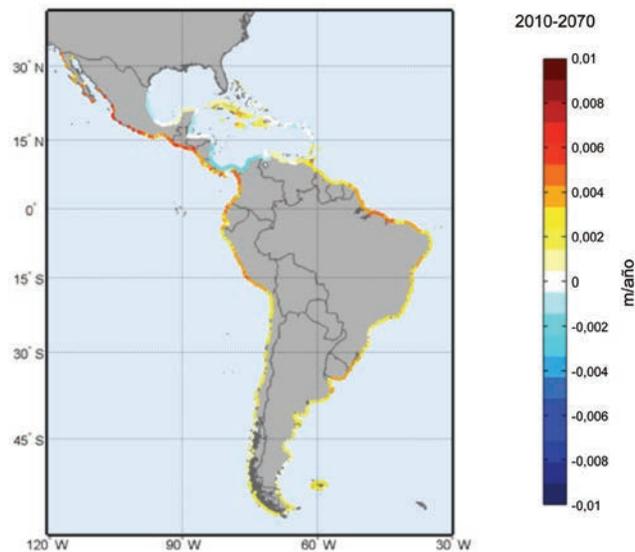
FIGURA 3.56
PORCENTAJE DE HORAS AL AÑO EN QUE SE SUPERA UNA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE DE 3 M RESPECTO DE 2010



Fuente: Elaboración propia.

Como se ha visto en el documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”, se han detectado cambios en el oleaje de la región. Estos cambios se pueden traducir en implicaciones para las condiciones operativas de los puertos, en función de la variación espacial de estas tendencias en las costas de la región –figura 3.57–.

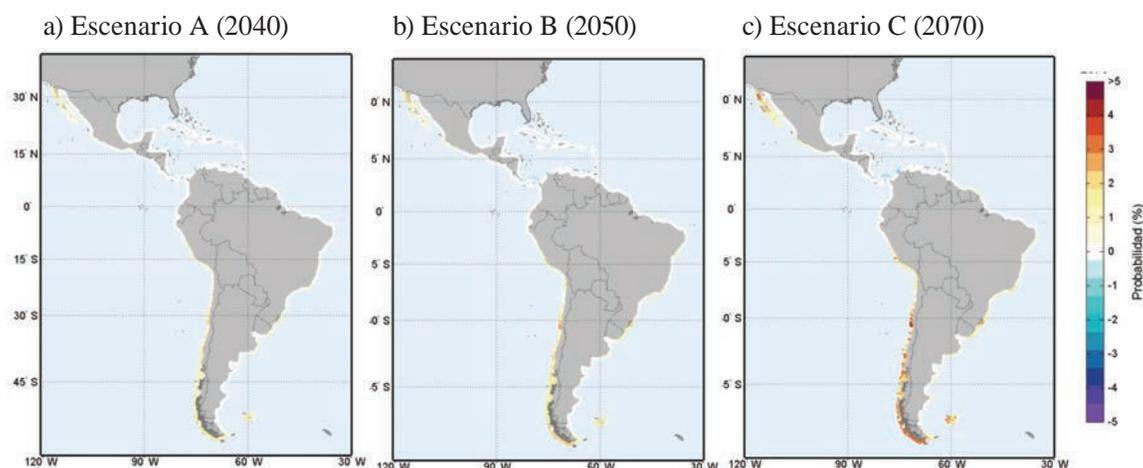
FIGURA 3.57
TENDENCIA MEDIA MENSUAL DE LA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE ENTRE 2010 Y 2070
(Metros/año)



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la probabilidad de ocurrencia de una altura de ola significativa de 3 m en los años de estudio –figura 3.58– se puede extraer la conclusión de que, en condiciones medias, la probabilidad de que se presenten condiciones por encima de ese umbral será mayor en el futuro, es decir, es esperable que la navegabilidad de los buques se verá dificultada.

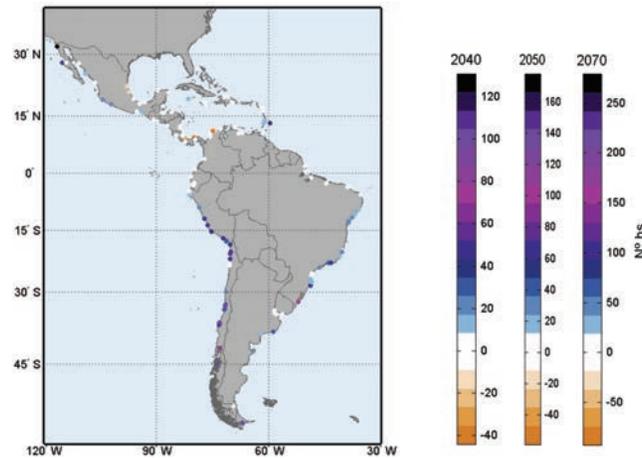
FIGURA 3.58
VARIACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE SUPERAR 3 M DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE (EN UN ESTADO DE MAR HORARIO) EN LOS ESCENARIOS A, B Y C
(Porcentaje de probabilidad)



Fuente: Elaboración propia.

Este mismo resultado se puede expresar en forma del número de horas al año al que corresponden los anteriores valores de probabilidad. Así, el gráfico de la figura 3.59 representa el número de horas en que se superarán en los puertos más importantes de la región (por carga en toneladas y TEUs según el *ranking* de la CEPAL), de media, las condiciones de 3 m en altura de ola significativa en un estado de mar. Ante estos resultados, los puertos más afectados serán los de la costa suroeste y norte de México, junto con los puertos más expuestos al mar abierto del Brasil.

FIGURA 3.59
VARIACIÓN DE NÚMERO DE HORAS AL AÑO MEDIO EN QUE SE VAN A EXCEDER
3 M DE ALTURA SIGNIFICANTE (EN UN ESTADO DE MAR HORARIO)
EN VARIOS AÑOS HORIZONTE
(Número de habitantes)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Resultados mostrados en los puertos analizados en el estudio en número de horas.

4.3.1.4 Operatividad por condiciones de rebase sobre diques

Otra variable para evaluar la inoperatividad de un puerto puede ser un rebase excesivo sobre los diques que protegen el área de agua abrigada donde se desarrollan las actividades portuarias.

Para la evaluación del rebase se ha tomado un hipotético dique vertical de características homogéneas en el dominio de ALyC de forma que se comparan los distintos efectos de las dinámicas y las tendencias para la misma estructura en igualdad de condiciones en distintos puntos de la costa de estudio.

El rebase sobre una estructura vertical responde a la formulación del documento auxiliar 1 “Guía metodológica”.

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH^3}} = 0,2 \exp \left(-b \frac{R_c}{H_s} \right) \quad (3.11)$$

donde:

R_c representa el francobordo del dique, que se define como la diferencia entre la cota de coronación y el nivel medio del mar local, y se ha tomado igual a 3 m (esta variable cambiará en cada zona en función de la severidad del oleaje pero se ha asumido homogéneo en la región a efectos comparativos de los resultados aunque se mostrará escaso en las zonas de mayor oleaje extremo y sobredimensionado en las zonas menos energéticas), el parámetro $b=4,3$, corresponde a un dique vertical sin botaolas.

La variable rebase presenta mucha variabilidad temporal ya que depende de la ocurrencia de temporales y su magnitud varía notablemente entre temporales ya que depende de manera no lineal de la altura de ola significativa, provocando que la serie temporal de rebase sea fuertemente discontinua

en el tiempo. El cálculo de la tendencia se ha realizado sobre el rebase anual. Una forma alternativa de evaluar el efecto en el rebase por el cambio en las dinámicas es el método de las perturbaciones. Recurriendo a las formulaciones recogidas en el documento auxiliar 1 “Guía metodológica”, se puede expresar el cambio en el rebase según las expresiones siguientes:

- Cambio en el rebase por variación del NMM:

$$\frac{\delta q}{q} = b \frac{\delta \eta}{H_s} \quad (3.12)$$

- Cambio en el rebase por variación del oleaje:

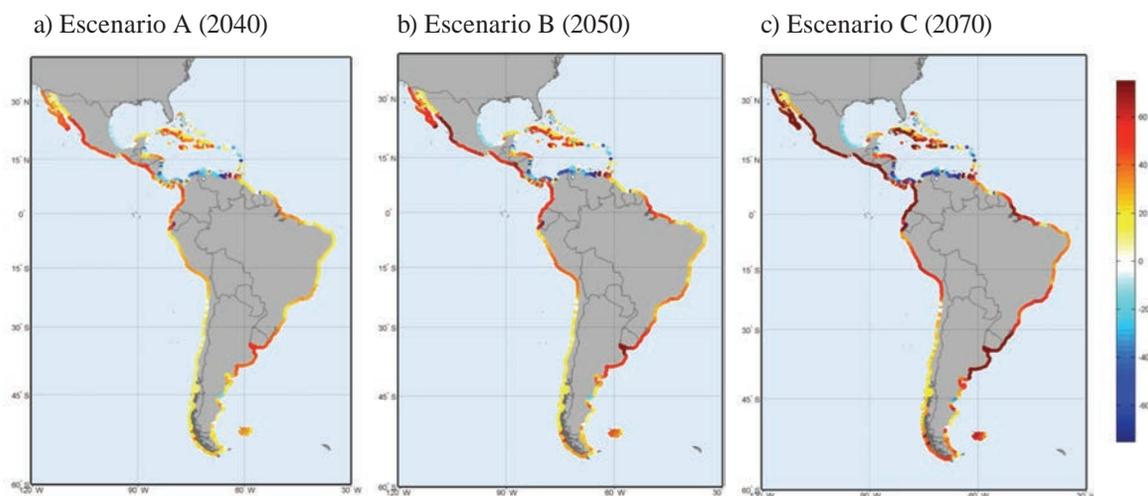
$$\frac{\delta q}{q} = b \frac{R_c}{H_s} \frac{\delta H}{H_s} + \frac{3}{2} \frac{\delta H}{H_s} \quad (3.13)$$

En primer lugar, para el cambio en el rebase por variación del NMM se han utilizado las tendencias de NMM de las distintas situaciones dinámicas consideradas en el estudio y la variabilidad espacial en la altura de ola a lo largo de las costas de ALyC.

Ante la falta de información sobre cada tipo de estructura en cada puerto, se calcula el rebase sobre dos diques de geometría tipo, a modo de comparación interterritorial. Análogamente a la operatividad por navegabilidad, se evaluará el porcentaje de tiempo debido a paradas por rebase del oleaje sobre las obras de defensa del puerto.

En la figura 3.60 se muestran los valores, en tanto por ciento, del incremento del rebase debido a la variación del oleaje (paneles superiores) para los escenarios A, B y C (años horizonte 2040, 2050 y 2070, respectivamente), y debido a la variación del nivel medio del mar (figura 3.60), respecto a los rebases actuales.

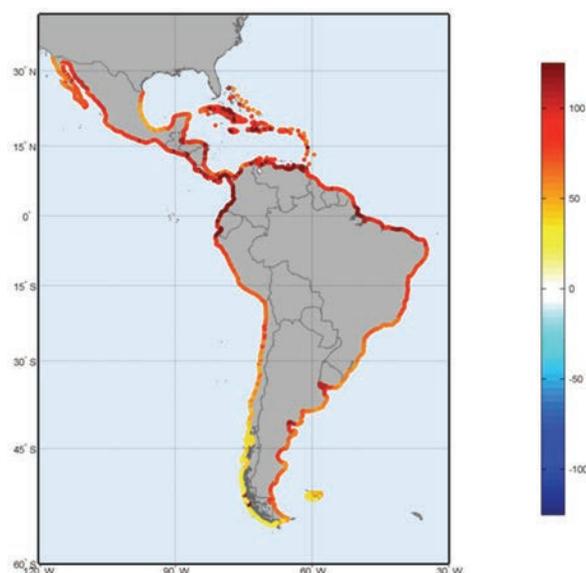
FIGURA 3.60
VARIACIÓN DEL REBASE SOBRE UN DIQUE TIPO POR VARIACIÓN DEL OLAJE
EN LOS ESCENARIOS A, B Y C
(Porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en los resultados del impacto en el rebase sobre las obras de abrigo por cambios en el oleaje las zonas que mayor cambio se esperarían serían la costa occidental desde el Ecuador hacia el norte, la costa norte de Argentina, Uruguay y sur de Brasil, norte de Brasil. Más débilmente, también afectaría a parte de las islas caribeñas, sur del Perú y norte de Chile.

FIGURA 3.61
INCREMENTO EN EL REBASE DE UN DIQUE VERTICAL POR SUBIDA DEL NIVEL
DEL MAR DE 0,5 M
(Porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se ha utilizado como altura de ola de referencia el percentil 99% de la serie histórica 1948-2008 en cada punto.

El rebase no sólo se verá afectado por el cambio en el oleaje, sino también por el cambio en el nivel del mar. La figura 3.61 recoge el impacto que tendría, en términos porcentuales, una subida del nivel del mar de 0,5 m (escenario D) en el rebase en la región. Como se puede apreciar, la variabilidad espacial viene impuesta por la distinta distribución espacial del oleaje en la región. Los mayores incrementos (por encima de un 100%) se producirían en las obras de abrigo de las zonas ecuatoriales ya que son áreas de oleaje pequeño y donde un incremento del nivel del mar adquiere más importancia relativa en el rebase total.

4.3.2 Fiabilidad de los puertos

La fiabilidad de una obra marítima se define como el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales de fallo, adscritos a todos los estados límites últimos (ROM 0.0 – Ministerio de Fomento de España). Representa el fallo de una obra de defensa portuaria por verse superadas las sollicitaciones de cálculo. A la escala de trabajo de este estudio y con base en los datos de que se dispone, tan solo se va a considerar el modo de fallo por superación de la altura de ola significativa de cálculo.

La altura de ola de cálculo se define como aquella que tiene asociada una probabilidad de superación de $1/T$, siendo T el período de retorno de diseño del dique de defensa. Es por tanto, una variable que surge del análisis de extremos de la población estadística de alturas de ola significativa. El período de retorno se puede relacionar con la probabilidad de fallo y la vida útil de la obra, definida como “el período de tiempo que transcurre durante la fase de servicio, V , y, en general, corresponde al período de tiempo en el que la obra cumple la función principal para la cual ha sido concebida”, según:

$$T = \frac{1}{1-(1-PFV)^V} \quad (3.14)$$

donde PFV es la probabilidad de fallo en la vida útil de la obra.

Para evaluar la fiabilidad de los diques de los puertos se debe determinar la vida útil y la probabilidad de fallo durante ésta para después calcular las acciones de cálculo y la probabilidad de que sean excedidas en el futuro por las tendencias en las alturas de ola extremas debidas al cambio climático.

Siguiendo las Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM) del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, se puede determinar la importancia de un tramo de obra marítima, así como la repercusión económica, social y ambiental generada en caso de destrucción o pérdida de funcionalidad por medio del carácter general de la obra. Estas recomendaciones nos servirán de guía para adoptar valores de los distintos parámetros de cálculo de obras marítimas aceptados en la práctica profesional de la ingeniería de puertos.

El carácter general de una obra se puede establecer en función de los siguientes índices:

- Índice de Repercusión Económica, IRE
- Índice de Repercusión Social y Ambiental, ISA

El Índice de Repercusión Económica, **IRE**, valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra, y por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con ella, previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma.

En función del valor del Índice de Repercusión Económica IRE, las obras marítimas se clasificarán en tres tipos correspondientes a tres subintervalos R_i , $i=1, 2, 3$:

- R1, obras con repercusión económica baja: $IRE < 5$
- R2, obras con repercusión económica media: $5 < IRE < 20$
- R3, obras con repercusión económica alta: $IRE > 20$

En función del IRE, la ROM aconseja la vida útil de la obra marítima:

CUADRO 3.17
VIDA ÚTIL DE UNA OBRA MARÍTIMA EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE IRE

IRE	<6	6-20	>20
Vida útil (años)	15	25	50

Fuente: ROM 0.0, Ministerio de Fomento del Gobierno de España.

En el caso de los puertos, se puede asumir que todos son infraestructuras con un valor IRE > 20.

El Índice de Repercusión Social y Ambiental, ISA, estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de, (1) pérdidas de vidas humanas, (2) daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y (3) de la alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.

El ISA se define por el sumatorio de tres subíndices:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i \quad (3.15)$$

donde:

ISA1, es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas

ISA2, el subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico

ISA3, el subíndice de alarma social

En función del valor del índice de repercusión social y ambiental ISA, las obras marítimas se clasificarán en cuatro tipos correspondientes a cuatro subintervalos, Si, i=1, 2, 3, 4:

- S1, obras sin repercusión social y ambiental significativa, $ISA < 5$
- S2, obras con repercusión social y ambiental baja, $5 < ISA < 20$
- S3, obras con repercusión social y ambiental alta, $20 < ISA < 30$
- S4, obras con repercusión social y ambiental muy alta, $ISA > 30$

En función del ISA, la ROM aconseja la probabilidad de fallo durante la vida útil.

CUADRO 3.18
PROBABILIDAD DE FALLO EN UNA OBRA MARÍTIMA EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE ISA

ISA	<5	5-19	20-29	>29
Pf	0,20	0,10	0,01	0,0001
βf	0,84	1,28	2,32	3,71

Fuente: ROM 0.0, Ministerio de Fomento del Gobierno de España.

Por lo tanto, el valor del índice ISA variará en cada puerto en función de sus características e importancia.

Sobre la base de este planteamiento, se necesita realizar una clasificación de los puertos en ALyC para asociar distintos valores de vida útil y probabilidad de fallo en función de la importancia socioeconómica y ambiental de cada tipo de puerto.

La clasificación planteada se basa en los datos disponibles a través de CEPAL (informe de actividad portuaria en América Latina y el Caribe de 2009), de donde se ha obtenido el *ranking* 2010 de actividad portuaria en ALyC, determinada a partir de la actividad de TEUs y toneladas de graneles.

De acuerdo con el método planteado, los puertos, se han valorado con índices según el nivel del puerto en la clasificación anterior (I o II).

CUADRO 3.19
VALORACIÓN DEL ÍNDICE ISA EN LOS PUERTOS DE SUDAMÉRICA

	ISA 1	ISA 2	ISA 3	ISA
Nivel I	3-BAJO	8-ALTO	5-MEDIO	16
Nivel II	0-REMOTO	4-MEDIO	0-BAJO	4

Fuente: Elaboración propia.

El índice IRE se ha valorado en todos los puertos como >20 , por considerarse infraestructuras de repercusión económica alta. De acuerdo con la ROM, para $IRE > 20$ y en función de los dos valores del índice ISA calculados se han determinado los siguientes períodos de retorno.

CUADRO 3.20
PROBABILIDAD DE FALLO Y PERÍODO DE RETORNO EN LOS PUERTOS ESTUDIADOS

	ISA	Probabilidad de fallo en 1 año de Vu	Período de retorno (años)
Nivel I	5 – 10	0,1	~ 500
Nivel II	< 5	0,2	~ 250

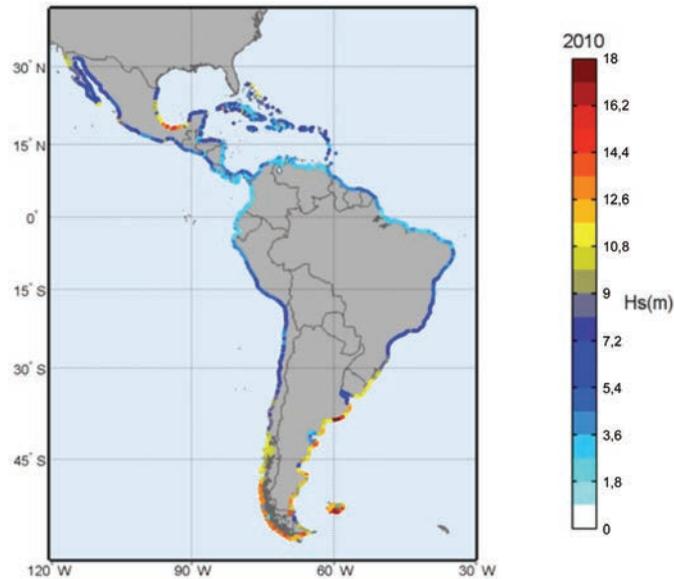
Fuente: Elaboración propia.

A partir del régimen extremal de altura de ola, se puede determinar la altura de ola de cálculo asociada a cada período de retorno. El dique se supondrá que sufre una destrucción total en el caso de que esta acción se vea superada.

4.3.2.1 Efecto del cambio climático en el período de retorno de diseño de las obras marítimas

Como se determinó en el documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”, también las olas más extremas están cambiando en la región de ALyC. Son estos extremos de oleaje los que condicionan el diseño de las obras marítimas de abrigo. En la actualidad, los extremos de oleaje (oleaje de viento) más intensos se dan al sur del continente y en la parte sur del golfo de México, con valores de más de 10 m para una recurrencia de 500 años de media –figura 3.62–. Es notable la variabilidad espacial que se encuentra en la región, entre las zonas ecuatoriales (menos de 2 m) y las zonas más meridionales (más de 12 m).

FIGURA 3.62
RÉGIMEN EXTREMAL EN 2010 DE ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE,
PERÍODO DE RETORNO DE 500 AÑOS
(Metros)

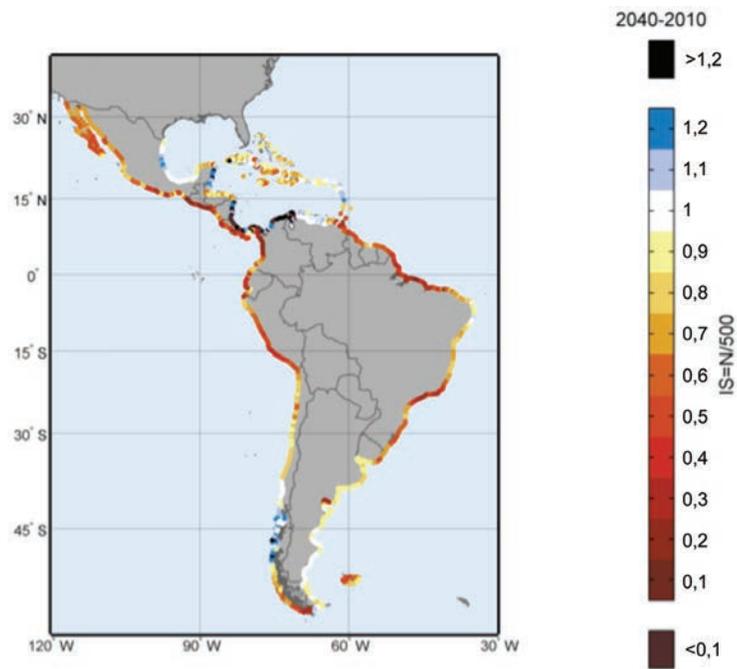


Fuente: Elaboración propia.

Además de conocer si las obras de abrigo del puerto van a seguir manteniendo la funcionalidad para la que han sido diseñadas, es de suma importancia conocer cuál va ser la respuesta en cuanto a la estabilidad de la estructura se refiere. La estabilidad se puede analizar desde el punto de vista de la variación de la altura para la cual fue diseñado el dique. La altura de cálculo, o de diseño, se define como la que tiene una probabilidad de superación de $1/T$.

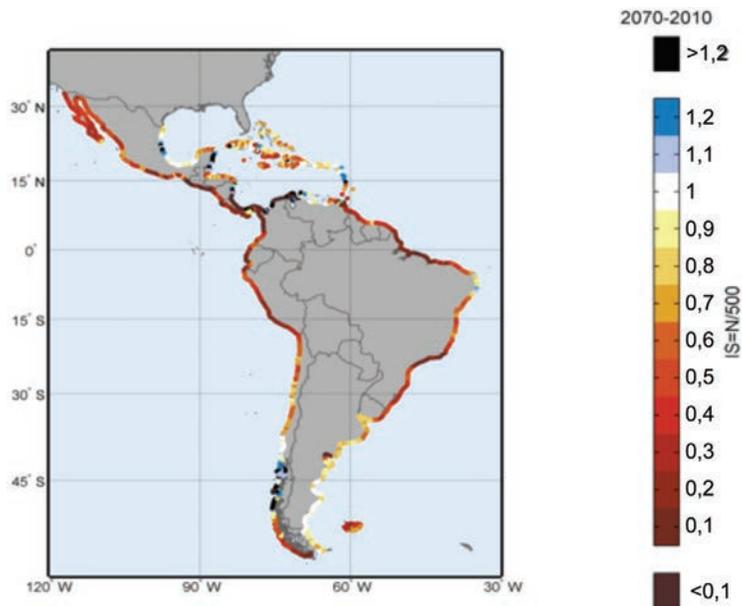
El grado de fiabilidad en el diseño de las obras marítimas ante un determinado período de retorno (T) se verá modificado en el futuro. Una manera sencilla de ver este efecto es obteniendo el ratio entre la recurrencia futura de las olas y el actual con período de retorno de 500 años, es decir $N/500$, donde N es el período de retorno de la altura de ola significativa de período de retorno 500 años en la actualidad –figura 3.63 y figura 3.64–. A esta relación la denominaremos índice de seguridad de las obras marítimas.

FIGURA 3.63
ÍNDICE DE SEGURIDAD DE LAS OBRAS MARÍTIMAS PARA UNA RECURRENCIA
MEDIA DE 500 AÑOS EN EL ESCENARIO A (AÑO HORIZONTE 2040)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.64
ÍNDICE DE SEGURIDAD DE LAS OBRAS MARÍTIMAS PARA UNA RECURRENCIA
MEDIA DE 500 AÑOS EN EL ESCENARIO DE ESTUDIO C (AÑO HORIZONTE 2070)



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que las obras marítimas actuales y las que se diseñen próximamente sin considerar factores de cambio a largo plazo, verán su fiabilidad reducida en torno al 60% (en términos medios en 2070) de la actual, en gran parte de la región, excepto en el Caribe interior, aunque en estas zonas las acciones de cálculo serán por tormentas tropicales principalmente. Las olas extremas están aumentando y, por tanto, el efecto sobre las obras marítimas debe ser tenido en cuenta en el diseño y en la evaluación del grado de seguridad que presentan actualmente.

4.3.2.2 Efecto del cambio climático en el peso necesario de las piezas de los diques de abrigo de materiales sueltos

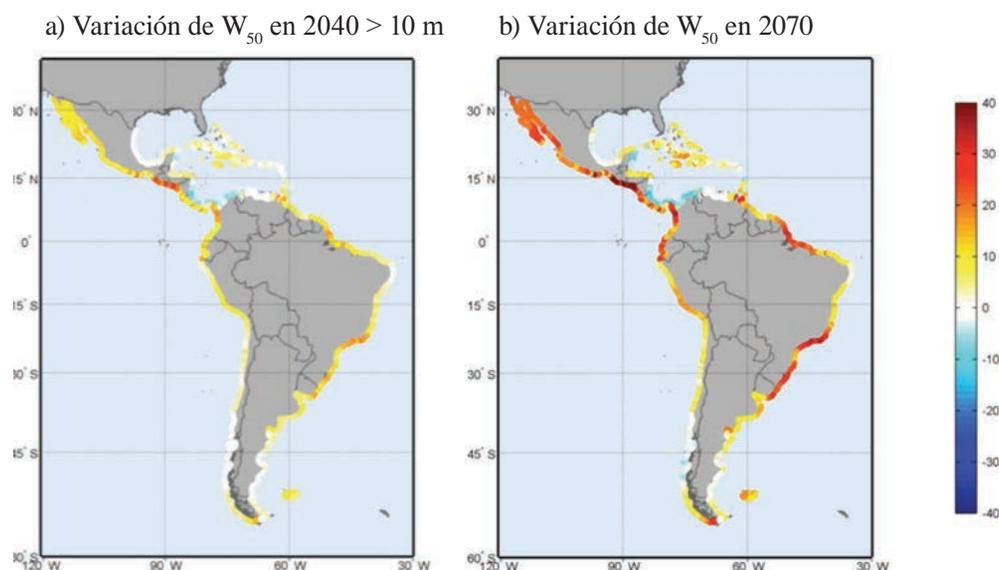
Para estudiar la respuesta de las estructuras marítimas ante unos cambios determinados en los procesos de la dinámica litoral, es necesario conocer la relación entre la estabilidad de los diques y la dinámica marina. Esta relación entre estabilidad y dinámicas viene dada por medio de una función de estabilidad determinada, que depende de las características tipológicas del dique y del grado de avería que se asuma (véase documento auxiliar 1 “Guía metodológica”). Se pueden comparar el peso de las piezas que componen un dique estable actualmente y el peso necesario en el futuro para mantener el mismo nivel de estabilidad. La diferencia es indicativa del grado de inestabilidad del dique en un futuro y de las inversiones que deberían de ser realizadas para mantener la estabilidad actual.

La mayor parte de la información experimental existente se refiere a diques ensayados en canales de oleaje, es decir con incidencia del oleaje normal al dique. Además, los diques se suelen ensayar sobre una plataforma horizontal o, al menos, de pendiente suave, por lo que se puede asumir que el fondo es horizontal. Por ello, en la mayoría de las formulaciones de verificación sólo aparecerán como parámetros del oleaje incidente, la altura de ola de cálculo, H_c , propagada hasta el dique, y el período de cálculo, T_c .

En la figura 3.65 se representa el cambio en el peso de los bloques del manto exterior de las obras de abrigo de los puertos, en los años 2040 y 2070, que sería necesario para mantener el nivel de estabilidad que presenta en la actualidad un hipotético puerto en cada localización de la costa de ALyC. En general, salvo algunas zonas del Caribe, los resultados indican que cualquier obra marítima necesitará más protección que la actual en forma de tamaño de piezas de mayor peso. El cálculo se ha hecho utilizando la fórmula proporcionada en el documento auxiliar 1 “Guía metodológica” para aumento relativo del tamaño de las piezas con una altura de ola de cálculo de 500 años de período de retorno.

Las zonas más afectadas por pérdida en la fiabilidad de las obras marítimas coinciden con las áreas donde se ha obtenido mayor cambio en los extremos de oleaje: costas del Uruguay, norte y sur del Brasil, costa occidental al norte del Ecuador (destacando Guatemala, El Salvador y la costa occidental de México). En el Caribe sur, las obras marítimas ganarán en seguridad debido a una esperable disminución en la altura de ola de cálculo. En términos generales, se podría afirmar que se va a producir una pérdida en la resiliencia de las obras marítimas existentes frente al cambio climático.

FIGURA 3.65
PÉRDIDA DE FIABILIDAD DE LAS OBRAS MARÍTIMAS ANALIZADAS EN TÉRMINOS
DEL CAMBIO NECESARIO EN EL PESO DE LAS PIEZAS DE ABRIGO.
ESCENARIOS A Y C
(Porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Conclusiones generales de los impactos en las obras marítimas

Se ha evaluado los impactos por cambios en el oleaje y nivel del mar en la operatividad y fiabilidad de las obras marítimas a través de diversos índices e indicadores. Las principales conclusiones que se pueden extraer son las siguientes:

4.3.3.1 Operatividad por condiciones de navegabilidad

- En condiciones medias, la probabilidad de que se presenten condiciones adversas para la navegación de acceso a los puertos será mayor en el futuro.
- Esta misma realidad se puede traducir en el número medio de horas al año que implicarían cierres de los puertos. Así, el gráfico de la figura 3.59 representa el número de horas en que se superarán en los puertos más importantes de la región (por carga en toneladas y TEUs según el *ranking* de la CEPAL), de media, las condiciones de 3 m en altura de ola significativa en un estado de mar. Ante estos resultados, los puertos más afectados serán los de la costa suroeste y norte de México, junto con los puertos del Brasil más expuestos al mar abierto.

4.3.3.2 Operatividad por condiciones de rebase sobre diques

- Como se aprecia en los resultados del rebase sobre las obras de abrigo por cambios en el oleaje las zonas en que mayor cambio se esperaría serían la costa occidental desde el Ecuador hacia el norte, la costa norte de Argentina, Uruguay y sur y norte del Brasil. Más débilmente, también afectaría a parte de las islas caribeñas, sur de Perú y norte de Chile.

- El rebase no sólo se verá afectado por el cambio en el oleaje, sino también por el nivel del mar. La figura 3.61 recoge el impacto que tendría, en términos porcentuales, una subida del nivel del mar de 0,5 m (escenario D) en el rebase en la región. Como se puede apreciar, la variabilidad espacial viene impuesta por la distinta distribución espacial del oleaje en la región. Los mayores incrementos (por encima de un 100%) se producirían en las obras de abrigo de las zonas ecuatoriales ya que son áreas de oleaje pequeño y donde un incremento del nivel del mar adquiere más importancia relativa en el rebase total.

4.3.3.3 Efecto del cambio climático en el período de retorno de diseño de las obras marítimas

- Las olas más extremas están cambiando en la región de ALyC y son estos extremos de oleaje los que condicionan el diseño de las obras marítimas de abrigo. En la actualidad, los extremos de oleaje (oleaje de viento) más intensos se dan al sur del continente y en la parte sur del Golfo de México, con valores de más de 10 m para un período de retorno de 500 años. Es notable la variabilidad espacial que se encuentra en la región, entre las zonas ecuatoriales (menos de 2 m) y las zonas más meridionales (más de 12 m).
- Los resultados muestran que las obras marítimas actuales y las que se diseñen próximamente sin considerar factores de cambio a largo plazo, verán su fiabilidad reducida en torno al 60% (en términos medios en 2070) con respecto al actual en gran parte de la región, excepto el Caribe interior, aunque en estas zonas las acciones de cálculo más severas serán debidas a tormentas tropicales principalmente.
- Las olas extremas están aumentando y el efecto sobre las obras marítimas debe ser tenido en cuenta en el diseño y en la evaluación del grado de seguridad que presentan actualmente.

4.3.3.4 Efecto del cambio climático en el peso necesario de las piezas de los diques de abrigo de materiales sueltos

- Las zonas más afectadas por pérdida en la seguridad de las obras marítimas coinciden con las áreas donde se ha obtenido mayor cambio en los extremos de oleaje: costas de Uruguay, norte y sur del Brasil, costa occidental al norte del Ecuador (destacando Guatemala, El Salvador y la costa occidental de México). En el Caribe sur, las obras marítimas ganarán en seguridad debido a una esperable disminución en la altura de ola de cálculo. En esta zona, la seguridad vendrá condicionada por los huracanes.

4.4 Impactos de la variación de la temperatura superficial del mar en el blanqueo de los corales

Los arrecifes de coral son un hábitat único capaz de mantener una gran biodiversidad y densidad de vida. Uno de los impactos derivados del calentamiento global del planeta que pueden sufrir los corales puede ser el blanqueo. El blanqueo del coral ocurre cuando son expuestos repetidamente, o de manera sostenida, a aumentos de temperatura fuera de su tolerancia térmica. Los corales pueden superar estas condiciones temporalmente. Sin embargo, si el estrés persiste, los corales perecerán. Una causa bien documentada del blanqueo de los corales es el aumento de la temperatura superficial del mar (SST). Un incremento de la SST de manera prolongada durante los meses más calurosos del verano, tan sólo de 1°C sobre la media mensual, puede generar un evento de blanqueo (Glynn, 1996). El fenómeno del blanqueo afecta a corales en todo el mundo, con proporciones altas de muerte. La tasa de recuperación es variable entre regiones y depende, en gran medida, del estado de conservación del arrecife.

4.4.1 Perspectiva de cambio en los arrecifes de coral frente al calentamiento global

En el ámbito científico, se han realizado diversas valoraciones globales del riesgo de los corales frente al cambio climático. Merece la pena destacar el trabajo de Donner y otros (2005), en el que realiza un análisis global del blanqueo y de las tasas de adaptación térmica necesarias por los corales para soportar el cambio climático.

Estudios en años recientes han alertado sobre cómo el cambio climático podría incrementar la frecuencia de los eventos de blanqueo del coral y amenazar la vida de los arrecifes de coral a largo plazo. Los arrecifes de coral parecen ser uno de los ecosistemas más vulnerables al cambio climático.

En el estudio de los efectos del cambio climático en la costa de ALyC, se plantea una regionalización de este método aplicándolo a los datos de temperatura y las tendencias calculadas a escala mensual. Se analiza el impacto esperado en los corales de la región de ALyC a partir del análisis de la posible superación del umbral de 1°C a partir del cual se puede considerar que comienza el blanqueo. Habida cuenta de las amenazas presentes en los arrecifes del Caribe, los más numerosos en la región, y a partir de observaciones de eventos previos en la zona y sus consecuencias (Burke, L. y J. Maidens, 2005), se puede considerar que el inicio de blanqueo puede inducir la muerte si no del total, al menos de gran parte, de los corales existentes. Por esta razón se evalúa la ocurrencia del blanqueo en términos del daño potencial que se podría esperar. Consúltense documentos anteriores del presente estudio para una descripción introductoria más detallada de los corales y el cambio climático en la región.

Existen estudios previos sobre el estado y las amenazas que sufren los arrecifes de corales tropicales en el Caribe. Entre ellos, destaca el trabajo del World Resources Institute *“Arrecifes en Peligro en el Caribe”* (Burke, L. y J. Maidens, 2005). Además en el documento 2 “Vulnerabilidad” del presente estudio se describen las principales conclusiones y amenazas que este trabajo identificó en la región, con el fin de tomarlo como punto de partida y marco de referencia del conocimiento previo, antes de valorar la amenaza que sufren los corales por cambio climático.

A continuación, se hace un breve resumen de las cuatro amenazas regionales analizadas en el estudio *“Arrecifes en Peligro en el Caribe”* (Burke, L. y J. Maidens, 2005) antes de integrar los cuatro apartados en un índice general de amenaza:

- Se estima que un tercio de los arrecifes coralinos del Caribe está amenazado por el desarrollo costero.
- Los sedimentos y la contaminación por fuentes terrestres amenazan a cerca de un tercio de los arrecifes del Caribe.
- Las amenazas de origen marino sobre los arrecifes coralinos se encuentran ampliamente extendidas por todo el Caribe.
- La sobrepesca amenaza a más del 60% de los arrecifes coralinos caribeños.
- El manejo inefectivo de las áreas protegidas constituye una amenaza adicional para los arrecifes del Caribe.
- Las comunidades costeras y las economías nacionales del Caribe están a punto de sufrir pérdidas económicas considerables si la tendencia actual en la degradación de los arrecifes coralinos continúa.
- Las enfermedades observadas y el aumento de temperatura del mar se consideran amenazas adicionales a los arrecifes coralinos en toda la región del Caribe, aunque no fueron evaluados de forma cuantitativa en el citado proyecto.

En este estudio nos hemos centrado en analizar la posibilidad de blanqueo sobre la base del calentamiento superficial del agua del mar.

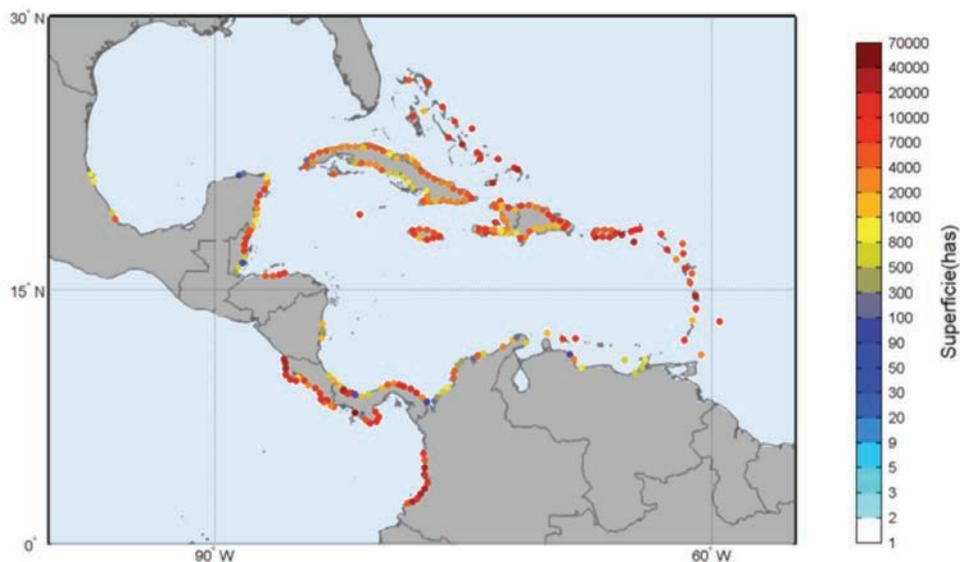
4.4.2 Regionalización del impacto por blanqueamiento del coral

Con el fin de evaluar el riesgo a la destrucción de los corales por aumento de la temperatura de la superficie del mar y mayor frecuencia de los eventos de blanqueamiento, se analizan los corales en ALyC siguiendo una aproximación similar a la de Donner y otros (2005).

Los arrecifes se localizan en la región a partir de los datos del World Resources Institute (WRI) que aportan información sobre si hay presencia o no de corales en las unidades de estudio de 5 km en la región. En la figura 3.66 se identifican las unidades donde se encuentran corales de acuerdo a esta fuente de información. Se observa la presencia masiva en las aguas tropicales del Caribe con arrecifes puntuales en Baja California, Brasil y norte de Chile.

Siguiendo la aproximación de Donner y otros (2005), se determina el impacto sobre los corales por el ascenso de la temperatura superficial del mar como la probabilidad de exceder un umbral crítico, delimitado en 1°C, a partir del cual, de no darse una adaptación térmica de los corales, se produciría la destrucción de los mismos. De esta forma, en la terminología de riesgo planteada en este trabajo, el impacto a estudiar es la probabilidad de que la variable SST supere 1°C. Esta probabilidad de exceder el umbral se ha analizado en documentos anteriores a escala de todo el dominio de ALyC. En este caso, lo que importa es la probabilidad calculada en los puntos donde se localiza el coral. En otras palabras, corresponde al término del producto de la amenaza (*hazard*, H) por la exposición (E), esto es, la figura 3.66 multiplicada por la probabilidad de exceder 1°C en SST en el futuro (véase documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”). El resultado se muestra en la figura 3.67 para la actualidad y los dos años horizonte considerados (2040 y 2070) correspondientes a los escenarios A y C.

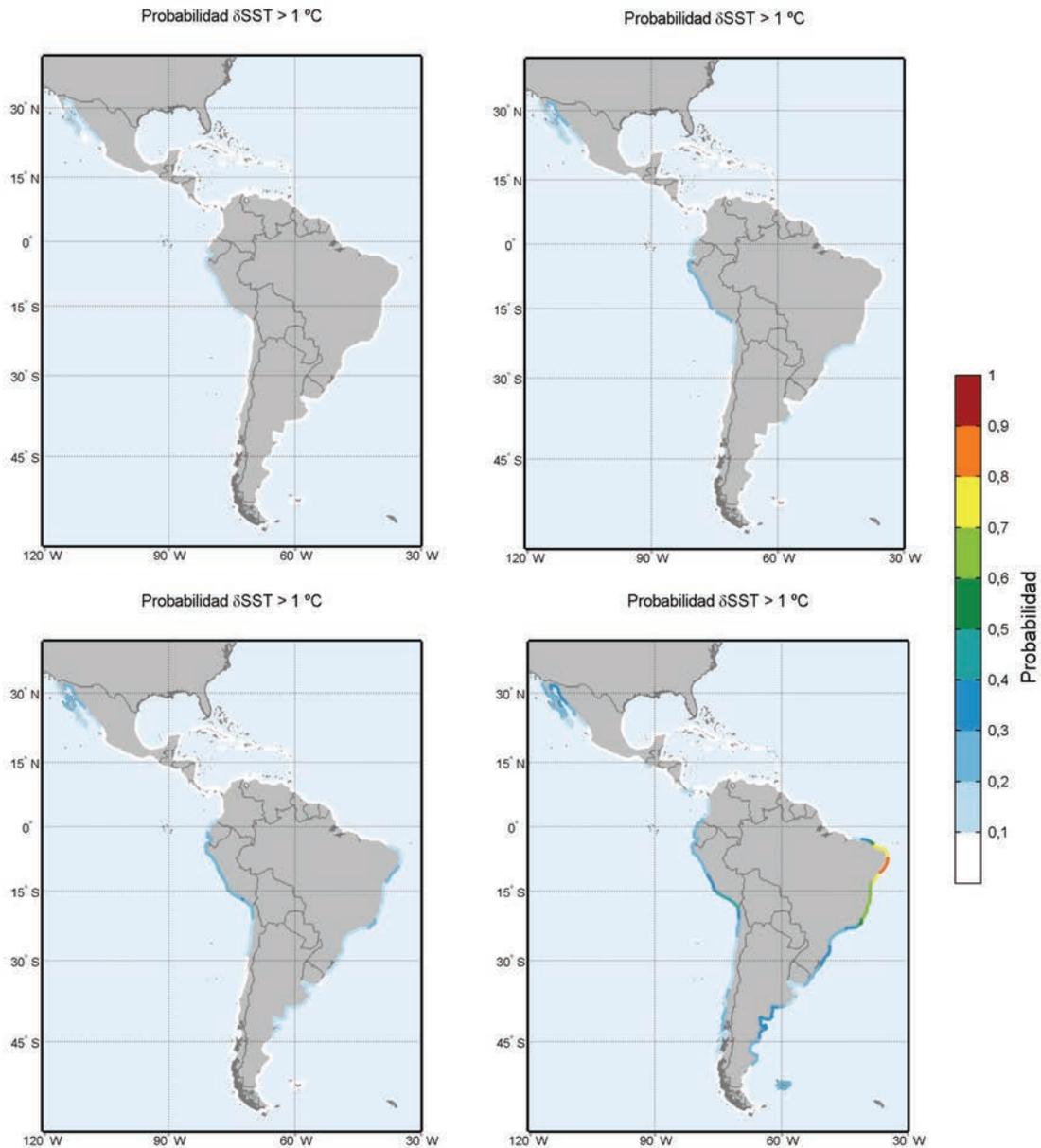
FIGURA 3.66
SUPERFICIE DE LOS ARRECIFES EN EL MAR CARIBE Y PACÍFICO CENTRAL
(Hectáreas)



Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados en las zonas de corales se extraen varias conclusiones. Primero, los corales del Brasil, en la actualidad no afectados por variaciones de temperatura superficial sobre 1°C , lo serán con una probabilidad por encima de 0,7 en el 2070 (finales del período de horizonte de evaluación medio: 2040-2070), debido a la subida de la temperatura media ya que es la zona de mayor aumento esperable de SST. Segundo, la probabilidad de impacto actual en el Caribe se expande por islas donde ahora no existe prácticamente riesgo. Por último, en las islas del Caribe con probabilidad de superar ese umbral en la actualidad, por debajo de 0,1, la probabilidad aumenta hasta 0,2 en el 2070.

FIGURA 3.67
PROBABILIDAD MEDIA DE SUPERAR 1°C EN LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR



Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Conclusiones generales impacto por blanqueamiento del coral

- Los corales del Brasil, en la actualidad no afectados por variaciones de temperatura superficial sobre 1°C, lo serán con una probabilidad por encima de 0,7 en el 2070 debido a la subida de la temperatura media.
- La probabilidad de impacto actual en el Caribe se expande por islas donde ahora no existe prácticamente riesgo.
- Por último, en las islas del Caribe con probabilidad de superar el umbral de daño en la actualidad, por debajo de 0,1, la probabilidad aumenta hasta 0,2 en el 2070.

5. Conclusiones

Inundación costera aumento del nivel del mar

- Los mayores valores de las tendencias se obtienen en la franja costera Atlántica, con valores de aproximadamente 3 mm al año para el primer período de estudio en la costa del norte de Sudamérica y la costa del Caribe, con menores valores en las islas caribeñas. En los deltas, debido a una sumergencia adicional, la inundación podría ser mayor.
- La distribución de población y del territorio por cotas es un factor principal en el estudio del impacto causado por las inundaciones en la franja costera. La distribución por cotas de superficie afectada resalta que la distribución es variable según el país por la distinta configuración de la costa (principalmente pendiente del terreno). En los primeros metros de países como Honduras o Guyana, la superficie de terreno por debajo de la cota 1 m es muy inferior en proporción con el área de terreno a cotas superiores. Por el contrario, por ejemplo, en el Perú la situación es la contraria, con una parte significativa de la superficie total por debajo del primer metro de elevación.
- La superficie afectada en cada cota en porcentaje con respecto a la superficie total de cada país muestra la complicada situación de muchos países insulares. En este caso, las islas caribeñas toman gran importancia ya que la mayor parte de su territorio está por debajo de la cota 10 m. En estos casos, el peso relativo de la franja costera es mucho mayor que en el caso de países con gran superficie de terreno como México, Brasil o Argentina. Las Islas Turcas y Caicos, las Bahamas y las islas Caimán son las más comprometidas en caso de impactos por inundación.
- Un ascenso del nivel del mar de 0,5 y 1 m (escenarios IPCC-AR4) tendrían un impacto notable en comparación con los valores obtenidos a partir de las tendencias estadísticas obtenidas de series históricas. Como se puede apreciar en la figura 3.7 y figura 3.8, la situación de subida del nivel del mar es altamente variable espacialmente.
- En términos de población afectada, un ascenso de 1 m del nivel del mar impactaría en gran medida en las costas del Brasil, con grandes impactos en las grandes aglomeraciones urbanas. Otras costas bastante afectadas serían las islas caribeñas, especialmente las más orientales,

así como extensas partes de México, especialmente la costa Este, y diversos puntos singulares del Perú y el Ecuador, así como las principales aglomeraciones humanas de Chile.

- Comparando esta situación con la de un eventual ascenso del nivel del mar provocado por un evento Niño de la misma magnitud que el máximo histórico (1998), se puede apreciar que la costa Oeste está claramente más afectada que la Este y que la magnitud del impacto es claramente inferior a una subida del nivel del mar de 1 m.
- En un escenario de 1 m de elevación del nivel y con la situación actual de huracanes, se obtienen diversas conclusiones. La proporción entre superficie afectada y población no es la misma según el país, así, Honduras, por ejemplo, multiplicaría prácticamente por 4 la superficie de terreno. Sin embargo, el cambio en población afectada no guarda la misma proporción y se encontraría en el mismo orden de magnitud. México y Cuba apenas sufrirían cambios en población afectada mientras que los km² de terreno inundado se verían multiplicados por 2,5 y 5 aproximadamente. No ocurre esto en todos los países, por ejemplo en Belice o Puerto Rico, la población afectada prácticamente se doblaría. Jamaica o Haití son otros ejemplos con esta problemática.
- Comparando las situaciones de huracanes entre sí, respecto al nivel actual y un posible escenario con 1 m de ascenso del mismo, las superficies prácticamente en todos los casos al menos se doblan. Países donde el impacto variaría en gran proporción ante el ascenso del nivel del mar con situación de huracán serían Honduras, Panamá, Belice, Costa Rica y República Bolivariana de Venezuela, entre otros. Sin embargo, para otros países, como las Islas Caimán, la situación no cambiaría significativamente en cuanto a huracanes y habitantes afectados se refiere.
- El caso particular de los deltas se caracteriza por corresponder a zonas costeras bajas, con subsidencia adicional al efecto del ascenso del nivel del mar y con una gran importancia ecológica y/o económica. Los deltas del Río de la Plata y río Magdalena se verían los más afectados en términos de población por una subida de 1 m de ascenso del nivel del mar, mientras que el primero destaca por tener la mayor superficie de terreno comprometida.
- Respecto a la afección a las infraestructuras (carreteras y ferrocarriles) los resultados indican que una situación de ascenso del nivel del mar de 1 m implicaría impactos considerablemente mayores que los esperados de seguir la suave tasa de aumento obtenida por extrapolación de los cambios observados hasta ahora. En tramos de carretera perjudicados hasta la cota de 1 m, los impactos se concentrarían en partes de las costas de Brasil, México y República Bolivariana de Venezuela, así como en algunas de las islas caribeñas. Los tramos de ferrocarril impactados son muchos menos que en el caso de las carreteras, aunque éstos presentan una importancia relativa mayor desde el punto de vista de infraestructuras y de incidencia en la red de transportes. No obstante, tan solo en los casos de Cuba, México y Brasil, y Puerto Rico frente a los escenarios de subida del nivel del mar, y con presencia de huracanes en especial, la situación es comprometedora.
- Respecto a los huracanes, para países como Venezuela, Honduras, Panamá o Costa Rica, la situación ante un ascenso de 1 m cambiaría significativamente, mientras que en otros países la variación del impacto no es tan considerable respecto al impacto con el nivel actual, como por ejemplo la República Dominicana.

Inundación costera eventos extremos del nivel del mar

- Se ha estudiado la cota de inundación como variable que define el nivel hasta el que llegan los eventos extremos de nivel del mar por distintos factores. Las tendencias de la cota de inundación han aumentado en los últimos 61 años debido al aumento de las condiciones de oleaje, nivel medio del mar y sobrelevaciones debidas a tormentas. Respecto a la tasa de cambio detectada en los eventos extremos de la cota de inundación, las partes con mayor cambio (hasta 1 cm/año) son la regiones alrededor del Río de la Plata, precisamente la zona geográfica con mayores valores de cota de inundación. En el resto de la región las tendencias obtenidas no superan en general 0,5 cm/año.
- La estacionalidad del cambio es importante porque puede aumentar el rango de variación a lo largo del año. No obstante, en el Río de la Plata, la variación estacional no es muy marcada y se puede considerar que la tendencia será prácticamente homogénea en todos los meses.
- La cota de inundación de 50 años de período de retorno es mayor en las costas de Chile, Argentina y Uruguay, con valores por encima de los 4 m. En el mar Caribe, en general los valores de la cota de inundación rondarían el metro de elevación (en ausencia de huracanes).
- En todos los casos se produce una disminución del índice que relaciona los períodos de retorno futuros con respecto a la actualidad, lo que implica una mayor frecuencia de los eventos extremos de inundación. Al contrario de lo que ocurre con los extremos de oleaje que no aumentan en toda la región, en este caso debido a la acción conjunta de las distintas componentes del nivel del mar, se produce un aumento generalizado del nivel de inundación en las costas de la región.
- En comparación con los resultados obtenidos para el ascenso del nivel del mar los resultados de extremos de inundación muestran un aumento de las pérdidas de superficie de terreno de un orden de magnitud mayor, mostrando la importancia de los eventos esporádicos de inundación.
- Respecto al impacto en número de personas afectadas, destacan en magnitud Brasil, México y Argentina, en esta última la inundación con un metro de ascenso del nivel supondría un 70% adicional al impacto de producirse en la actualidad. En el resto de países el impacto aumenta menos de un 25% respecto a la actualidad, salvo Suriname y Guyana, con más de un 80%.
- La afección cambiará significativamente en muchos países en las próximas décadas. En algunos países, como Panamá o Haití, la incidencia de eventos Niño en una situación de un metro de elevación puede suponer menor daño que en la actualidad. Sin embargo, en otros casos, como en Guatemala, la población afectada aumentaría (del 2,4 al 7% para 50 años de retorno).
- Los mayores impactos para la población se producirían en la costa Este del Hemisferio Sur, con focos de impactos en las ciudades costeras del norte de Argentina, Uruguay y Brasil, así como en las grandes aglomeraciones urbanas del Caribe, México y Perú.

Playas

Aspectos generales

- En un estudio de la erosión en las costas es de vital importancia determinar la configuración de la costa y la tipología de las playas ya que los procesos que definen la erosión varían en cada situación.
- Existe una doble dimensión de un análisis sobre erosión en la costa en la región. Por un lado, existen países con gran longitud de playas sin actividades urbanas inmediatamente tras de sí, mientras que en otros países, la longitud de frente urbano en primera línea de costa es comparable a la longitud de playas (en gran parte coincidente con zonas urbanizadas). Por tanto, será necesario analizar esta dualidad funcional en el estudio analizando, por un lado, la función de las playas como recurso ecológico y turístico (uso recreativo) y, por otro lado, la función que representan como obra de defensa marítima (uso defensivo).
- Respecto a la tipología, las playas rectilíneas dominan y configuran la mayor parte de las costas de México, especialmente en el golfo de México, y desde el sur del Brasil hasta el sur del continente, con otras zonas aisladas a lo largo de toda la región de ALyC. Las playas encajadas dominan en las costas de Chile, sur del Brasil e islas caribeñas.

Erosión del perfil de equilibrio por subida del nivel del mar

- Los resultados obtenidos muestran un mayor efecto en la costa Atlántica y Caribeña, con tasas en torno a 0,16 m de retroceso anual para el diámetro medio representativo (0,3 mm) variando desde 0,3 hasta 0,26 m/año para los otros dos tipos de sedimento contemplados. Merece la pena destacar que en el conjunto de la región se obtienen tasas de erosión debido al efecto combinado del ascenso del nivel del mar (generalizado) y el aumento del oleaje. También se obtienen tasas altas de erosión en las costas del sur de Brasil y sur de Chile. Como valores medios, se podría esperar un retroceso de las playas en el golfo de México de alrededor de 8 m en el año 2040 y de hasta 16 m en el 2070, con una incertidumbre pequeña (en torno a 1,5 m). En el resto de la región los retrocesos esperables son menores salvo en el sur del Brasil y norte del Uruguay con valores en torno a los 5,5 y 11 m, con incertidumbres por debajo de 1 m.
- Bajo estas hipótesis, las zonas más castigadas serían el Caribe Norte y las costas al sur del Brasil hasta el Río de la Plata. Además, la erosión es generalizada espacialmente en toda la región en caso de un ascenso del nivel del mar.
- Valores de erosión entre 5 y 10 m por cambios en el nivel del mar son *tan probables como improbables* (probabilidades entre 0,33 y 0,66). Cambios por encima de 10 m se pueden considerar *excepcionalmente improbables* por esta causa en la región de forma generalizada.
- Para un ascenso del nivel del mar de 1 m (o incluso 2 m), los resultados son bien distintos en magnitud puesto que se contemplarían erosiones en torno a 20, 40 y por encima de 60 m para los distintos diámetros de sedimentos considerados. Los resultados son mucho mayores para ascensos de 2 m. Obsérvese que para un ascenso del nivel del mar homogéneo en la región, la variabilidad de los resultados en estos casos depende exclusivamente de las distintas condiciones de oleaje en cada zona.

Erosión del perfil de equilibrio por aumento de la altura de ola

- Los cambios en las alturas de ola (H_{s12}) pueden provocar erosiones por cambios en el perfil de las playas cuyos efectos son mucho mayores por el cambio del nivel del mar (cambios hasta superiores a 1 m/año). No obstante, el estudio de este factor es más delicado puesto que depende enormemente de las características concretas (locales) de cada tramo de playa y del transporte de sedimentos general. No obstante, el análisis sirve de advertencia y de diagnóstico de los posibles cambios para identificar las zonas con mayor probabilidad de erosión por cambios en el oleaje.
- Por extrapolación de estos cambios, se obtendrían valores de erosión para el año horizonte 2040 por encima de 25 ± 8 m en las costas del sur de Brasil, Uruguay y oeste de México. En puntos de las islas caribeñas se alcanzarían retrocesos medios entre 8 a 10 m, en general, con incertidumbres asociadas de aproximadamente 5 m.
- Superar 5 y 10 m de erosión por cambios en las alturas de ola se puede considerar como *tan probable* como *improbable* (probabilidades entre 0,33 y 0,66), en contraste a lo que ocurre con el nivel del mar. Si bien, en diversas partes de centroamérica y oeste de México cambios por encima de 10 m son *probables* e incluso *muy probables* en las costas sur de las islas caribeñas.

Erosión en playas por cambios en la planta de equilibrio

- Como se aprecia, los mayores cambios por giro en la planta de las playas se producirían en las costas del sur del Brasil (por encima de 1 m/año), costas caribeñas (especialmente este de Cuba e islas orientales), parte de la costa de Chile y costa noroeste de México, esta también con valores por encima de 1 m de erosión anual de media.
- La extrapolación de estos resultados al año 2040 daría valores de erosión de 30 ± 10 m en las costas del Brasil, 20 ± 8 m en la costa tropical Atlántica, de 10 a 20 ± 8 m en el Pacífico tropical y de 20 ± 8 m en el norte de Chile.
- Analizando el grado de confianza IPCC de superar 10 y 25 m en el año 2040 por cambios en la dirección del oleaje y el giro de las playas inducido se puede concluir que los cambios esperables son de un orden de magnitud superior a los obtenidos por cambios en el nivel del mar y en las alturas de ola, estando en este caso en el orden de las decenas de metros. Si bien, cambios por encima de 10 m de erosión son *prácticamente ciertos* en todas las playas susceptibles de giro, cambios por encima de 25 m son *muy probables* en las costas Este de centroamérica, islas caribeñas y partes de Chile y Uruguay. Son también *probables* cambios por encima de esta magnitud en extensas partes de la costa Pacífica y caribeña.

Comparando estos resultados con las zonas con más presencia de playas encajadas y por tanto susceptibles de ser afectados por este tipo de erosión se comprueba que las zonas del Brasil, las costas caribeñas orientales y Chile, así como una parte pequeña de México, serían las más impactadas dado que presentan más cantidad de playas con esta tipología.

Transporte de sedimentos

- Tanto el ángulo de incidencia del oleaje, como la altura de ola en rotura se están viendo afectados por el cambio climático, por lo que es necesario evaluar el transporte potencial (en condiciones de disponibilidad total de sedimento) para cuantificar las variaciones del transporte neto del sedimento litoral. Los resultados muestran cambios de transporte potencial importantes en las costas del Brasil, Guyana, Suriname, Guayana Francesa, norte de México, Perú y Chile.
- El impacto esperado por transporte de sedimentos es de especial relevancia en las zonas donde tasas altas de transporte potencial coincidan con gran disponibilidad de sedimento como las costas del Brasil, islas caribeñas, México, Costa Rica y norte del Perú.

Puertos

Operatividad por condiciones de navegabilidad sobre diques

- En condiciones medias, la probabilidad de que se presenten condiciones por encima de ese umbral será menor en el futuro.
- Este mismo resultado se puede expresar en forma del número de horas al año al que corresponden los anteriores valores de probabilidad. Así, el gráfico de la figura 3.59 representa el número de horas en que se superarán en los puertos más importantes de la región (por carga en toneladas y TEUs según el *ranking* de la CEPAL), de media, las condiciones de 3 m en altura de ola significativa en un estado de mar. Ante estos resultados, los puertos más afectados serán los de la costa suroeste y norte de México, junto con los puertos más expuestos al mar abierto del Brasil.

Operatividad por condiciones de rebase sobre diques

- Como se aprecia en los resultados del impacto en el rebase sobre las obras de abrigo por cambios en el oleaje las zonas que mayor cambio se esperaría serían la costa occidental desde el Ecuador hacia el norte, la costa norte de Argentina, Uruguay y sur del Brasil, norte del Brasil. Más débilmente, también afectaría a parte de las islas caribeñas, sur del Perú y norte de Chile.
- No sólo el rebase se verá afectado por el cambio en el oleaje, sino también por el nivel del mar. La figura 3.61 recoge el impacto que tendría, en términos porcentuales, una subida del nivel del mar de 0,5 m (escenario D) en el rebase en la región. Como se puede apreciar, la variabilidad espacial viene impuesta por la distinta distribución espacial del oleaje en la región. Los mayores incrementos (por encima de un 100%) se producirían en las obras de abrigo de las zonas ecuatoriales ya que son áreas de oleaje pequeño y donde un incremento del nivel del mar adquiere más importancia relativa en el rebase total.

Efecto del cambio climático en el período de retorno de diseño de las obras marítimas

- Las olas más extremas están cambiando en la región de ALyC y son estos extremos de oleaje los que condicionan el diseño de las obras marítimas de abrigo. En la actualidad, los extremos de oleaje (oleaje de viento) más intensos se dan al sur del continente y en la parte

sur del golfo de México, con valores de más de 10 m para una recurrencia de 500 años de media. Es notable la variabilidad espacial que se encuentra en la región, entre las zonas ecuatoriales (menos de 2 m) y las zonas más meridionales (más de 12 m).

- Los resultados muestran que las obras marítimas actuales y las que se diseñen próximamente sin considerar factores de cambio a largo plazo, verán su fiabilidad reducida en torno al 60% (en términos medios en 2070) de la actualidad en gran parte de la región, excepto en gran parte del Caribe interior, aunque en estas zonas las acciones de cálculo serán por tormentas tropicales principalmente.
- Las olas extremas están aumentando y el efecto sobre las obras marítimas debe ser tenido en cuenta en el diseño y en la evaluación del grado de seguridad que presentan actualmente.

Efecto del cambio climático en el peso necesario de las piezas de los diques de abrigo de materiales sueltos

- Las zonas más afectadas por pérdida en la seguridad de las obras marítimas coinciden con las áreas donde se ha obtenido mayor cambio en los extremos de oleaje: costas del Uruguay, norte y sur del Brasil, costa occidental al norte del Ecuador (destacando Guatemala, El Salvador y la costa occidental de México). En el Caribe sur, las obras marítimas ganarán en seguridad debido a una esperable disminución en la altura de ola de cálculo.

Corales

- Los corales del Brasil, en la actualidad no afectados por variaciones de temperatura superficial sobre 1°C, lo serán con una probabilidad por encima de 0,7 en el 2070 debido a la subida de la temperatura media.
- La probabilidad de impacto actual en el Caribe se expande por islas donde ahora no existe prácticamente riesgo.
- Por último, en las islas del Caribe con probabilidad de superar el umbral de daño en la actualidad, por debajo de 0,1, la probabilidad aumenta hasta 0,2 en el año 2070.

6. Bibliografía

- Bender, M.A. y otros (2010), Modeled Impact of Anthropogenic Warming on the Frequency of Intense Atlantic Hurricanes, *Science*, Vol. 327. 454-458. Doi: 10.1126/science.1180568.
- Birkemeier, W.A. (1985), Field Data on Seaward Limit of Profile Change, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engr.* Vol 111 No. 3, 598-602.
- Burke, L. y J. Maidens (2005), “Arrecifes en Peligro en el Caribe”, World Resources Institute, Washington D.C.
- Bruun, P. (1990), “Port Engineering”, Gulf Publishing Co. Houston, USA.
- _____ (1966), Tidal inlets and littoral drift, *Stability of tidal inlets*, Vol. 2. Noruega, 1966.
- _____ (1962), Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 88, 117-130.
- _____ (1954), “Coastal Erosion and Development of Beach Profiles”, U.S. Army Beach Erosion Board Technical Memorandum N°. 44, U.S. Army Corps of Engr. Waterways Exp. Station, Vicksburg, Mississippi.
- Callaghan, D.P., P.Nielsen, A.Short, y R. Ranasinghe (2008), Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion, *Coastal Engineering*, Doi:10.1016/j.coastaleng.2007.12.003.
- Cooper, J.A.G. y O.H. Pilkey (2004), Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule, *Global and Planetary Change*, Vol 43, 157–171.
- Dean, R.G. (1977), “Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts”, Dept. of Civil Eng., Ocean Eng. Tech. Rep. 12, Uni4. of Delaware.
- Donner, S.D., W.J Skirving, C.M. Littlely M. Oppenheimer (2005), Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change, *Global Change Biology*, Vol. 11, 2251–2265, Doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01073.
- Emanuel, K. (2005), Increasing Destructiveness Of Tropical Cyclones Over 30 years, *Nature*, 436, 686-688, Doi:10.1038/nature03906.
- Glynn, P.W. (1996), Coral reef bleaching: Facts, hypotheses and implications, *Global Change Biology*, 2: 495-509.
- Guza, R. T. y E. B. Thornton (1981), Wave set-up on a natural beach, *Journal of Geophysics Research*, Vol 86, 4133-4137
- Hsu, J.R.C. y C. Evans (1989), Parabolic Bay Shapes and Applications, *Proc., Institution of Civil Engineers*, London, England, Vol. 87 (Part 2), 556 - 570.

- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2007), *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- McGranahan, G., D. Balk y B. Anderson (2007), The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones, *Environment and Urbanization*, Vol. 19 (1), 17-37.
- Miller, J.K. y E. Livermont (2008), An Index for Predicting Storm Erosion Due to Increased Waves and Water Levels, *ASCE Conf. Proc.* Doi:10.1061/40968(312)51, Proceedings of the Solutions to Coastal Disasters Congress.
- Nicholls, R.J. y S.P. Leatherman, (Eds.) (1995), Potential Impacts of Accelerated Sea-Level Rise on developing Countries, *Journal of Coastal Research*, Special Issue, Vol. 14, 324 pp.
- Nicholls, J. y A. Cazenave (2010), Sea-Level rise and its impacts on coastal zones, *Science*, Special Section, Vol. 328, 15717. Doi: 10.1126/science.1185782.
- Nielsen, P. y D.J. Hanslow (1991), Wave run-up distributions on natural beaches, *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, N° 4, pp. 1139-1152.
- Peltier, W.R. (2000a), Earth Physics and Global Glacial Isostasy: From Paleo-Geodesy to Space-Geodesy, *International Association of Geodesy Symposia*, Vol 123, Gravity, Geoid and Geodynamics.
- _____ (2000b), "ICE4G (VM2) Glacial Isostatic Adjustment Corrections, in Sea Level Rise; History and Consequences" en Douglas, B.C., Kearney, M.S., and S.P. Leatherman (Eds.), Academic Press, San Diego, International Geophysics Series, 75.2001.
- Rignot, E. y otros (2011), Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L05503, Doi:10.1029/2011GL046583.
- ROM 0.0 (2001), "General Procedure & Requirements for the Design of Harbor and other Maritime Structures (Part I)", Spanish Government.
- ROM 3.1. (1999), "Maritime Port Configuration Design: Approach channel & Harbor basin" Spanish Government.
- Tan, S. y Y. Chiew (1994), Analysis of Bayed Beaches in Static equilibrium, *Journal of Waterway, Port., Coa. and Oce. Eng.*, Vol. 120, No 2, ASCE, 145 - 153.
- Vermeer, M. y S. Ramstorf (2009), Global sea level linked to global temperature, *PNAS*. 106.21527-21532.
- Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry y H.R. Chang (2005), Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment, *Science*, Doi: 10.1126/science.1116448.
- Zhang, K., B.C. Douglas, y S.P. Leatherman (2004), Global warming and coastal erosion, *Climatic Change*, Vol. 64, 41-58.



Este documento es el tercero de una serie de textos que se han elaborado en el marco del Estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. La zona de estudio comprende una longitud total de costa de aproximadamente 72.182 km distribuidos en cuatro zonas geográficas: Norteamérica, Centroamérica, Sudamérica y las Islas del Caribe. En el dominio de estudio se han analizado los cambios detectados en las dinámicas costeras, la influencia de la variabilidad climática, información diversa sobre la vulnerabilidad presente en las costas de la región, abarcando tanto el medio físico como el socioeconómico, la configuración física de las mismas y los impactos y riesgos previsibles en el futuro.

En este volumen se muestra el análisis de los impactos derivados del cambio climático en las costas de la región. Se analizan los efectos y la probabilidad de las inundaciones del litoral ocasionadas por el aumento del nivel del mar y los eventos extremos, la erosión de las playas por cambios en el oleaje y en el nivel del mar, las nuevas condiciones a que se verán sometidos los puertos de la región afectando sus operaciones y el nivel de seguridad de sus obras de protección, así como el posible impacto de blanqueo de los corales por un aumento de la temperatura superficial del mar. Este conocimiento es vital para la ingeniería de costas y puertos en la región, los análisis de vulnerabilidad de los asentamientos humanos en zonas de litoral y la gestión integral del medio ambiente en el borde costero, entre otros.

La información que se provee en este tercer volumen es el punto de apoyo para el análisis de los riesgos del cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe, y que se detalla en el documento sucesivo.