

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

Generación de bases de datos climáticos para el análisis de riesgos en las costas de Santa Catarina (Brasil)

Resumen para gestores

Íñigo J. Losada Rodríguez
Cristina Izaguirre Lasa



NACIONES UNIDAS

CEPAL

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE



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

Generación de bases de datos climáticos para el análisis de riesgos en las costas de Santa Catarina (Brasil)

Resumen para gestores

Íñigo J. Losada Rodríguez
Cristina Izaguirre Lasa



NACIONES UNIDAS

CEPAL

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE



Este documento fue preparado por Íñigo J. Losada Rodríguez y Cristina Izaguirre Lasa, del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. En este documento de síntesis se presenta el Resumen para Gestores del proyecto "Generación e integración de bases de datos climáticos históricos y de proyecciones de cambio climático para la gestión de riesgos costeros en el estado de Santa Catarina (Brasil)", financiado por el acuerdo de cooperación técnica entre la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el Ministerio del Medio Ambiente del Brasil, "Desarrollo sostenible y su integración con América del Sur", coordinado por la Oficina de la CEPAL en Brasilia.

Los trabajos del proyecto fueron realizados por los investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Adrián Acevedo, Paula Camus, Omar Castellanos, Aba Cid, Antonio Espejo, Carmen Magaña, Melisa Menéndez y Alexandra Toimil, bajo la dirección de Íñigo J. Losada Rodríguez.

Además, para la ejecución de este proyecto se contó con la colaboración de un equipo de investigación de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) integrado por José Mauricio de Camargo, Arthur de Oliveira Hernández, Maiara Werner Pinto y Michel Franco Volpato Prado, bajo la dirección de Antonio Klein.

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 la Organización.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de este documento no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Índice

I.	Contexto general.....	7
A.	El riesgo en un mundo cambiante.....	7
B.	Un problema de escala	9
C.	La inundación costera	10
D.	El origen del proyecto de Santa Catarina	12
II.	El estudio de Santa Catarina, Brasil	13
A.	Localización y problemática	13
B.	Objetivos	14
C.	Metodología.....	14
D.	Peligrosidad.....	15
1.	Viento.....	15
2.	Oleaje	18
3.	Nivel del mar.....	23
4.	Caudal fluvial	28
E.	Inundación	28
1.	Metodología.....	28
2.	Análisis forense	29
3.	Análisis de sensibilidad: escenarios de cambio climático	32
F.	Transferencia, difusión y capacitación	34
1.	Atlas de caracterización climática	34
2.	Capacitación.....	36
III.	Otras aplicaciones	37
A.	Posibles usos de SW-StaCatarina	37
B.	Posibles usos de ROW-StaCatarina	38
C.	Posibles usos de GOST-StaCatarina.....	38
	Bibliografía.....	39

Gráficos

Grafico 1	Portada de los documentos “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”, “Impactos”, “Vulnerabilidad y exposición” y “Riesgos” publicados en el marco del proyecto “Estudio Regional de los Efectos del Cambio Climático en la costa de América Latina y el Caribe”.....	9
Gráfico 2	Validación del viento SeaWind realizada con un registro in-situ localizado en mar abierto con respecto a un nodo del dominio D01.....	16
Gráfico 3	Panel superior: serie temporal horaria de la velocidad del viento a 10 metros de SeaWind-StaCatarina (lon: 48.39°E, lat: 27.57°S). Panel inferior: velocidad del viento media (m/s) a 10 m.....	17
Gráfico 4	Comparación de las series temporales de Hs, Tp, y θ_p de la boya de Florianópolis (línea azul) y el modelo (línea roja). Se muestra desde octubre de 2004 a mayo de 2005.....	20
Gráfico 5	Altura de ola media anual, en metros, y dirección media anual del oleaje; altura de ola máxima anual, en metros (panel superior, de izquierda a derecha). Período medio anual y período de pico anual, en segundos (panel inferior, de izquierda a derecha).....	21
Gráfico 6	Cambios en Hs media en la zona de Santa Catarina, en metros, para diferentes escenarios (RCP4.5 superior y RCP8.5 inferior) y períodos de tiempo (2016-2035 izquierda, 2046-2065 medio y 2081-2099 derecha) respecto al período de referencia (1986-2005).....	23
Gráfico 7	Cambios estimados en el nivel medio del mar a partir de la información procedente de satélite recopilada durante los últimos 22 años.....	24
Gráfico 8	Series temporales horarias de nivel del mar (m) a partir del nodo más cercano de GOST y el registro del mareógrafo de Imbituba.....	26
Gráfico 9	Cambios en el percentil 99,9 de la marea meteorológica en la zona de Santa Catarina, en metros, para diferentes escenarios (RCP4.5 superior y RCP8.5 inferior) y períodos de tiempo (2016-2035 izquierda, 2046-2065 medio y 2081-2099 derecha).....	27
Gráfico 10	Imágenes de Araranguá (izquierda) y el puerto de Itajaí (derecha) durante un evento extremo de inundación.....	30
Gráfico 11	Mapa de inundación máxima obtenido como resultado de la simulación del evento de inundación de julio de 1983.....	31
Gráfico 12	Mapa de inundación máxima obtenido como resultado de la simulación del evento de inundación de junio de 2006.....	32
Gráfico 13	Mapa de inundación máxima obtenido como resultado de la simulación del evento de inundación de junio de 2006.....	33
Gráfico 14	Ficha de caracterización estadística del viento para una determinada localización [48.5°O; 27.8°S].....	34
Gráfico 15	Ficha de caracterización estadística del oleaje para una determinada localización [48.2°O; 28.5°S].....	35
Gráfico 16	Ficha de caracterización estadística del nivel del mar para una determinada localización [48.4°O; 28.92°S].....	36

Recuadros

Recuadro 1	Definición de conceptos.....	8
Recuadro 2	Contribución de las dinámicas al riesgo costero.....	11
Recuadro 3	SW-StaCatarina.....	18
Recuadro 4	ROW-StaCatarina.....	19
Recuadro 5	GOST-StaCatarina.....	25

Diagramas

Diagrama 1	Esquema metodológico del riesgo y sus componentes	7
Diagrama 2	Enfoque de los proyectos de cambio climático teniendo en cuenta las escalas espaciales de estudio	10
Diagrama 3	Esquema de la cota de inundación (CI) y sus componentes	11
Diagrama 4	Esquema de la metodología desarrollada para la generación de bases de datos de peligrosidad de alta resolución en la costa de Santa Catarina	15
Diagrama 5	Esquema de la metodología desarrollada por IHCantabria para el desarrollo de la base de datos de viento SW-StaCatarina	16
Diagrama 6	Esquema de la metodología desarrollada para generar la base de datos ROW-StaCatarina	19
Diagrama 7	Esquema general de la metodología para la proyección del oleaje	22
Diagrama 8	Esquema de la metodología utilizada para generar la base de datos GOST-StaCatarina.....	25
Diagrama 9	Esquema de la metodología utilizada para proyectar la marea meteorológica	27
Diagrama 10	Esquema de la metodología desarrollada para el análisis del impacto de inundación a alta resolución en la costa de Santa Catarina.....	29

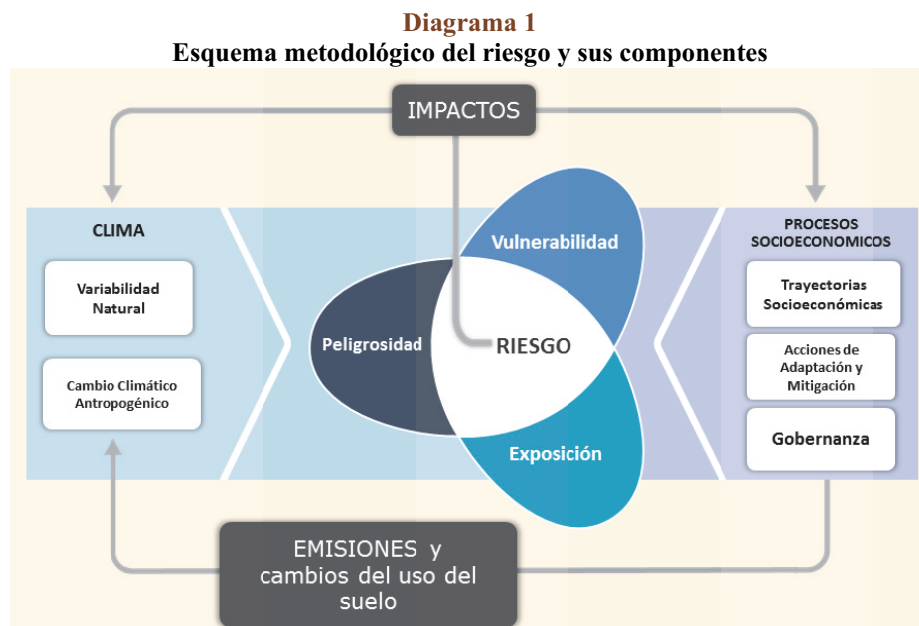
Mapa

Mapa 1	Localización del estado de Santa Catarina en Brasil	13
--------	---	----

I. Contexto general

A. El riesgo en un mundo cambiante

En los últimos decenios, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. El cambio climático conlleva interacciones complejas y cambios en las probabilidades de impactos, dando lugar a cambios en los patrones de riesgo (IPCC, 2014). La focalización en el riesgo, entendido como el producto de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, ayuda a la toma de decisiones en el contexto del cambio climático. El diagrama 1 resume de manera esquemática la metodología de riesgo, donde la peligrosidad hace referencia a la probabilidad de que un evento cause un daño, la exposición al número de personas y activos expuestos a la peligrosidad de un determinado evento y la vulnerabilidad a la susceptibilidad de un sistema a ser dañado (Wong *et al.* 2014).



Fuente: IPCC, 2014.

Recuadro 1

Definición de conceptos

Peligrosidad: Probabilidad asociada a que una amenaza de origen natural o humano, o un impacto físico, cause daños sobre el sistema natural o socioeconómico.

Exposición: Personas y activos naturales (especies, ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales) y socioeconómicos (medios de subsistencia, infraestructuras, activos económicos, sociales o culturales) que podrían verse negativamente afectados por una amenaza.

Vulnerabilidad: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

Impactos: Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático.

Riesgo: Consecuencias potenciales inciertas sobre un activo vulnerable que se encuentra amenazado por un evento.

Adaptación: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos.

Adaptado de IPCC (2014)

Siguiendo este enfoque, en los últimos años se han llevado a cabo numerosos estudios de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo que permiten analizar las consecuencias y costes de la inacción frente a la implementación de medidas de adaptación ante distintos escenarios de cambio climático. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (CEPAL), la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) —dependiente del Gobierno de España— y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) desarrollaron durante los años 2009 a 2012, una metodología específica para la evaluación de impactos del cambio climático en zonas costeras a lo largo de más de 70.000 km, que ha puesto a disposición de los países de América Latina y el Caribe.

Esta metodología y las herramientas asociadas al “Estudio Regional de los Efectos del Cambio Climático en la costa de América Latina y el Caribe” pueden ser de gran utilidad para evaluar impactos, plantear medidas de adaptación y realizar un análisis económico de las mismas. También permiten complementar los análisis a escala local necesarios para los Estudios Regionales sobre Economía del Cambio Climático (ERECC), coordinados técnicamente por la CEPAL, que ayudan a países y regiones a identificar las implicaciones del cambio climático sobre sus economías y ciudadanos.

Las metodologías desarrolladas y todos los resultados fueron publicados en un conjunto de cuatro documentos denominados “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”, “Impactos”, “Vulnerabilidad y exposición” y “Riesgos”, acompañados de los documentos de referencia “Guía Metodológica” y “Efectos Teóricos”. Toda la documentación se puede descargar en: <http://www.cepal.org/es/efectos-cambio-climatico-la-costa-america-latina-caribe>.

Grafico 1

Portada de los documentos “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”, “Impactos”, “Vulnerabilidad y exposición” y “Riesgos” publicados en el marco del proyecto “Estudio Regional de los Efectos del Cambio Climático en la costa de América Latina y el Caribe”

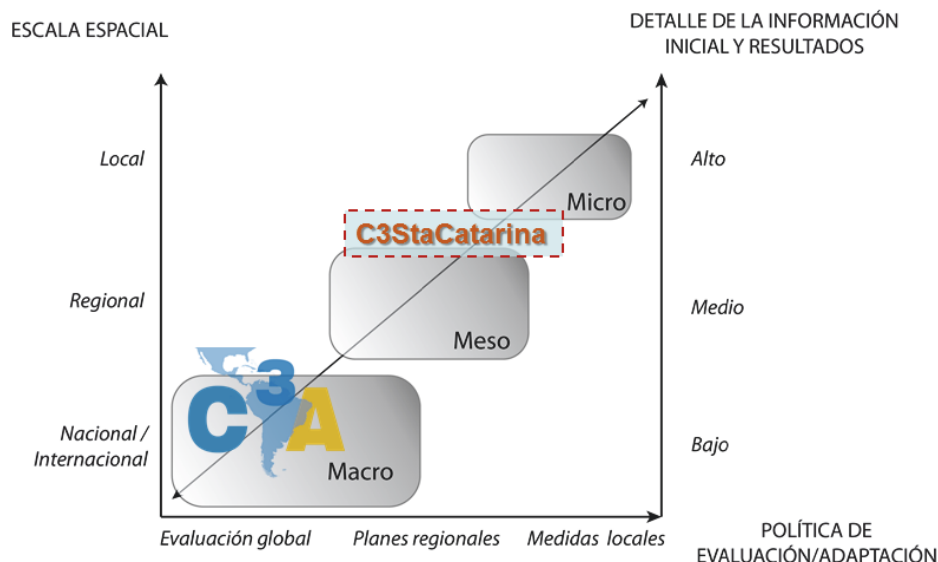


Fuente: CEPAL.

B. Un problema de escala

Las metodologías y resultados obtenidos en dicho proyecto sirven de base para la realización de nuevos estudios sectoriales, nacionales o regionales que permitan hacer análisis de alta resolución sobre impactos y adaptación en las zonas costeras de América Latina y el Caribe. Dependiendo de la escala espacial de trabajo los objetivos serán diferentes y, por tanto, también lo serán los datos necesarios de partida y los modelos a utilizar (véase el diagrama 2). En la escala continental, 0(1.000 km), el interés del estudio de impactos de cambio climático radica en identificar zonas de mayor riesgo donde centrar el foco para la realización de estudios a más alta resolución y poder implementar medidas de adaptación. Para la escala continental alcance la resolución mínima recomendable de los datos, tanto de peligrosidad como de exposición, está en el entorno de las decenas de km, siendo deseable poder bajar de los 10 km, y los modelos de impacto pueden estar basados en indicadores. En la escala regional, 0(100 km), es deseable contar con datos con resolución de centenares de metros y aplicar modelos basados en procesos que resuelvan de manera más precisa los impactos. Finalmente, en la escala local, 0(10 km), lo ideal es utilizar modelos de alta resolución y contar para ello con datos climáticos con resolución de decenas de metros, topográficos con resolución de metros e información específica de la vulnerabilidad para aplicar modelos de impacto que puedan resolver los procesos más complejos.

Diagrama 2
Enfoque de los proyectos de cambio climático teniendo en cuenta las escalas espaciales de estudio



Fuente: IH Cantabria.

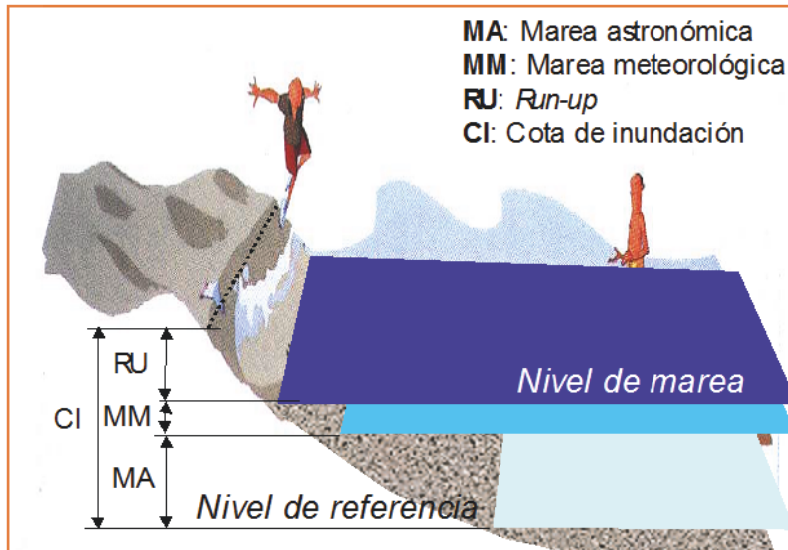
C. La inundación costera

La inundación costera es un impacto adverso que en la actualidad ya sufren muchos sistemas costeros y zonas bajas y que, debido al aumento del nivel del mar y a los cambios en los eventos extremos, se verá agravado en el futuro. Es, por lo tanto, un impacto de especial relevancia que afecta a los sistemas naturales y socioeconómicos dando lugar a consecuencias de diferente índole.

La inundación costera está generada fundamentalmente por la acción del oleaje, las mareas (astronómica y meteorológica) y el aumento del nivel medio del mar (véase el diagrama 3). Sin embargo, en zonas con aporte fluvial, el caudal del río (que depende de la precipitación y de las características de la cuenca) juega un papel fundamental. La suma de la contribución de las distintas dinámicas da lugar a una variable denominada nivel del mar total (TWL de sus siglas en inglés) o cota de inundación (CI) que permite caracterizar el impacto de inundación.

Los cambios en los factores climáticos (peligrosidad) han de ser estudiados para poder estimar el riesgo futuro ante distintos escenarios de cambio climático. Además, dependiendo de la escala espacial, la disponibilidad de datos climáticos, batimétricos y topográficos, y las incertidumbres asociadas, el enfoque para el estudio de la inundación será diferente, pudiendo abordarse con diferentes métodos que van desde el uso de indicadores a modelos de alta resolución basados en procesos.

Diagrama 3
Esquema de la cota de inundación (CI) y sus componentes



Fuente: IH Cantabria.

Recuadro 2 **Contribución de las dinámicas al riesgo costero**

Viento: Los vientos intervienen en el cambio en las masas de aire, los flujos de humedad, la evaporación de la superficie del mar y son uno de los agentes más importantes en el comportamiento resultante de las dinámicas en la superficie del mar. Este hecho hace que resulte esencial su conocimiento sobre el medio marino para poder reconstruir posteriormente el oleaje y marea meteorológica, generadas por viento (dinámicas marinas más relevantes que contribuyen al riesgo costero). Además, vientos intensos en el litoral pueden provocar daños directos, tanto físicos como materiales.

Oleaje: El oleaje constituye una de las dinámicas determinantes en los riesgos costeros de inundación y erosión. En el caso de la inundación, la rotura del oleaje genera un aumento del nivel del mar, que puede llegar a ser de magnitud importante en el caso de eventos extremos, produciendo daños sobre el sistema socioeconómico y natural. Por otro lado, el oleaje es la dinámica más importante en la estabilidad y evolución de una playa. La rotura del oleaje pone en suspensión gran cantidad de sedimento que, de este modo, es susceptible de ser transportado por las corrientes existentes. Las corrientes más importantes de la zona de rompientes son las generadas por la propia rotura del oleaje, tanto en sentido transversal (corrientes de resaca y de retorno) como en sentido longitudinal, produciendo variaciones del fondo. Los temporales pueden producir importantes modificaciones del perfil y planta de una playa. Por tanto, la disponibilidad de datos históricos de oleaje es imprescindible para la caracterización de los riesgos costeros de inundación y erosión, así como para el diseño de cualquier tipo de infraestructura costera.

Nivel del mar: Las zonas costeras son especialmente vulnerables a la variabilidad climática y a los cambios en el nivel del mar. El nivel del mar en un tramo de costa específico es el resultado de la acción de las dinámicas marina y meteorológica, resultando en un fenómeno complejo, ya que en él intervienen las distintas componentes que lo forman. Sin tener en cuenta factores locales procedentes de tierra en dominios semi-cerrados (interior de bahías, riberas de ríos, etc.), el nivel del mar se define generalmente como la acción de tres agentes: el nivel medio del mar, la marea astronómica y la marea meteorológica.

Nivel medio del mar: el aumento del nivel medio del mar global debido al calentamiento del planeta, junto con otros aspectos locales tales como la subsidencia dan lugar a cambios en el nivel medio del mar local que agravarán la inundación y erosión costera.

Marea astronómica: la marea astronómica es el cambio en el nivel del mar asociado a la influencia gravitatoria de los astros, principalmente el sol y la luna. Aunque esta variable es determinista y no se ve afectada por el cambio climático es una componente de la inundación fundamental en aquellos lugares con rangos de mareas elevados. El hecho de que valores extremos de variables aleatorias como el oleaje o la marea meteorológica coincidan con eventos de pleamar incrementa la peligrosidad del impacto de inundación.

Recuadro 2 (conclusión)

Marea meteorológica: la marea meteorológica es la variación del nivel del mar como consecuencia de cambios en la presión atmosférica y la acción del viento. Su contribución a la inundación es significativa cuando va asociada al paso de tormentas, siendo especialmente relevante en zonas tropicales, donde los huracanes generan importantes aumentos del nivel del mar a su paso generando consecuencias nefastas en la costa.

Las variaciones del nivel del mar sobre la costa pueden contribuir a riesgos costeros de diferente índole. Dos impactos directamente relacionados con la variable nivel del mar son la inundación y la erosión costera. Este aspecto se debe a que, en comparación con las variaciones del nivel medio del mar, los eventos de niveles del mar excepcionalmente elevados (niveles extremos) presentan un efecto en la costa inmediato.

Los cambios graduales o abruptos del nivel del mar tienen, por tanto, un papel importante en el riesgo costero, pudiendo afectar a múltiples sectores sociales (urbanismo, ordenación de territorio, transporte, turismo, etc) y naturales (ecosistemas, defensas bióticas de la costa, etc...).

Caudal fluvial: Una inundación se produce cuando la capacidad de desagüe del territorio es insuficiente frente a unas precipitaciones importantes sobre la cuenca de drenaje. La magnitud de la inundación depende de la cantidad de precipitación, de las características de la cuenca vertiente al punto considerado (fundamentalmente su tamaño y la capacidad de infiltración del terreno) y, por último, de las condiciones de drenaje de ese punto concreto. Esta menor capacidad de desagüe puede ser debido a motivos naturales, o estar inducida por el hombre mediante la ocupación parcial o total del cauce fluvial. El cambio climático afecta a los patrones de precipitación, cuyo aumento contribuirá a la inundación a lo largo del cauce del río, y contribuye al aumento del nivel medio del mar, lo que influirá en la capacidad de desagüe del río en la costa, influyendo en la inundación costera.

Para un determinado evento de crecida la capacidad del cauce puede ser insuficiente localmente, por lo que el nivel de la lámina de agua se eleva ocupando parcialmente el valle, y retornando al cauce aguas abajo en cuanto su capacidad de desagüe aumenta. Cuando el caudal que circula por el río disminuye, las aguas vuelven a su cauce normal. Para determinar la extensión y calado del impacto de inundación es necesario conocer los caudales de crecida. La existencia de medidas de caudal es escasa por lo que se realizan estudios hidrológicos de la cuenca que drena en la zona de interés que transforman la lluvia en escorrentía superficial. Por tanto, además de caracterizar la cuenca vertiente y la configuración del terreno y cauce, es necesario disponer de registros de precipitación para la reconstrucción histórica de los caudales.

D. El origen del proyecto de Santa Catarina

Dentro del convenio "El desarrollo sostenible y su integración con América del Sur" suscrito por el Ministério do Meio Ambiente do Brasil y CEPAL se define el proyecto "Generación e integración de bases de datos climáticas históricas y de proyecciones de cambio climático para la gestión de riesgos costeros en el estado de Santa Catarina, Brasil", en el que el Gobierno de Brasil solicita a la CEPAL emprender las acciones necesarias para desarrollar un análisis del cambio climático en la costa de Santa Catarina con base en los resultados obtenidos en el proyecto C3A. Se trata, por tanto, de realizar una "reducción de escala" (downscaling) y adaptar la metodología utilizada a un tramo costero regional con el fin de localizar una evaluación de riesgos que permita la planificación de medidas de reducción de riesgo y de adaptación al cambio climático. A estos efectos se eligió el estado de Santa Catarina para desarrollar las bases de datos históricas de las dinámicas marinas actuales y elaborar proyecciones de cambio climático, con el fin de analizar los riesgos en la costa.

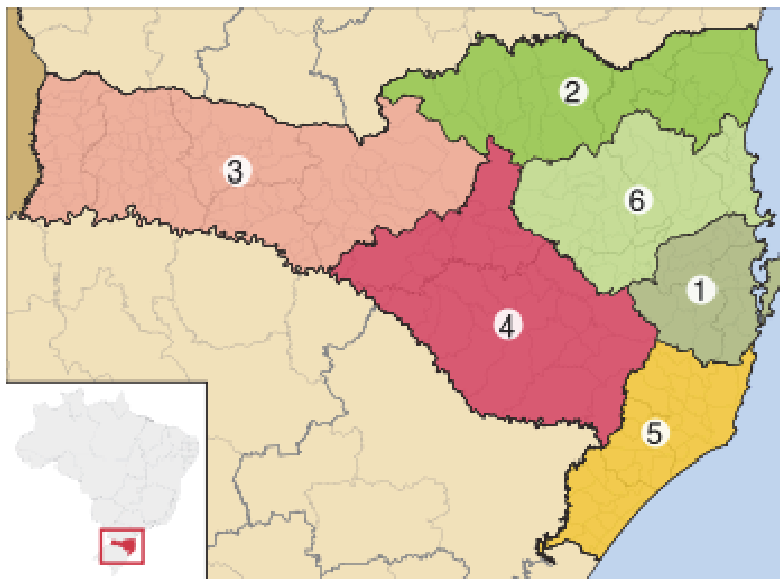
El proyecto parte de la base de que la cuantificación de los impactos a escala local a alta resolución requiere disponer de bases de datos históricas y de proyecciones de las dinámicas generadoras (peligrosidad) a alta resolución. El desarrollo de estas bases de datos para el estado de Santa Catarina tiene un importante valor añadido ya que abre un amplio abanico de aplicaciones y usos para cualquier aplicación sectorial de la costa. Por tanto, en esta primera fase no se analiza la vulnerabilidad ni el riesgo.

II. El estudio de Santa Catarina, Brasil

A. Localización y problemática

Santa Catarina es un estado de Brasil localizado en el centro de la región Sur del país. En él se han identificado problemas de inundación fluvial en la región de Itajaí por desbordamientos del río de Itajaí-Açu cerca de su confluencia con Itajaí-Mirim, viéndose la localidad de Blumenau especialmente afectada. Por otro lado, y aunque en la mayoría de casos sus efectos son reducidos, también se conocen eventos de inundación costera causados por ciclones extra-tropicales, fenómenos comunes en el sur y en el sudeste de la costa de Brasil. Los efectos del cambio climático, en especial el aumento del nivel medio del mar, agravarán el impacto de inundación sobre los sistemas costeros naturales y socioeconómicos.

Mapa 1
Localización del estado de Santa Catarina en Brasil



Fuente: Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC).

B. Objetivos

Dentro de la metodología general de riesgo planteada para el estudio de las consecuencias del cambio climático en la costa, basada en el producto de la peligrosidad por la exposición y por la vulnerabilidad, este estudio se centra en la componente de Peligrosidad, con el objetivo general de generar las bases de datos necesarias relativas a las dinámicas, tanto históricas como de proyecciones de cambio climático, para el análisis de riesgos en la costa de Santa Catarina.

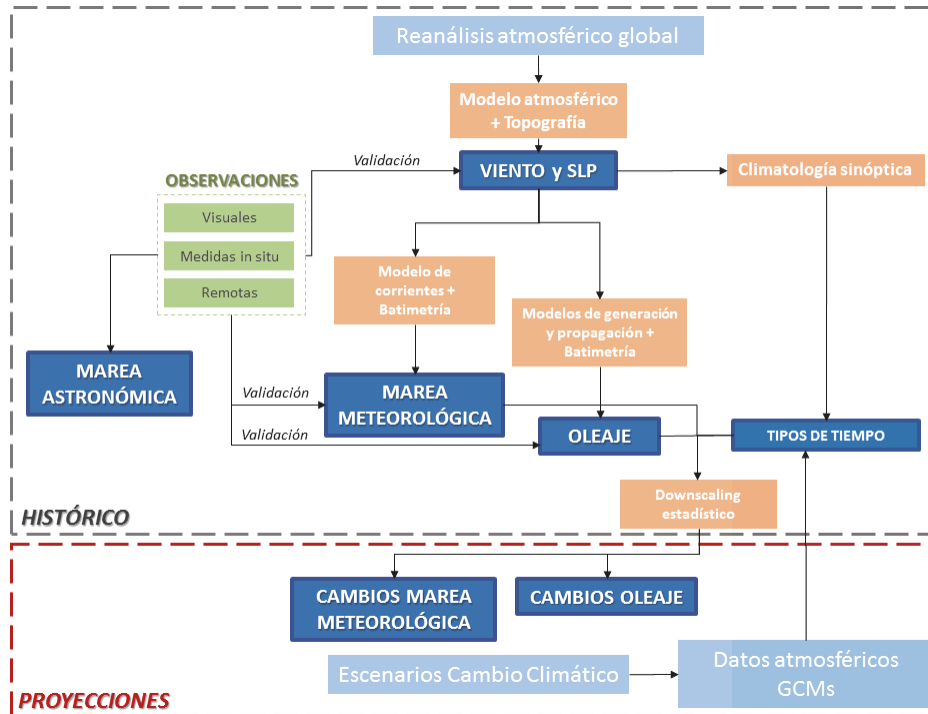
Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Generar bases de datos históricas de alta resolución de viento, oleaje y nivel del mar (marea meteorológica y marea astronómica).
- Caracterizar estadísticamente las dinámicas costeras relevantes para la evaluación de la peligrosidad con una alta resolución espacial en toda la costa, poniendo especial interés en los eventos extremos, la variabilidad temporal y las tendencias de largo plazo.
- Generar proyecciones de oleaje y marea meteorológica para distintos escenarios de cambio climático.
- Reconstrucción histórica de los flujos de agua generados en los cauces de la cuenca vertiente a la ciudad de Itajaí, resultante de los eventos de precipitación.
- Desarrollo de una metodología para realizar estudios de alta resolución de impactos de inundación, con aplicación en una localización específica de la costa de Santa Catarina (tramo que se extiende desde la punta al norte de Bombinhas e incluye Itapema, Balneario Camboriú, Itajaí hasta la punta de Armacao).
- Identificación y análisis forense de eventos extremos de inundación.

C. Metodología

La metodología general desarrollada para la generación de bases de datos de alta resolución espacial se resume en el diagrama 4. En ella se hace una diferenciación entre las bases de datos históricas y las bases de datos de proyecciones para distintos escenarios de cambio climático. A la hora de generar bases de datos históricas de alta resolución espacial se parte de un reanálisis (datos simulados) atmosférico global con datos de vientos y presión. Mediante un modelo atmosférico regional y datos de topografía se generan los datos de viento y presión para el estado de Santa Catarina, que son validados con datos de observaciones. Los vientos generados, junto con datos batimétricos son las condiciones de contorno que alimentan los modelos de generación y propagación del oleaje y el modelo de generación de corrientes. La simulación de estos modelos da lugar a la obtención de las bases de datos de oleaje y marea meteorológica, que son validadas con datos medidos de observaciones. A partir de los datos de observaciones instrumentales (satélite y mareógrafos) se genera la base de datos de marea astronómica. Por último, en lo referente a datos históricos, cabe destacar que los datos atmosféricos generados permiten establecer patrones de tiempo en la zona de interés que, junto con los datos de oleaje y marea meteorológica, permiten establecer un modelo para inferir los cambios en estas dinámicas en el futuro. Las proyecciones de cambio climático se estiman a partir de los datos atmosféricos de los Modelos Climáticos Globales (GCMs de sus siglas en inglés) para distintos escenarios de cambio climático.

Diagrama 4
Esquema de la metodología desarrollada para la generación de bases de datos de peligrosidad de alta resolución en la costa de Santa Catarina



Fuente: IH Cantabria.

D. Peligrosidad

Las distintas dinámicas responsables de la inundación costera son el viento, oleaje, nivel del mar y caudales. Para el viento se ha desarrollado una base de datos histórica de alta resolución (SW-StaCatarina). Para el oleaje y nivel del mar se han desarrollado bases de datos históricas y de proyecciones de alta resolución a lo largo del litoral de Santa Catarina (ROW-StaCatarina y GOST-StaCatarina) y para el caudal se proporciona una reconstrucción histórica de los flujos de agua generados en los cauces de la cuenca vertiente a la ciudad de Itajaí, resultante de los eventos de precipitación. Además de generar las bases de datos se ha hecho un análisis de cada una de ellas caracterizando estadísticamente las dinámicas.

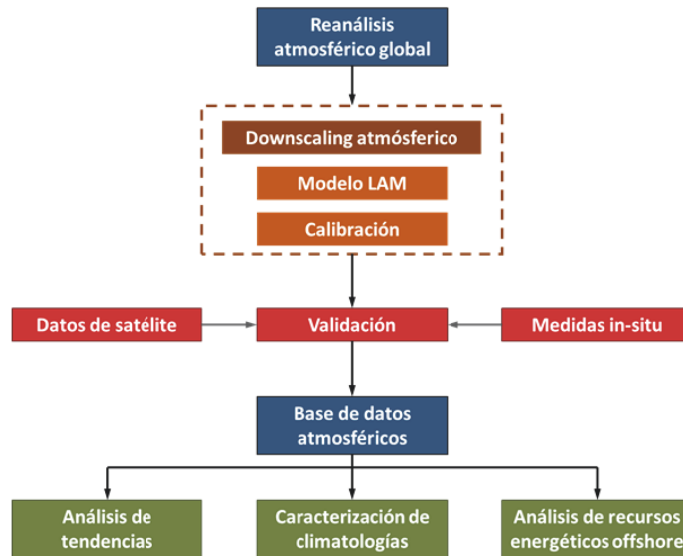
1. Viento

Para la reconstrucción de los campos de viento marinos a lo largo del Estado de Santa Catarina, IHCantabria ha desarrollado una metodología (véase el diagrama 5) que consiste en la recopilación de bases de datos de interés, ya sea para su uso en la generación de datos simulados o para la validación de éstos; modelado numérico atmosférico, validación y calibración para evaluar la calidad de la base de datos de viento regional y, finalmente post-procesado de la base de datos atmosférica resultante: 'SeaWind' (más detalles en Menéndez *et al.*, 2014).

Los vientos Seawind-Sta Catarina se han simulado con el modelo WRF (Weather Research & Forecasting model) y el módulo ARW (Advanced Research dynamical solver) en su versión 3.5. Para conseguir que Seawind-Sta Catarina alcance una alta resolución espacial, se han utilizado varios dominios anidados telescópicamente. Se ha definido un primer dominio espacial con una resolución

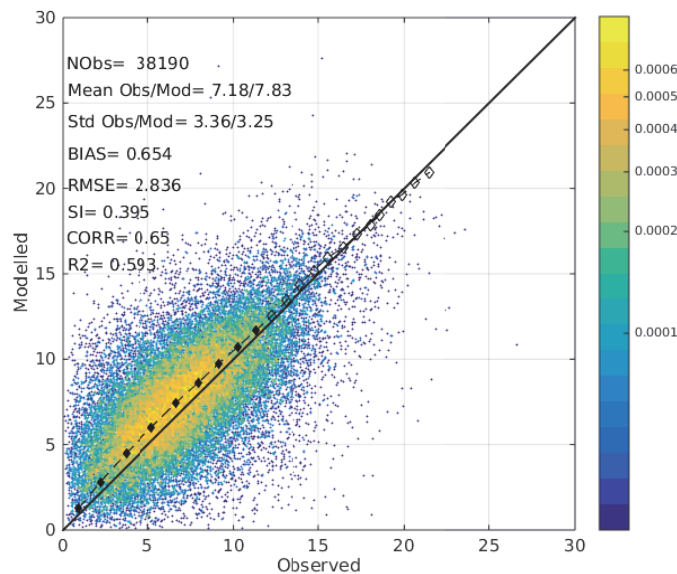
horizontal de 9 km y un segundo dominio D02 con una resolución de 3 km aproximadamente. En cuanto a la cobertura y resolución temporal SW-StaCatarina cubre el período 1979-2010, que comprende un total de 32 años simulados, con resolución horaria. Los datos procedentes de modelado numérico han sido validados con datos instrumentales de satélite para comprobar su calidad. El gráfico 2 muestra el diagrama de dispersión resultante de comparar el punto de malla más cercano de la base de datos SW-StaCatarina con una estación offshore, donde se puede ver muy buena correlación entre los datos.

Diagrama 5
Esquema de la metodología desarrollada por IHCantabria para el desarrollo de la base de datos de viento SW-StaCatarina



Fuente: IH Cantabria.

Gráfico 2
Validación del viento SeaWind realizada con un registro in-situ localizado en mar abierto con respecto a un nodo del dominio D01

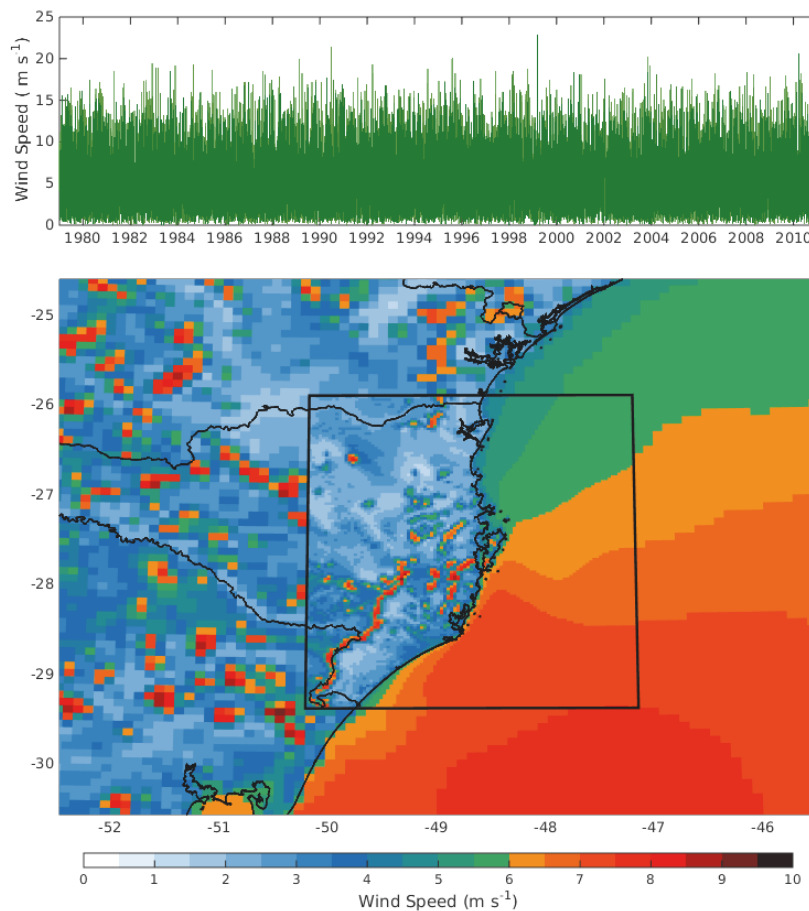


Fuente: IH Cantabria.

El gráfico 3 muestra una serie temporal de velocidad del viento a 10 m de altura (panel superior) y un mapa con la velocidad media del viento (m/s) en Santa Catarina en el período 1979-2010, obtenido a partir de la base de datos generada. En el mapa espacial se observa claramente el gradiente tierra-mar, con vientos, en general, de menor intensidad sobre tierra a excepción de ciertas aceleraciones debidas a accidentes orográficos destacables en el estado de Santa Catarina. En la región marina y costera se observa una importante zonación de la intensidad Norte-Sur, con mayor intensidad de viento en la mitad sur del estado. Las mayores intensidades medias de viento (alrededor de 7 m/s) se localizan en las regiones de Florianópolis y Tubarao mientras que las menores intensidades se sitúan en las regiones al norte de Joinville y Blumenau, con intensidades medias por debajo de los 5 m/s.

Gráfico 3

Panel superior: serie temporal horaria de la velocidad del viento a 10 metros de SeaWind-StaCatarina (lon: 48.39°E, lat: 27.57°S). Panel inferior: velocidad del viento media (m/s) a 10 m



Fuente: IH Cantabria.

Recuadro 3 SW-StaCatarina

Cobertura espacial: Estado de Santa Catarina y mar adyacente

Resolución espacial: 3 km

Cobertura temporal: enero 1979-diciembre 2010

Resolución temporal: horaria

Parámetros:

1. uasmean: viento zonal medio horario a 10 metros de altura
2. vasmear: viento meridional medio horario a 10 metros de altura
3. ua: viento zonal para 5 alturas diferentes
4. va: viento meridional para 5 alturas diferentes
5. tasmean: temperatura media de la atmósfera en superficie
6. psl: presión atmosférica a nivel del mar
7. vis: visibilidad del aire
8. pr: precipitación total

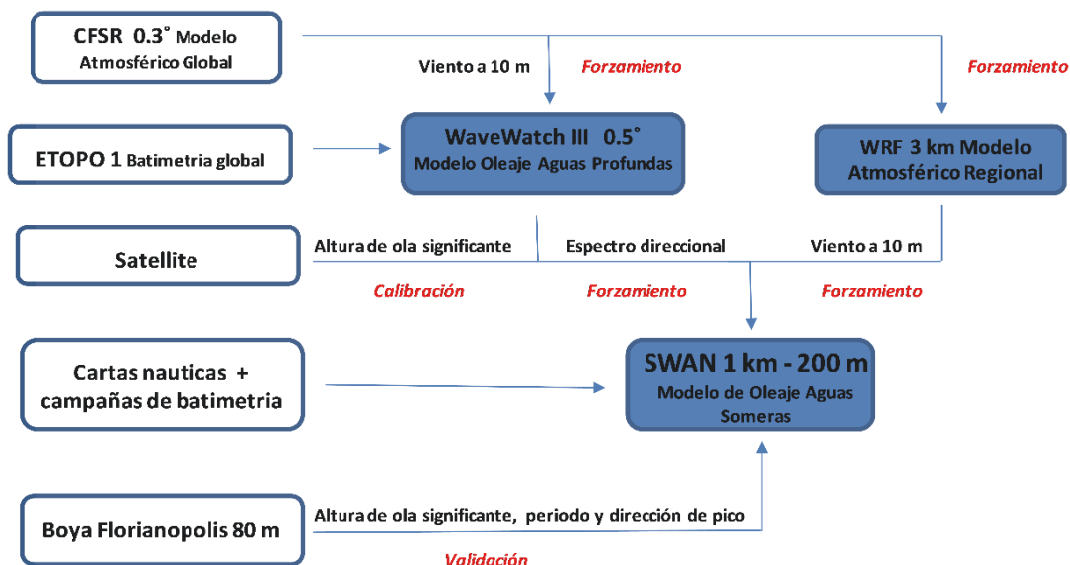
Formato: NetCDF

2. Oleaje

El estado de Santa Catarina, situado en la vertiente oeste de la cuenca Sud Atlántica a una latitud comprendida entre 25 y 29°S, está expuesto tanto al oleaje tipo *sea* generado por los vientos Alisios del Atlántico Sur como a aquellos tipo *swell* generados por tormentas extra tropicales que fluyen a mayores latitudes (40-60°S). Ocasionalmente, alguna de estas tormentas se descuelga de su trayectoria normal, desplazándose hacia el norte por el mar argentino y perdiendo fuerza a medida que avanza a latitudes menores. Estas tormentas, junto a otras de carácter más esporádico, denominadas tormentas tropicales o subtropicales (Ciclón Catarina, marzo de 2004), son las responsables de los oleajes más extremos que inciden en el estado de Santa Catarina. Por otro lado, más al norte, en la zona de convergencia intertropical dominan los vientos Alisios, que giran y se amplifican al llegar a la costa tornándose del Nor-nordeste. Estos vientos, debido a su proximidad a la costa, son capaces de generar oleajes de corto período pero de cierta entidad. Por tanto, la zona de estudio presenta un oleaje complejo, en el que se combinan simultáneamente el mar de fondo lejano del WSW y el mar de viento del NNE. Esta característica obliga a trabajar con el espectro de oleaje completo, poniendo especial atención sobre el modelado de cada una de las familias de oleaje existentes.

La caracterización histórica del oleaje en esta zona es compleja puesto que los datos de observaciones no suelen ser homogéneos ni en el espacio ni en el tiempo. En este punto parece apropiado introducir el concepto de boya virtual como punto de reanálisis en el que, mediante un modelo numérico, se simula la serie histórica de oleaje en una localización específica. El objetivo en este estudio ha sido crear una serie de boyas virtuales a lo largo de la costa de Santa Catarina con oleaje histórico. El diagrama 6 muestra un esquema de la metodología utilizada

La generación de esta base de datos comprende el modelado del oleaje en aguas someras, mediante el modelo SWAN en su versión 41.01, forzado con vientos de alta resolución (SW-StaCatarina) y oleaje en aguas abiertas (GOW, Reguero *et al.* 2012) y utilizando información batimétrica de detalle. Los datos de oleaje regional generados se validan con medidas instrumentales de boyas costeras. Para la ejecución del modelo se ha empleado un esquema de mallas anidadas. La primera malla (M_10), de resolución 10 km, sirve para trasladar el oleaje al contorno de la malla intermedia con un menor coste computacional y actuar como esponja para atenuar efectos derivados del anidamiento al modelo global. La malla M1, cubre completamente el estado de Santa Catarina con una resolución de 1 km. Por último, la malla M_Itajai abarca la zona seleccionada para la realización del estudio de detalle, con una resolución cercana a los 200 m.

Diagrama 6**Esquema de la metodología desarrollada para generar la base de datos ROW-StaCatarina**

Fuente: IH Cantabria.

La reconstrucción histórica regional de la dinámica del oleaje a lo largo del estado de Santa Catarina ha dado lugar a la base de datos ROW-StaCatarina que contiene información histórica desde febrero de 1979 hasta diciembre de 2010, con resolución temporal horaria y resolución espacial de, al menos, 1 km.

Recuadro 4 ROW-StaCatarina

Cobertura espacial: Estado de Santa Catarina

Resolución espacial: 1 km a 200 m

Cobertura temporal: enero 1979-diciembre 2010

Resolución temporal: horaria

Parámetros:

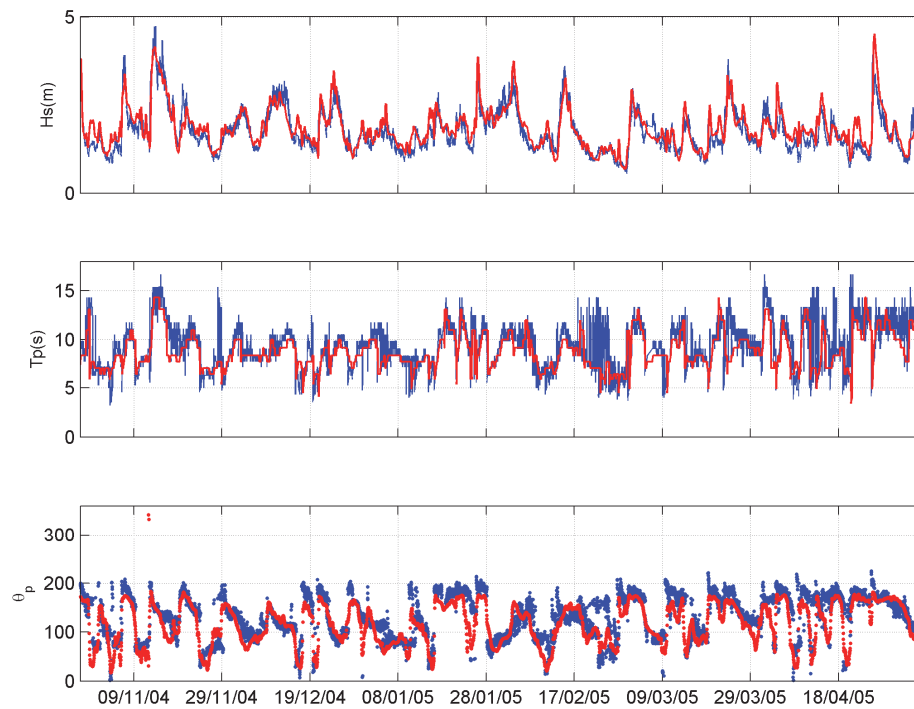
1. hs: altura de ola significativa
2. tm01: período medio
3. tm02: período medio
4. tp: período de pico
5. dir: dirección media
6. pdir: dirección de pico
7. hswell: altura de ola del mar de fondo
8. fspr: dispersión frecuencial
9. dspr: dispersión direccional

Formato: NetCDF

En el gráfico 4 se muestran las series temporales de oleaje (altura de ola, período y dirección) desde octubre de 2004 a mayo de 2005 correspondientes a la boya de Florianópolis (línea azul) y a un punto de reanálisis (boya virtual localizada en el mismo punto) de la base de datos ROW-StaCatarina. Se puede ver cómo el modelo (línea roja) reproduce correctamente la variabilidad de los parámetros registrados por la boya.

Gráfico 4

Comparación de las series temporales de H_s , T_p , y θ_p de la boya de Florianópolis (línea azul) y el modelo (línea roja). Se muestra desde octubre de 2004 a mayo de 2005

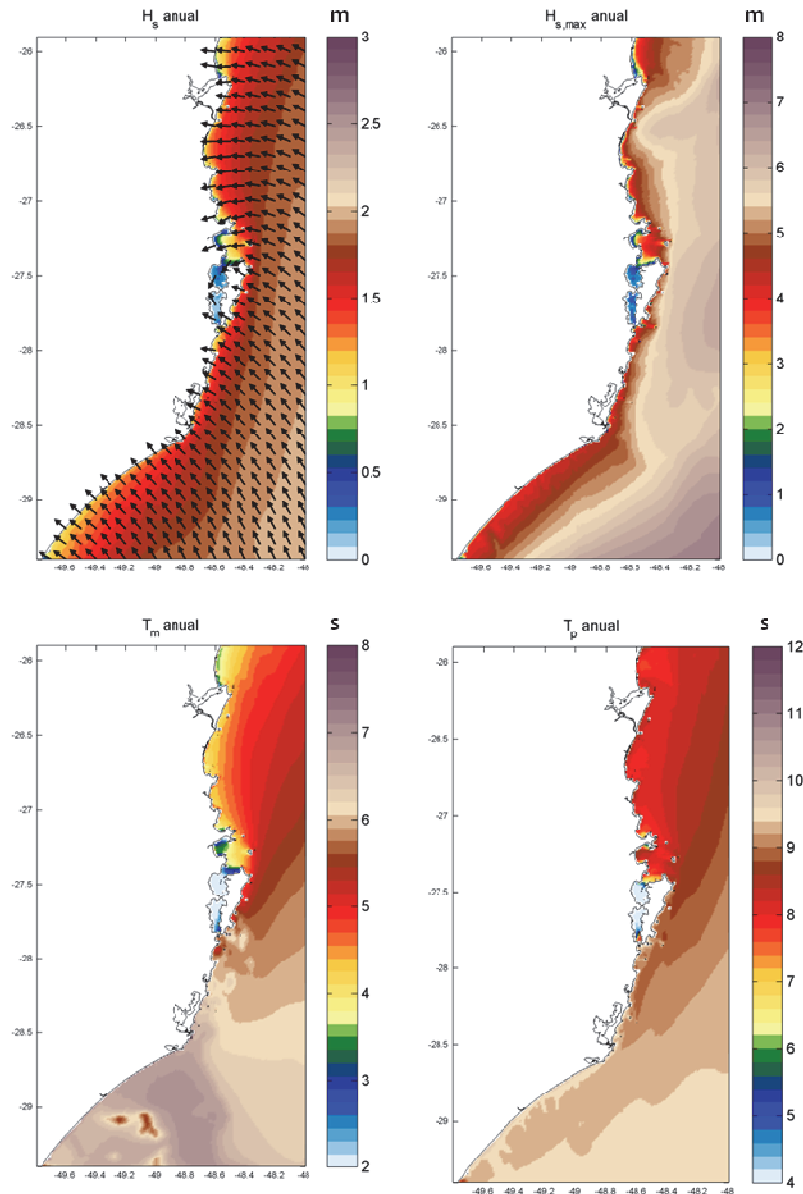


Fuente: IH Cantabria.

En el gráfico 5 se muestra la caracterización espacial del oleaje en el estado de Santa Catarina obtenido a partir de la base de datos histórica generada. De izquierda a derecha en el panel superior se muestra la altura de ola media anual y la altura de ola máxima anual. En el panel inferior, el período medio anual y el período de pico anual. Se puede observar como la altura de ola media varía desde el orden de los 2,0 m en aguas abiertas a 1,5 m en las proximidades de costa, con valores similares a lo largo de la costa. En el mismo gráfico se ha representado la dirección media del oleaje. En la parte norte del estado el oleaje incide con una dirección media del este mientras que la parte sur, la dirección media de incidencia es del sureste. Respecto a la altura de ola máxima, se alcanzan valores del orden de los 6,0 m hasta profundidades cercanas a costa, reduciéndose hasta los 4,0 m para profundidades inferiores a los 40,0 m. En cuanto al período medio anual, se observa una graduación de norte a sur, con valores del orden de los 5 s en el norte y 7 s en el sur. Esta variación espacial también se observa en el período de pico, con valores del orden de los 8 s en el norte a los 9,5 s en el sur.

Gráfico 5

Altura de ola media anual, en metros, y dirección media anual del oleaje; altura de ola máxima anual, en metros (panel superior, de izquierda a derecha). Período medio anual y período de pico anual, en segundos (panel inferior, de izquierda a derecha)



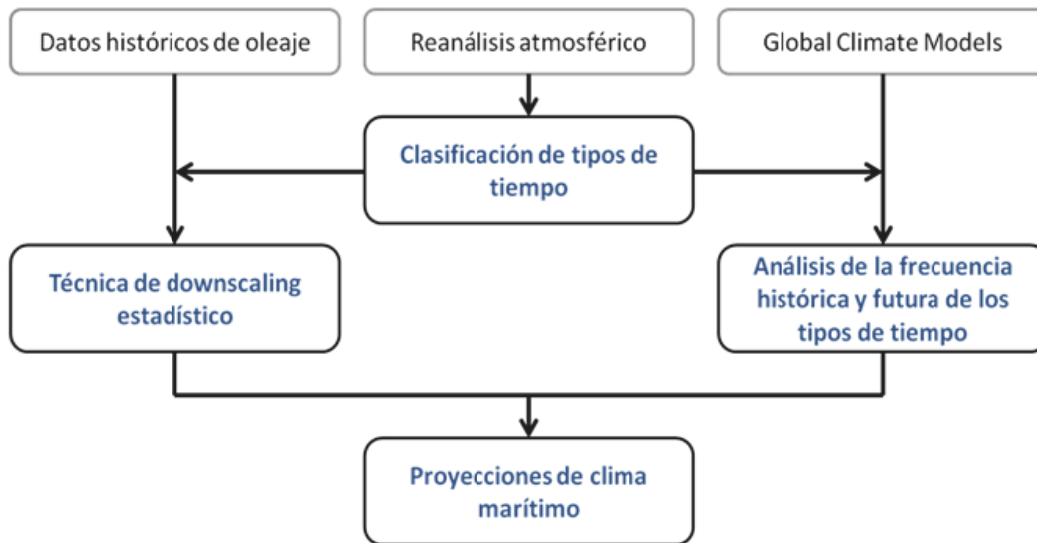
Fuente: IH Cantabria.

a) Proyecciones futuras

Los escenarios globales de cambio climático son la principal fuente de información disponible para llevar a cabo estudios de impacto. Estas simulaciones caracterizan la evolución diaria (o incluso intra-diaria) de numerosas variables climáticas de interés (presión, temperatura, humedad, etc.), tanto en superficie como en distintos niveles verticales de la atmósfera. Sin embargo, estos GCMs no simulan el oleaje. Además, la principal limitación de los escenarios globales de cambio climático es su escasa resolución espacial (cientos de kilómetros). Por tanto, la tarea de regionalizar estos escenarios es clave para poder llevar a cabo estudios de impacto y adaptación a nivel regional y en especial en la costa. En este estudio se ha llevado a cabo un downscaling estadístico.

El downscaling estadístico se basa en el uso de modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosférica a gran escala (dadas por un GCM) con las variables locales/regionales de interés, observadas en superficie. La metodología utilizada para obtener proyecciones del oleaje para distintos escenarios de cambio climático se basa en la recopilación y procesado de bases de datos históricas del predictor (variables de circulación atmosférica de gran escala) y predictando (los parámetros de estado de mar); desarrollo de un modelo estadístico para la proyección del oleaje basado en tipos de tiempo (Camus *et al.* 2014) capaz de reproducir el oleaje multivariado; análisis de la calidad de los GCMs disponibles en cuanto a la variable atmosférica que se utiliza como predictor en el área de estudio; y obtención de las proyecciones multi-modelo de oleaje a partir de los GCMs seleccionados para distintos escenarios de cambio climático (véase el diagrama 7).

Diagrama 7
Esquema general de la metodología para la proyección del oleaje



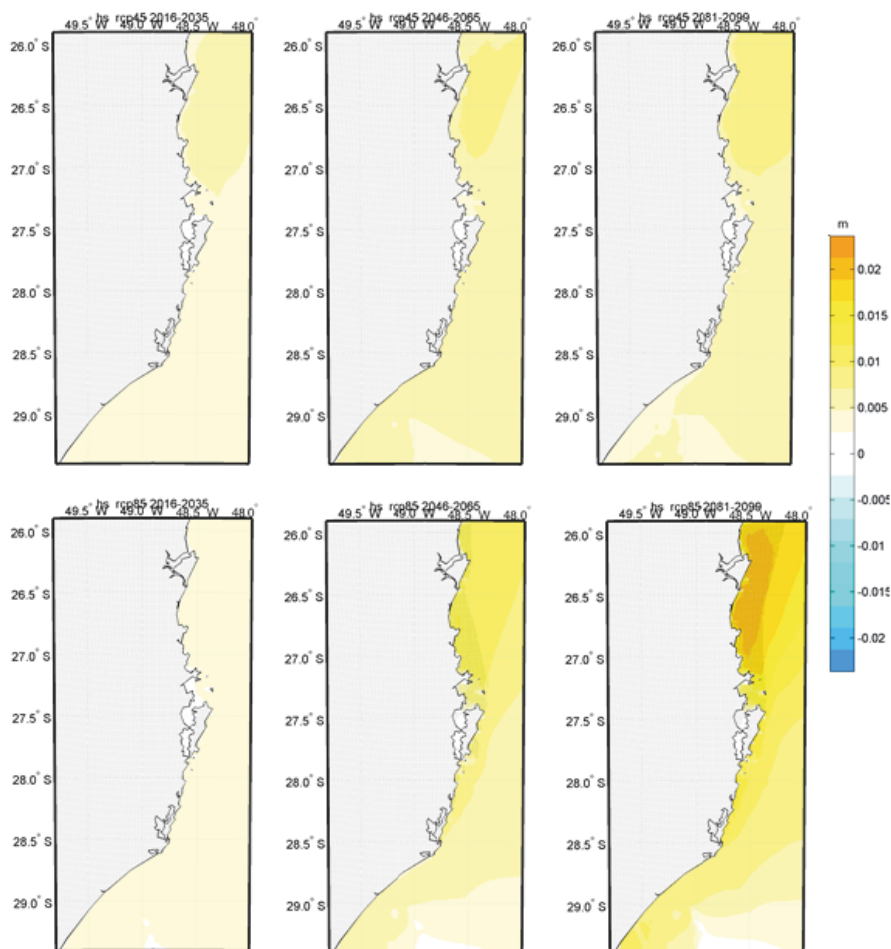
Fuente: IH Cantabria.

Aplicando la metodología propuesta se han obtenido las proyecciones de oleaje para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los cambios detectados en el oleaje son reflejo de los cambios en los tipos de tiempo (WT) y en los patrones medios del oleaje asociados a cada tipo de tiempo. El aumento de una serie de WTs caracterizados por situaciones sinópticas de altas presiones y una disminución de WTs caracterizados por centros de bajas presiones situados al sur del Atlántico Sur tiene por respuesta un aumento de la Hs, Tm y FE en prácticamente todo el estado, siendo más acusado al norte del estado de Santa Catarina, y una disminución de Tm, y por tanto, de FE, al sur del estado.

El gráfico 6 muestra cambios proyectados en la Hs media en la zona de Santa Catarina, pudiéndose observar un aumento en toda la zona de estudio. El comportamiento para todos los escenarios es similar con mayores aumentos en el largo plazo y para el escenario RCP8.5, alcanzando valores de 2,0 cm al norte del estado de Santa Catarina.

Gráfico 6

Cambios en Hs media en la zona de Santa Catarina, en metros, para diferentes escenarios (RCP4.5 superior y RCP8.5 inferior) y períodos de tiempo (2016-2035 izquierda, 2046-2065 medio y 2081-2099 derecha) respecto al período de referencia (1986-2005)



Fuente: IH Cantabria.

Nota: Las áreas sin sombreado indican que más del 80% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

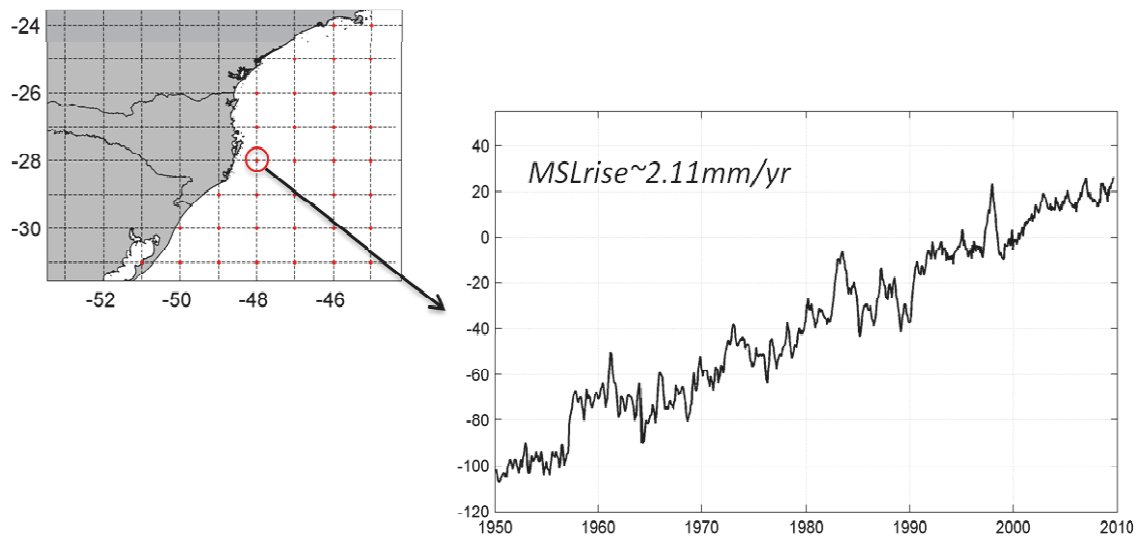
3. Nivel del mar

El nivel del mar se define generalmente como la acción de tres agentes: el nivel medio del mar, la marea astronómica y el residuo meteorológico.

El nivel medio del mar es el valor promedio de la superficie del océano durante un período de tiempo respecto a un nivel de referencia. En la costa del estado de Santa Catarina el nivel de referencia se ha establecido a partir del mareógrafo de Imbituba. El nivel medio del mar está ascendiendo a nivel global. Las causas de este aumento global son el incremento de la temperatura en el océano, el deshielo de los casquetes de hielo y nieve de los glaciares y los intercambios hidrológicos entre tierra-océano (Cazenave A. y Remy F., 2011). Sin embargo, el aumento del nivel del mar no es homogéneo espacialmente y presenta variaciones regionales. Además existen ciertas regiones donde el nivel medio del mar (respecto a la línea de costa) está disminuyendo debido a una emersión de la costa. El estudio de la tendencia histórica del nivel medio del mar en Santa Catarina se estudia a partir de la base de

datos regional de nivel medio del mar desarrollada por IHCantabria a partir del método propuesto por Church *et al.* (2004). La reconstrucción cubre el período 1950-2010 y proporciona el nivel medio del mar a escala mensual regional y con una resolución espacial de 1 grado en longitud y latitud. En el gráfico 7 se muestra la información disponible para esta base de datos en la región de Santa Catarina y la serie mensual de nivel medio del mar histórica resultante en la coordenada 48°W y 28°S. La tendencia histórica lineal en la región de Santa Catarina estimada es de 2,11 mm/año, lo que indica un incremento de 4,6 cm durante los últimos 22 años y superior a los 10 cm durante los últimos 50 años.

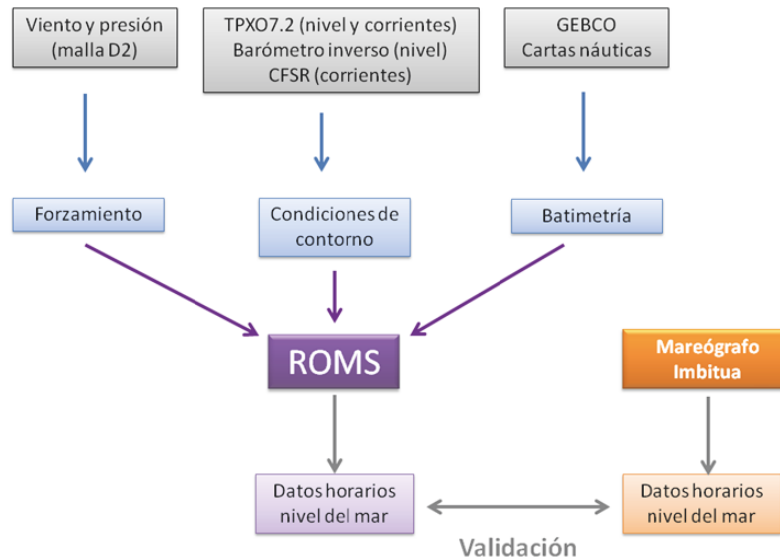
Gráfico 7
Cambios estimados en el nivel medio del mar a partir de la información procedente de satélite recopilada durante los últimos 22 años



Fuente: IH Cantabria.

Además de la marea astronómica y meteorológica, el estado de Santa Catarina se ve también afectado por corrientes oceánicas de importancia, que pueden alcanzar magnitudes superiores a 1 m/s (generalmente provenientes del SW). Debido a la falta de datos instrumentales homogéneos a lo largo de la costa y de amplia cobertura temporal, en este estudio, se ha modelado numéricamente la componente astronómica y meteorológica que, además, se tendrá también en cuenta la influencia de estas corrientes asociadas a fenómenos oceanográficos. Para ello se ha desarrollado la metodología que se resume en el diagrama 8. El primer paso es el análisis de las bases de datos de corrientes y niveles disponibles y la elaboración de una batimetría lo más detallada posible. A continuación, se lleva a cabo el diseño de la malla de cálculo que se utiliza en un modelo de circulación oceánica y se lleva a cabo un pre-procesado de los forzamientos de presiones y viento, así como de las condiciones de contorno a utilizar. Se ejecuta el modelo durante el dominio temporal disponible y se validan los datos generados con la información instrumental disponible.

Diagrama 8
Esquema de la metodología utilizada para generar la base de datos GOST-StaCatarina



Fuente: IH Cantabria.

Recuadro 5
GOST-StaCatarina

Cobertura espacial: Estado de Santa Catarina

Resolución espacial: 1 km

Cobertura temporal: enero 1979-diciembre 2010

Resolución temporal: horaria

Parámetros:

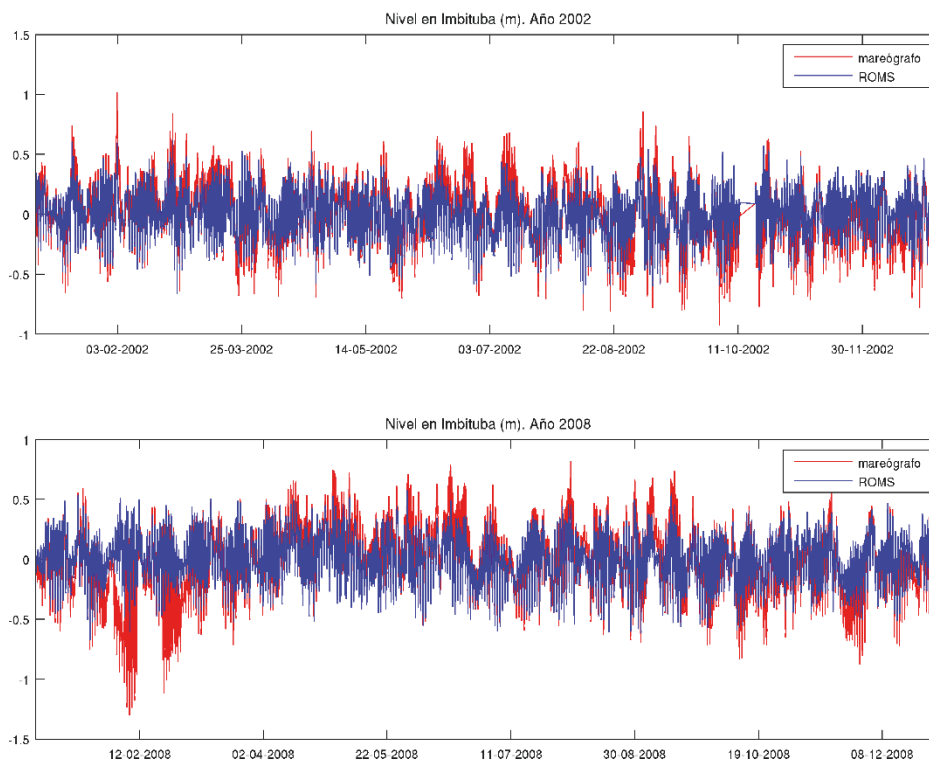
1. u_{bar_SL} : componente zonal de la corriente oceánica promediada en vertical
2. v_{bar_SL} : componente meridional de la corriente oceánica promediada en vertical
3. $zeta_SL$: componente meteorológica del nivel del mar
4. $zeta_MA$: componente astronómica del nivel del mar

Formato: NetCDF

La validación de los resultados se ha llevado a cabo de manera puntual con el mareógrafo de Imbituba. El resultado de la validación con el mareógrafo varía con el tiempo, debido a la calidad de los datos del mareógrafo o a variaciones internacionales de variables que no se han tenido en cuenta en este estudio, donde se analiza la variación del nivel del mar debida a la marea meteorológica y astronómica principalmente. En el gráfico 8 se muestra la serie temporal para períodos de un año (2002 y 2008). Se puede observar que la correlación no es exacta, no obstante es posible que el mareógrafo presente ciertas anomalías y/o efectos locales.

A partir de la base de datos GOST se puede realizar una caracterización climática de las variaciones del nivel del mar. En primer lugar se han estimado las distintas componentes del nivel del mar: la marea astronómica, la meteorológica y el residuo (nivel total menos marea astronómica). La marea astronómica es una variable determinista que puede reconstruirse a partir de las constantes armónicas más importantes en cada zona. La marea meteorológica, por el contrario, depende de los gradientes de presión y de la tensión del viento sobre la superficie del mar, por lo que son necesarios datos para su estudio.

Gráfico 8
Series temporales horarias de nivel del mar (m) a partir del nodo más cercano de GOST
y el registro del mareógrafo de Imbituba



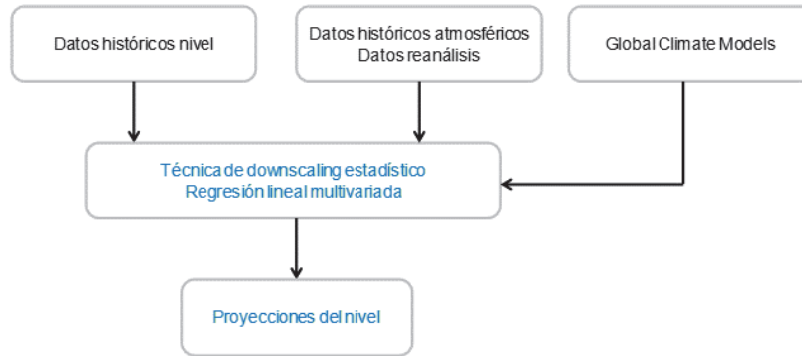
Fuente: IH Cantabria.

a) Proyecciones futuras

Las investigaciones acerca del incremento del nivel medio del mar global durante los últimos años han permitido reducir la incertidumbre en sus resultados. Con el fin de obtener información regional del aumento del nivel medio del mar ante distintos RCPs, Slangen (2014) analizó los resultados obtenidos mediante una metodología que contempla el modelado del nivel medio del mar teniendo en cuenta: i) cambios en la circulación oceánica, ii) la absorción de calor en los océanos y iii) la presión atmosférica. Para incluir afectos regionales también se tienen cuenta: i) cambios en la criosfera y litosfera, ii) el agotamiento de recursos de agua subterránea y iii) las variaciones de masa de los casquetes polares y de los glaciares (GIA). Teniendo en cuenta estos factores se realizaron simulaciones dinámicas globales para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 a partir de las condiciones de contorno e iniciales proporcionadas por 21 GCMs dentro del CMIP5. Los cambios estimados para el estado de Santa Catarina se encuentran próximos a 0,5 metros para el escenario RCP4.5 y por encima de 0,72 metros para el escenario RCP8.5.

Los cambios en la intensidad, frecuencia y trayectoria de las tormentas darán lugar a cambios en la marea meteorológica. Para estimar esos cambios bajo distintos escenarios de cambio climático se utiliza la metodología resumida en el diagrama 9 y basada en Camus *et al.* (2014). La relación estadística entre la marea meteorológica y el predictor definido por la presión a nivel del mar y el gradiente de presiones (SLP y GSLP) se establece mediante una regresión lineal multivariada. Se utilizan los datos de reanálisis atmosférico CFSR y los datos de nivel de la base de datos GOST-StaCatarina. Las proyecciones de la marea meteorológica se calculan a partir de los campos de presiones en el siglo XXI de los GCMs.

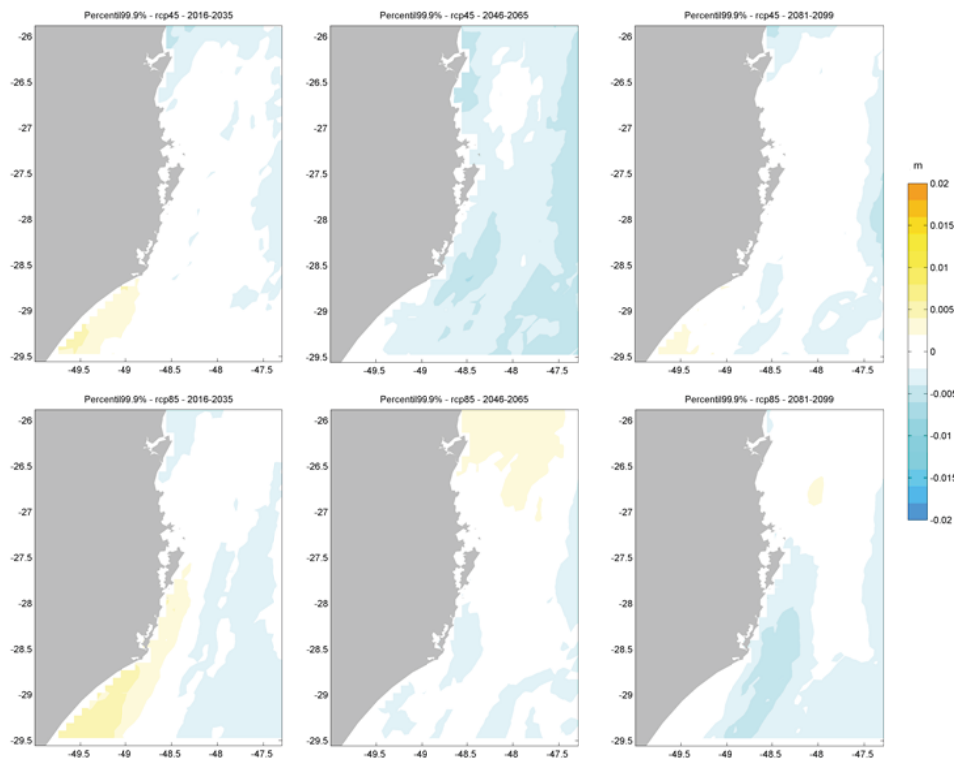
Diagrama 9
Esquema de la metodología utilizada para proyectar la marea meteorológica



Fuente: IH Cantabria.

Los cambios en el corto (2016-2035), medio (2046-2065) y largo plazo (2081-2099) se calculan con respecto al período de referencia (1986-2005). El gráfico 9 muestra cambios proyectados en el percentil 99% de la marea meteorológica máxima diaria en la zona de Santa Catarina. Se puede observar que no existe un comportamiento consistente a lo largo de los distintos períodos de tiempo y distintos escenarios. La magnitud de los cambios es muy pequeña, del orden de los 5 cm. No existe ningún nodo donde el 80% de los GCMs esté dando cambios del mismo signo.

Gráfico 9
Cambios en el percentil 99,9 de la marea meteorológica en la zona de Santa Catarina, en metros, para diferentes escenarios (RCP4.5 superior y RCP8.5 inferior) y períodos de tiempo (2016-2035 izquierda, 2046-2065 medio y 2081-2099 derecha)



Fuente: IH Cantabria.

4. Caudal fluvial

En este estudio se ha hecho una reconstrucción histórica de los flujos de agua generados en los cauces de la cuenca vertiente a la ciudad de Itajaí en el estado de Santa Catarina, resultante de ciertos eventos históricos de precipitación. La estimación del caudal en una determinada cuenca se realiza mediante la simulación de la transformación de la lluvia a caudal mediante modelos hidrológicos. En primer lugar, es necesario definir la cuenca vertiente a partir del modelo digital del terreno. La modelización conceptual de la cuenca se realiza mediante el modelo HEC-Geo-HMS. El modelo hidrológico requiere datos del tipo de suelo para la modelización de la escorrentía y las pérdidas a través del terreno, mediante el módulo Soil Moisture Accounting (SMA). La simulación del caudal requiere datos climatológicos: precipitaciones y evapotranspiración. Los caudales obtenidos a partir de la modelización hidrológica deben ser validados con datos instrumentales.

Los caudales simulados con el modelo HEC-HMS corresponden a las fechas 1998-2014 y 1982-1984. La simulación de los eventos de aumento de caudal en el río Itajaí-Acú en el período 1982-19984 procede de la aplicación de los datos observados de precipitación, por lo que se ha considerado que simulan de forma más fiable los procesos de generación de caudal. Por este motivo se ha seleccionado uno de los eventos del año 1983 de incremento de caudal del río por lluvias extremas para la aplicación del modelo de inundación.

E. Inundación

Uno de los principales impactos identificados en la costa de Santa Catarina es la inundación. En este trabajo se ha desarrollado una metodología para poder evaluar este impacto con alta resolución espacial que permita el diseño, proyecto e implementación de medidas de reducción de riesgo. Para mostrar la aplicación de esta metodología y la capacidad de las bases de datos de dinámicas generadas en este proyecto para el análisis de este impacto con alta resolución se ha planteado la reconstrucción de la inundación en el área de Itajaí para una serie de eventos históricos, es decir, se plantea un análisis forense de dos eventos de inundación.

1. Metodología

El diagrama 10 muestra un esquema de la metodología desarrollada para evaluar el impacto de inundación. Se plantea el modelado de la inundación mediante un modelo hidrodinámico bidimensional (RFSM-EDA, Bates *et al.*, 2010) que requiere datos de exposición y de peligrosidad. La exposición queda definida por la topografía del terreno (modelo digital del terreno) y por los tipos de suelos, mientras que la peligrosidad queda definida por el nivel del mar total (TWL) y el caudal del río.

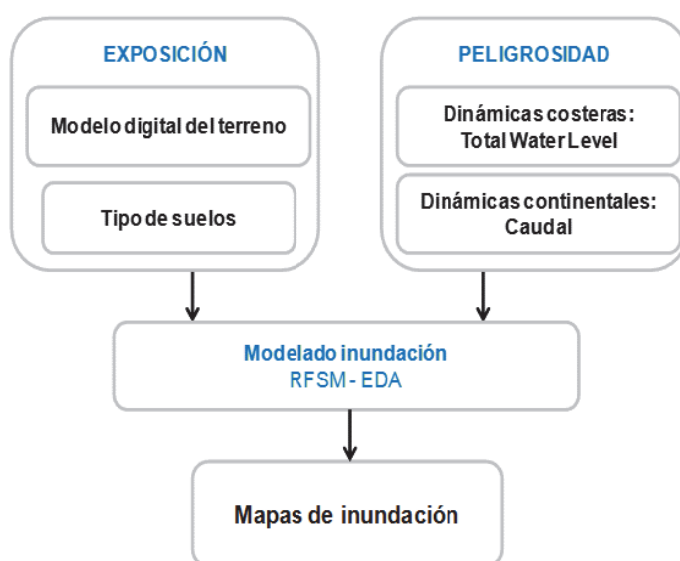
La exposición, vinculada a las características físicas del entorno, es una parte fundamental en el modelado de la inundación y hace referencia al tipo y al grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas importantes o a eventos meteorológicos extremos. Para su evaluación, es necesaria una buena caracterización de los elementos que configuran el terreno: playas, acantilados, humedales y, muy especialmente, las defensas costeras y encauzamientos de ríos, que ejercen de sistema de protección frente a inundaciones. En este estudio se han empleado Modelos Digitales de Terreno (MDT) de 1 metro de resolución horizontal proporcionados por Departamento de Geociencias de la Universidad Federal de Santa Catarina.

La condición de contorno costera del modelo de inundación en tierra se define a partir del nivel del mar total denominado TWL. Las condiciones de oleaje y nivel (marea astronómica y meteorológica) se obtienen a partir de las bases de datos históricas generadas (ROW-StaCatarina y GOST-StaCatarina). En esta aproximación, este índice responde a la suma lineal y contemporánea de tres componentes: $TWL(t)=MM(t)+MA(t)+Su(t)+NMM \text{ Local } (+SLR)$, donde MM es la Marea Meteorológica, y MA la Marea Astronómica, Su es el Setup del oleaje calculado mediante la

formulación de Stockdon *et al.* (2006) y NMM Local es el Nivel Medio del Mar Local, concepto que surge debido al hecho de que el Nivel Medio del Mar no siempre coincide con el Geoide. Para escenarios de aumento del nivel medio del mar, el TWL exige además la incorporación del término SLR (siglas de “Sea Level Rise”, en inglés) de modo que el incremento de nivel quede introducido en la formulación.

El resultado del modelado son mapas de inundación. En este estudio la metodología se ha aplicado y validado con un análisis forense. Además se han hecho simulaciones para distintos escenarios de cambio climático teniendo en cuenta el aumento del nivel del mar y cambios en el caudal del río.

Diagrama 10
Esquema de la metodología desarrollada para el análisis del impacto de inundación a alta resolución en la costa de Santa Catarina



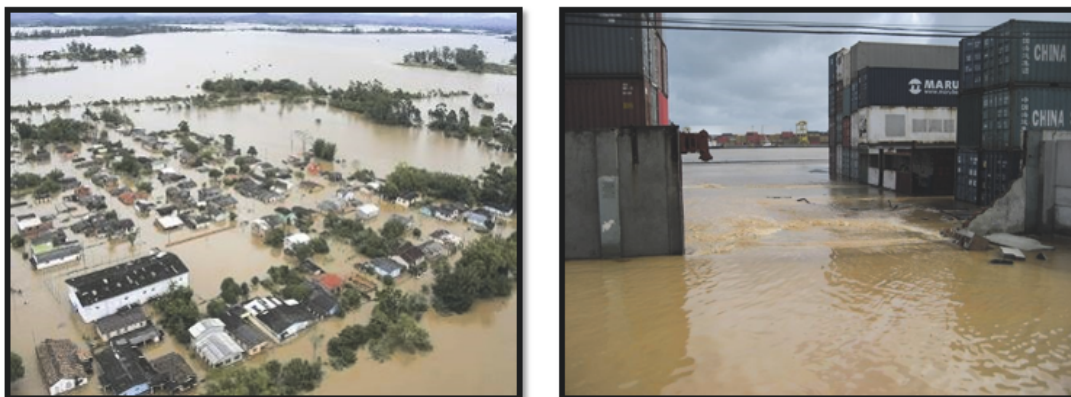
Fuente: IH Cantabria.

2. Análisis forense

La zona seleccionada para realizar el análisis forense se extiende desde la punta al norte de Bombinhas e incluye Itapema, Balneario Camboriú, Itajai hasta la punta de Armacao. La inundación en la región de Itajaí se produce fundamentalmente por desbordamientos del río de Itajaí-açu cerca de su confluencia con Itajaí-mirim, viéndose la localidad de Blumenau especialmente afectada.

Para mitigar estos efectos, se ha recurrido en los últimos tiempos a realizar obras de drenaje. No obstante, según expertos de la Universidad Regional de Blumenau (FURB), el problema es que esos proyectos, diseñados para facilitar la escorrentía de las aguas pluviales, no se han tenido en cuenta las características reales de la red de saneamiento de la ciudad. Por otro lado, y aunque en la mayoría de casos sus efectos son mínimos, también se conocen eventos de inundación costera causados por ciclones extra-tropicales, fenómenos comunes en el sur y en el sudeste de la costa de Brasil. En el gráfico 10 se muestran dos imágenes de las consecuencias de la inundación en Araranguá y en el puerto de Itajaí.

Gráfico 10
Imágenes de Araranguá (izquierda) y el puerto de Itajaí (derecha)
durante un evento extremo de inundación



Fuente: Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC).

Tras una revisión de los eventos históricos de inundación en la región de estudio en la literatura existente, se han seleccionado dos de ellos: el que tuvo lugar en julio de 1983 y otro más reciente acontecido en junio de 2006.

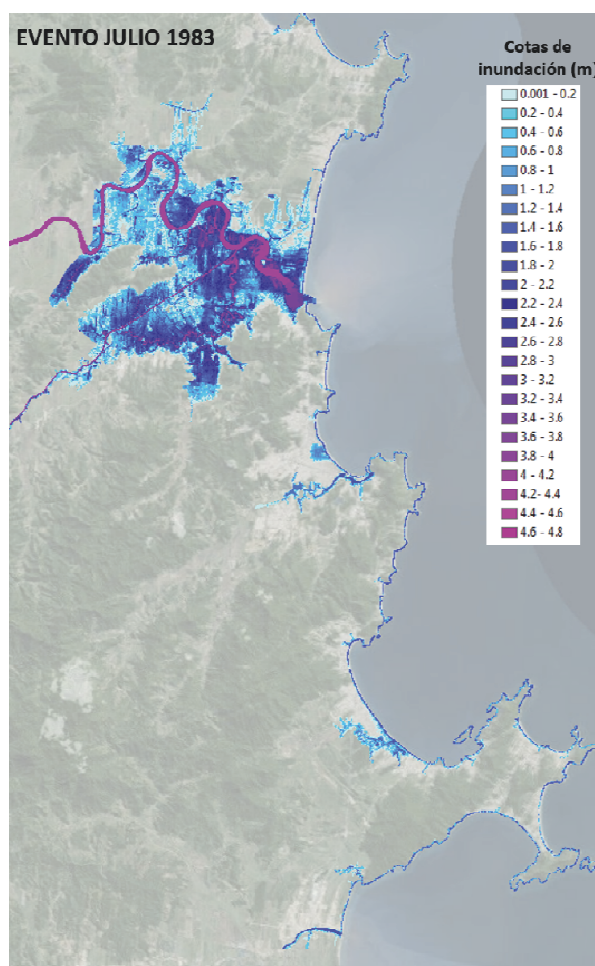
El evento extremo de 1983 se produjo en los días del 4 a 8 de julio causando estragos principalmente en Blumenau, río adentro. Las inundaciones fueron consecuencia de la lluvia extrema que tuvo lugar en la cuenca hidrográfica del río Itajaí, causada por la ocurrencia del fenómeno El Niño, caracterizado por la desviación positiva de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial, lo que desencadena cambios en la circulación atmosférica a escala global (Voituriez y Jacques, 2000). Estos cambios intensifican el chorro subtropical (Jetstreams) situado en las latitudes medias y los altos niveles de la troposfera (Kousky *et al.*, 1984). La intensificación de los chorros, a su vez, supone un aumento en la actividad convectiva, asociado con sistemas frontales y sistemas convectivos de mesoescala en el sur de Brasil (Grimm *et al.*, 1998). Por lo tanto, esta situación meteorológica se observó en 1983 y se vió agravada por varios eventos de bloqueo atmosféricos. La combinación de ambas configuraciones genera condiciones favorables para el aumento de las lluvias en el sur de Brasil, causando inundaciones que afectaron gravemente el estado de Santa Catarina (Kousky *et al.*, 1984). La inundación gradual que se produjo en el mes de julio de 1983 se originó por lluvia continua del sistema frontal semi-estacionario. Se produjeron lluvias récord durante todo el mes, y la estación de San José, ubicada en la región centro de Florianópolis, registró 513,6 mm, superando en 455% el promedio del mes, que asciende a 112,8 mm (Herrmann, 1998).

Por otro lado, se tiene conocimiento de que el temporal marítimo del 27 de junio de 2006 fue uno de los más energéticos que ha tenido lugar en la región costera de Rio Grande do Sul en los últimos 10 años (Guimarães *et al.*, 2014). El fenómeno del ciclón extra-tropical, común en el sur y en el sudeste de la costa de Brasil, se da con mayor frecuencia en los meses de otoño y primavera. En la mayoría de los casos, sus efectos son mínimos. Sin embargo, episodios especialmente intensos pueden ocasionar graves daños en la costa.

Para cada uno de los eventos históricos seleccionados se han simulado las series horarias de caudal procedente de la escorrentía de la lluvia en el punto de salida de la cuenca vertiente en la desembocadura del río Itajaí-Açu y se han reconstruido las series temporales de TWL en un conjunto de puntos cercanos a costa y separados entre sí 200 m con el objetivo de capturar toda la variabilidad espacial de las dinámicas marinas.

El gráfico 11 muestra el mapa de inundación máxima obtenido para el evento histórico de julio de 1983. Se observa una mayor extensión de la inundación en la zona al sur del río Itajaí-Açu. No obstante, en la zona norte el agua alcanza las inmediaciones del aeropuerto. Se alcanzan máximos de hasta 4 metros sobre el nivel medio en los cauces de los ríos Itajaí-Açu e Itajaí-Mirim. En las regiones de Itajaí situadas a ambos lados de la confluencia de estos ríos, la lámina de inundación está en torno a los 3 metros. También se observan inundaciones de baja cota en la parte costera central de Balneario-Camboriú y cerca de Porto Belo. Para la validación de la inundación obtenida se ha empleado un mapa de inundación de la Prefeitura Municipal de Itajaí y de la Universidad do Vale de Itajaí-UNIVALI, proporcionado por el Departamento de Geociencias de la Universidad Federal de Santa Catarina. La inundación producida en la margen derecha del río Itajaí-açu encaja perfectamente con la mancha de agua delimitada en la imagen proporcionada por UFSC, cubriendo de agua prácticamente toda la localidad de Itajaí.

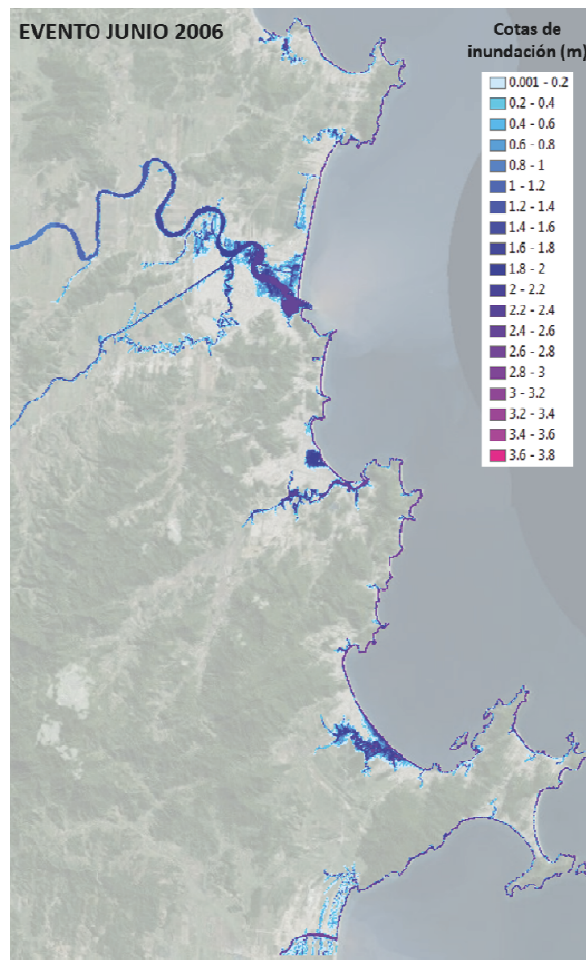
Gráfico 11
Mapa de inundación máxima obtenido como resultado de la simulación del evento de inundación de julio de 1983



Fuente: IH Cantabria.

El gráfico 12 muestra un evento de inundación cuya contribución principal son las dinámicas marinas. En la desembocadura del río Itajaí-Açu y el frente costero de Navegantes se alcanzan las mayores cotas de inundación. En la zona central costera de Balneario-Camboriú y en la región situada entre Itapema y Porto Belo la lámina de inundación alcanza 1 m de cota sobre el nivel medio del mar. Se producen desbordamientos del cauce del río Itajaí-açu en la zona aguas-abajo.

Gráfico 12
Mapa de inundación máxima obtenido como resultado de la simulación
del evento de inundación de junio de 2006



Fuente: IH Cantabria.

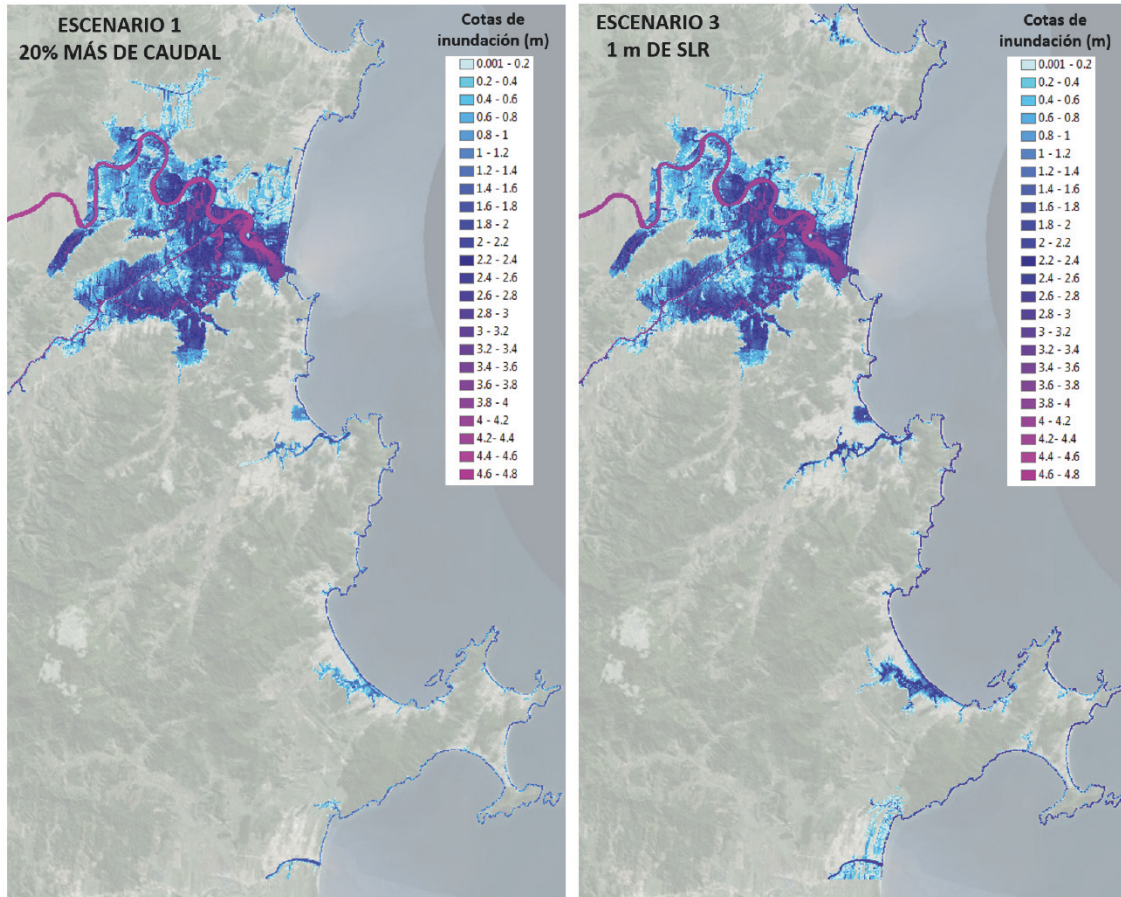
3. Análisis de sensibilidad: escenarios de cambio climático

Para estudiar adecuadamente el impacto de inundación por cambio climático es necesaria la definición de escenarios que respondan a cambios en el clima. Para esta definición, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad ensayando alteraciones en el régimen de precipitaciones, traducidas en variaciones en el caudal de escorrentía de lluvia, y la subida del Nivel Medio del Mar (NMM).

Se han ensayado un total de 8 escenarios alterando las condiciones de caudal y nivel del mar de cada uno de los dos eventos históricos analizados. Es decir, para el evento de Julio de 1983 y el de junio de 2006 se ha ensayado un aumento del caudal de escorrentía de lluvia del 20% (E1), optando en este estudio por considerar eventos extremos de mayor magnitud a los que se encuentran en el período histórico simulado (de 1979 a 2010). Además se consideran dos escenarios con aumentos de nivel del mar de 0,7 m (E2) y 1 m (E3) (valores medio y superior del RCP8.5 regionalizados) a fin de siglo y un aumento del caudal del 20% combinado con un aumento del nivel del mar de 1 m (E4). El gráfico 13 muestra los resultados de la inundación para un evento extremo de iguales características a las del evento de julio 1983 pero con un 20% más de caudal de escorrentía de precipitación (E1) y un evento extremo de iguales características a las del evento de julio 1983 pero con un aumento del NMM de 1 m (E3). Los resultados sugieren inundaciones producidas fundamentalmente por el desbordamiento de

los ríos Itajaí-Açu e Itajaí-Mirim a causa de intensas lluvias, en los que la inundación debida a las dinámicas marinas juega un papel secundario. Observando el mapa correspondiente al escenario 1, se puede observar un incremento de la cota máxima de la lámina de agua de 25 cm así como una mayor extensión de la inundación, especialmente acusada en zonas ubicadas en la margen derecha del Itajaí-Açu. El mapa de inundación del escenario 3 muestra un incremento de la inundación costera en las áreas litorales de Penha, Gravatá, Balneario Camboriú, La Peregue y Bombinhas.

Gráfico 13
Mapa de inundación máxima obtenido como resultado de la simulación del evento de inundación de junio de 2006



Fuente: IH Cantabria.

Una vez obtenidos estos mapas de peligrosidad para cada escenario se pueden elaborar proyecciones de la vulnerabilidad que incluyan evolución de la proyección, de actividades económicas, nuevas infraestructuras o desarrollo urbano a partir de las cuales se pueda establecer las consecuencias en términos económicos o los daños sobre personas, ecosistemas o sectores clave para la costa. Este tipo de análisis tanto para eventos extremos meteorológicos como para cambio climático es esencial para una adecuada planificación de medidas de reducción de riesgo o estrategias de adaptación al cambio climático.

F. Transferencia, difusión y capacitación

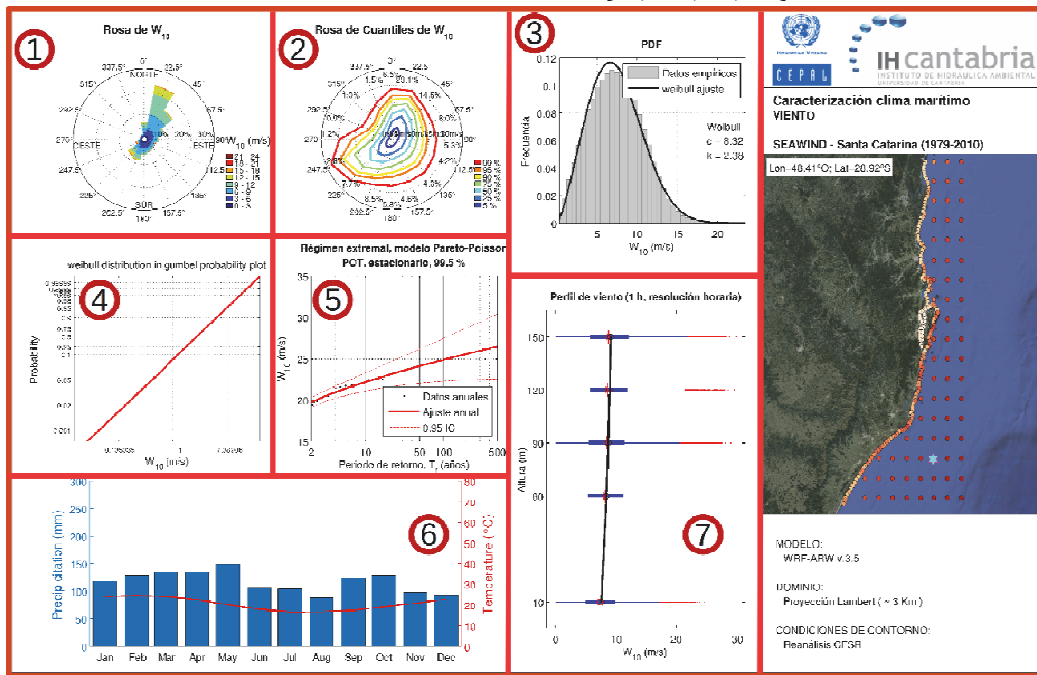
La difusión del proyecto se ha llevado a cabo a través de dos acciones fundamentales: un atlas de caracterización climática y un curso de formación y aplicación a investigadores, gestores y académicos. Además los datos generados de las dinámicas han sido repartidos en bruto en formato NetCDF.

1. Atlas de caracterización climática

La información generada en el proyecto se ha distribuido en un Atlas Climático mediante una serie de fichas en un conjunto de localizaciones que cubren el estado de Santa Catarina. Se ha realizado una caracterización estadística de los datos históricos generados (viento, oleaje, nivel del mar) aplicando diversas metodologías de análisis estadístico desarrolladas en IHCantabria. Estas fichas han sido elaboradas a lo largo del litoral del estado de Santa Catarina con una resolución de 1 km y para una serie de puntos offshore separados alrededor de 10 km. En total se han caracterizado para 232 emplazamientos costeros y marinos.

En el gráfico 14 se muestra una ficha de caracterización estadística del viento en la localización de coordenadas [48,5°O; 27,8°S]. La ficha incluye la rosa de viento y de cuantiles, en la que se puede ver cuáles son las direcciones más energéticas. También se incluye la distribución empírica de la velocidad del viento a 10 m de altura y el régimen medio y extremal ajustados a modelos estadísticos. Esta información permite conocer cuál es la probabilidad anual de diferentes estadísticos, por ejemplo del viento medio, o de superar un determinado umbral. Además, el régimen extremal permite obtener el viento correspondiente a un determinado período de retorno, es decir, aquel viento extremal con muy baja probabilidad de ocurrencia, que ocurre por ejemplo una vez cada 100 años por término medio (concepto de período de retorno). Con respecto al viento también se proporciona información en altura con el perfil de viento con resolución horaria. Por último, además de información acerca del viento la ficha también incluye información sobre la precipitación y la temperatura, proporcionando la distribución estacional de ambas variables.

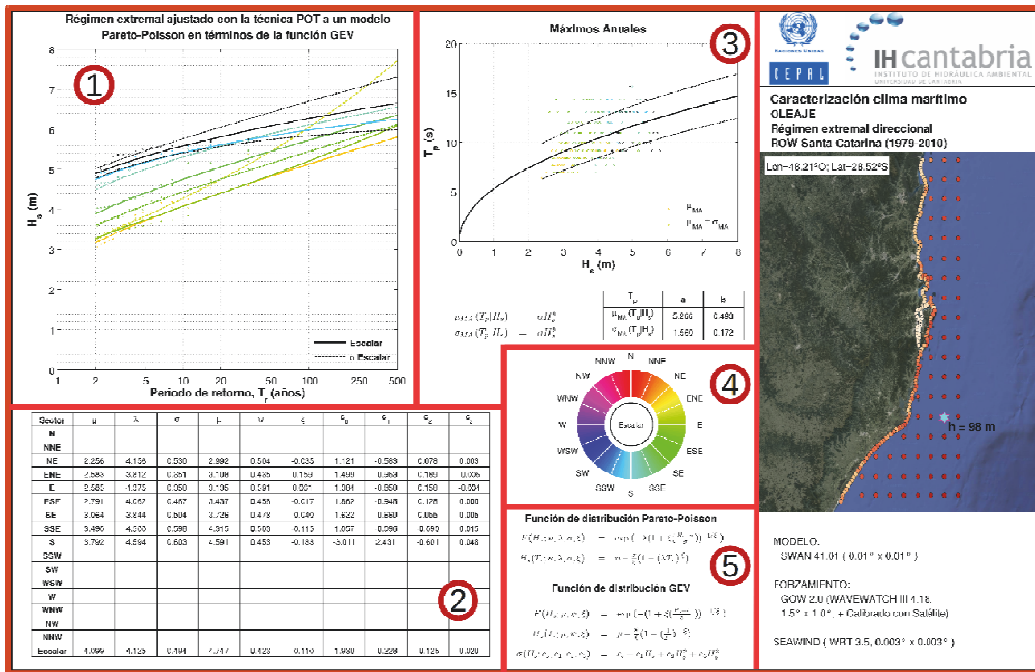
Gráfico 14
Ficha de caracterización estadística del viento para una determinada localización [48,5°O; 27,8°S]



Fuente: IH Cantabria.

En el gráfico 15 se muestra un ejemplo de la ficha del régimen extremal direccional de la altura de ola. Los regímenes extremales direccionales de altura de ola significativa se ha representado en el panel 1, esta información permite inferir la altura asociada a probabilidades muy bajas de ocurrencia, por ejemplo la asociada al periodo de retorno 100 años. También se ha realizado el ajuste para la totalidad de los datos sin tener en cuenta la direccionalidad del oleaje (ajuste escalar, línea negra). En la parte inferior del panel 5 se muestra la ecuación de la función de distribución considerada. Los parámetros que han resultado de los ajustes se han recogido en la tabla del panel 3. Así mismo, con el objeto de relacionar los valores de pico asociados a los valores extremos de altura de ola significativa, en el panel 2 se muestra la relación entre los valores máximos direccionales de altura de ola significativa y sus correspondientes periodos de pico (puntos de colores), su valor medio μ_{MA} (línea negra) y su banda de confianza del 68% $\mu_{MA} \pm \sigma_{MA}$ (línea discontinua negra). Se ha considerado que el valor medio μ_{MA} y la desviación típica σ_{MA} varían en función de la altura de ola mediante una ley potencial, cuya ecuación y valores de ajuste se recogen en el panel 4.

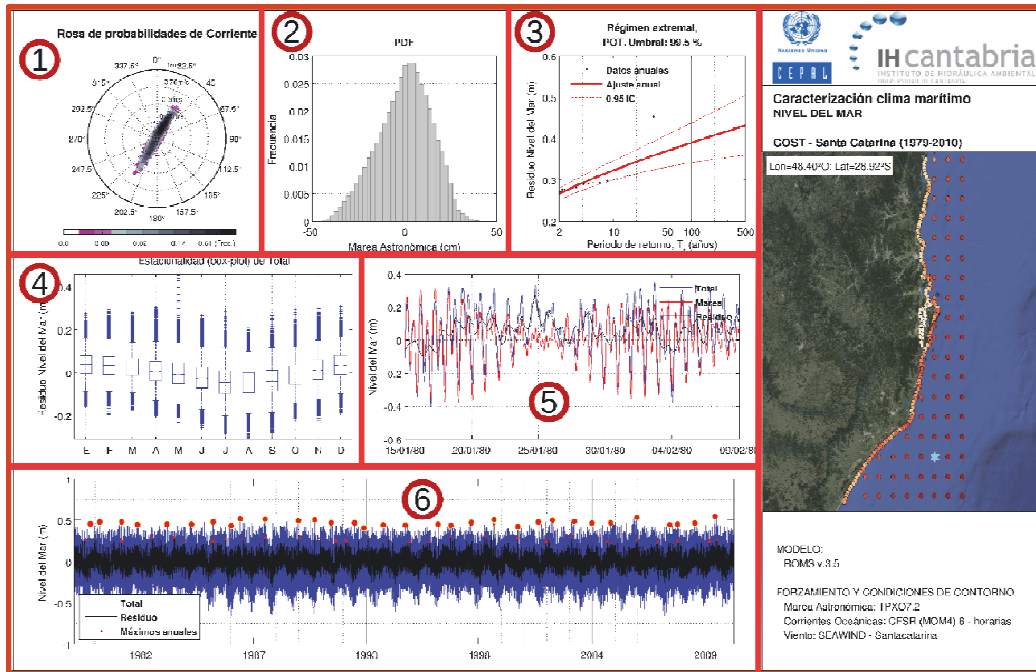
Gráfico 15
Ficha de caracterización estadística del oleaje para
una determinada localización [48.2°O; 28.5°S]



Fuente: IH Cantabria.

En el gráfico 16 se muestra un ejemplo de la ficha de caracterización climática del nivel del mar en la localización de coordenadas [48,4°O; 28,92°S]. En el panel 1 se representa la rosa de probabilidad direccional del módulo de la corriente, que ha sido discretizada en sectores cada 5° y muestran la frecuencia de presentación de cada rango de valores, en la que el radio de la rosa representa el valor del módulo de la corriente. En el panel 2, se presenta el histograma de los datos empíricos de la componente marea astronómica. El panel 3 muestra el régimen extremal del residuo del nivel del mar. La línea roja continua, representa el ajuste, mientras que las líneas rojas discontinuas representan las bandas de confianza superior e inferior del 99,5% y el 0,05% respectivamente; siendo los puntos negros los máximos anuales. En el panel 4 se han representado la estacionalidad del residuo del nivel del mar, mediante un diagrama de cajas. En el panel 5, se representa una parte de las series temporales de la marea total, la marea meteorológica y el residuo del nivel del mar y finalmente en el panel 6, podemos ver la serie temporal completa de las magnitudes anteriores en la que se ha marcado con un punto rojo los máximos anuales de las series temporales.

Gráfico 16
Ficha de caracterización estadística del nivel del mar para
una determinada localización [48.4°O; 28.92°S]



Fuente: IH Cantabria.

2. Capacitación

Se impartió un curso de capacitación destinado a equipos de gestores e investigadores costeros provenientes de los estados costeros del Brasil. El curso “Metodología, herramientas e bases de datos para gestão de riscos às mudanças do clima em zonas costeiras: uma proposta de aplicação para a costa brasileira” se realizó en Brasilia del 24 al 26 de noviembre de 2015.

El objetivo general consistía en capacitar en el uso, análisis y gestión de las bases de datos desarrolladas y de las metodologías de análisis de alta resolución, así como en sus limitaciones y diseminar entre los potenciales usuarios las diferentes aplicaciones que se puede hacer de las mismas.

Los objetivos específicos de esta tarea se pueden desglosar en:

- Transferir conocimiento y habilidades entre los diferentes sectores implicados en la gestión costera en Brasil, para estimular su análisis, determinación de impactos y buenas prácticas en el tramo costero.
- Impulsar el desarrollo, formación y capacitación de excelencia de los integrantes de las diversas organizaciones e instituciones.
- Incrementar el interés por las actividades de investigación y formación académica en el sector de gestión costera a escala regional.
- Resolver los problemas técnicos que surgen ante diferentes problemáticas derivadas del impacto del cambio climático en la costa.
- Crear espacios de colaboración entre los diferentes sectores involucrados a escala territorial e interdisciplinar.

III. Otras aplicaciones

Además de lo anteriormente expuesto, el acceso a bases de datos como las desarrolladas en este proyecto abre una miríada de oportunidades para diversas aplicaciones de interés para los diferentes sectores, agentes e instituciones cuya actividad se desarrolle en la costa de Santa Catarina. A continuación se describen algunos ejemplos.

A. Posibles usos de SW-StaCatarina

La reconstrucción, durante más de 30 años históricos, con alta resolución de las condiciones de viento a lo largo del litoral y superficie marina adyacente presenta gran potencial para diferentes usos. Algunas de las aplicaciones directas de la base de datos SW-StaCatarina podrían ser:

- Reconstrucción de un atlas de viento marino en todo el estado de Santa Catarina.
- Evaluación de la influencia de las condiciones de viento en el sector turístico de la región. Por ejemplo, relación con deportes acuáticos (ej. wind-surf), en actividades en la playa, etc.
- Caracterización del impacto del viento en el sector de portuario y de navegación.
- Análisis de los recursos eólicos offshore disponibles en la costa del estado de Santa Catarina. La evaluación del recurso eólico energético requiere de información de las condiciones de viento a la altura de potenciales turbinas eólicas, un análisis de la persistencia de las condiciones de viento y estimación de la potencia eólica entre otras estimaciones.
- Estudio de la variabilidad climática de las condiciones de viento a distintas escalas temporales (dentro del año, entre años y cambios de largo plazo).

La base de datos SW-StaCatarina es también una herramienta esencial para la reconstrucción de información climática de mayor resolución o de otras dinámicas marinas. A continuación se mencionan algunas aplicaciones destacadas:

- SW-StaCatarina puede utilizarse como forzamiento para reconstruir la dinámica del oleaje sobre la plataforma continental.

- SW-StaCatarina puede utilizarse como forzamiento para reconstruir la componente meteorológica del nivel del mar.
- SW-StaCatarina puede utilizarse como condiciones iniciales y de contorno para realizar un downscaling de gran resolución (ej. 100 metros) en tramo específico marino o de costa.

B. Posibles usos de ROW-StaCatarina

La disponibilidad de bases de datos históricos de oleaje, homogéneas en el espacio y tiempo, permiten una caracterización de la variabilidad climática del oleaje: análisis de la estacionalidad, interanualidad, correlación con patrones atmosféricos e índices climáticos. Además, otras aplicaciones en las que es necesaria esta información son:

- Estudios de riesgos costeros de erosión e inundación.
- Proyectos de ingeniería costera: diseño obras de protección, regeneración de playas, etc. El diseño de estructuras costeras requieren series históricas de altura de ola significativa a pie de dique para establecer la altura de ola de diseño cumpliendo determinados criterios de seguridad y fiabilidad así como para garantizar la funcionalidad y operatividad de las infraestructuras. El diseño de un puerto o marina también está condicionado por las características del oleaje local, necesarias la verificación de determinados umbrales de operatividad respecto a condiciones de navegación o rebase de las estructuras de protección. La regeneración de una playa conlleva un análisis de previo de las condiciones históricas del oleaje que han producido procesos de erosión. Además, la configuración en planta y perfil de equilibrio de la playa dependen de la energía media del oleaje local.
- Evaluación del recurso olas en el sector turístico, relación con deportes acuáticos como el surf o navegación deportiva.
- Información para el sector pesquero.

C. Posibles usos de GOST-StaCatarina

La base de datos GOST proporciona información histórica de nivel del mar con resolución espacial de 1 km y temporal horaria, y de larga duración (más de 30 años). Estas características hacen que GOST presente diferentes aplicaciones prácticas. Algunas de ellas se detallan a continuación:

- Análisis de la variación espacial del nivel del mar y sus cambios a lo largo del litoral de la costa de Santa Catarina.
- Evaluación de la variabilidad climática de la componente residual del nivel del mar y su relevancia entre las diferentes componentes del nivel del mar.
- Análisis de la componente de nivel del mar para estudios de la inundación costera y valores extremos de nivel del mar.
- Estudios ingenieriles que llevan asociado el diseño o construcción de una obra marítima y requieren la determinación de niveles locales.
- Determinación y análisis de cambios de la línea de costa.
- Sistemas de alerta temprana y operacionales para aplicaciones sectoriales con predicción de variables a horizontes de hasta 72 horas.

Bibliografía

- Bates, P. D., Horritt, M. S., Fewtrell, T. J. (2010), A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(12): 33-4.
- Camus, P., Menéndez, M., Méndez, F.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Cánovas, V., Pérez, J., Rueda, A., Losada, I.J., Medina, R. (2014), A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1002/2014JC010141.
- Cazenave, A., & Remy, F. (2011), Sea level and climate: measurements and causes of changes. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(5), 647-662.
- Church, J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck and J.X. Mitrovica (2004), Estimates of the Regional Distribution of sea level Rise over the 1950 to 2000 Period. *Journal of Climate*, 17, 2609-2625.
- Grimm, A. M., Ferraz, S. E. T., Gomes, J. (1998), Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 11, p. 2863-2880.
- Guimarães, P. V., Farina, L., Toldo Jr, E. E. (2014), Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 3195-3205.
- Herrmann, M. L. P. (1998), Problemas geoambientais na faixa central do litoral catarinense. 1998. 307 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- IPCC (2014), Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs.
- Kousky, V. E., Kayano, M. T., Cavalcanti, I. F. A. (1984). A review of the southern oscillation oceanic atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. *Tellus*, 36 A, p. 490-504.
- Menendez, M., García-Díez, M., Fita, L., Fernández, J., Méndez, F. J., & Gutiérrez, J. M. (2014), High-resolution sea wind hindcasts over the Mediterranean area. *Climate dynamics*, 42(7-8), 1857-1872.
- Slangen, A.B.A., Carson, M., Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W., Köhl, A., Vermeersen, L.L.A., Stammer, D. (2014), Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124 (1-2), pp. 317-332.
- Voituriez, B., Jacques, G. (2000), El Niño: fact and fiction. Paris: IOC Ocean Forum Series/UNESCO Publishing, 128 p.
- Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito, and A. Sallenger (2014), Coastal systems and low-lying areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)
www.cepal.org