



Output 4 | Actividad 4.4

Metodologías y criterios aplicados

Español

INFORME 4.4 – 31 Ene 2020 - UNIDO/CTCN Rfx 7000002437

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina) | Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República (IMFIA-UdelaR, Uruguay)

Technologies for the design of a regional strategic plan for the coastal management and adaptation to Climate Change in the Province of Buenos Aires

*Proyecto INA 376
Informe LHA 09-376-20
Ezeiza, enero de 2020*

Equipo de trabajo

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina)

Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Pablo E. García | Lucas Bindelli | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Msc. Ing. Nicolás J. Tomazin | Lic. Carlos Haspert | Arq. Leonardo S. Peralta | Lic. Federico Haspert

Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de

Dr. Ing. Mónica Fossati | Dr. Ing. Sebastián Solari | Dr. Ing. Pablo Santoro | Msc. Ing. Rodrigo Alonso | Ing. Michelle Jackson

Informe realizado por:

Mariano Re

Resumen

Para el Entregable 4 se realizaron diferentes tareas con el objetivo de analizar el impacto del cambio y la variabilidad climática en la dinámica de la costa marina de la provincia de Buenos Aires. Las actividades realizadas involucraron un análisis histórico de la dinámica costera y el análisis estadístico de las variables determinantes de la dinámica costera, las proyecciones de cambio climático para la costa de la provincia de Buenos Aires y un análisis de alta resolución de impactos y riesgo en zonas piloto de la costa de la provincia de Buenos Aires utilizando la modelación numérica de detalle en sitios específicamente determinados por su importancia en el sistema. En este informe se presenta un resumen de las metodologías y los criterios aplicados para el desarrollo de las tareas mencionadas.

Índice

1	Introducción	5
1.1	Problema	5
1.2	Asistencia técnica	6
1.3	Metodologías y criterios.....	6
2	Modelos numéricos.....	8
2.1	Introducción	8
2.2	Modelos globales y datos remotos	8
2.3	Modelos regionales	11
2.4	Modelos locales.....	16
3	Proyecciones climáticas	19
3.1	Oleaje y marea meteorológica	19
3.2	Nivel medio del mar	21
4	Análisis de riesgo costero.....	24
4.1	Metodología SimpleCoast	24
4.2	Cuantificación de la peligrosidad	24
4.3	Evaluación de los impactos	24
4.4	Evaluación de niveles de inundación de la playa	25
4.5	Evaluación de la erosión sobre el perfil de playa	25
4.6	Caracterización del riesgo costero	26

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

La costa oceánica de la Provincia de Buenos Aires presenta gran diversidad de playas a lo largo de sus 400 km, con diferentes regímenes de oleaje, mareas, y con composiciones granulométricas y morfológicas variables. Entre San Clemente, al NE, y Pehuén-Co, al SO, se concentran más de 30 localidades balnearias que pertenecen a 12 partidos de la provincia (Figura 1.1). Los municipios presentan importantes diferencias en cuanto a cantidad de población y actividades económicas. Principalmente se destacan actividades asociadas al turismo y actividades comerciales vinculadas al movimiento de los puertos.

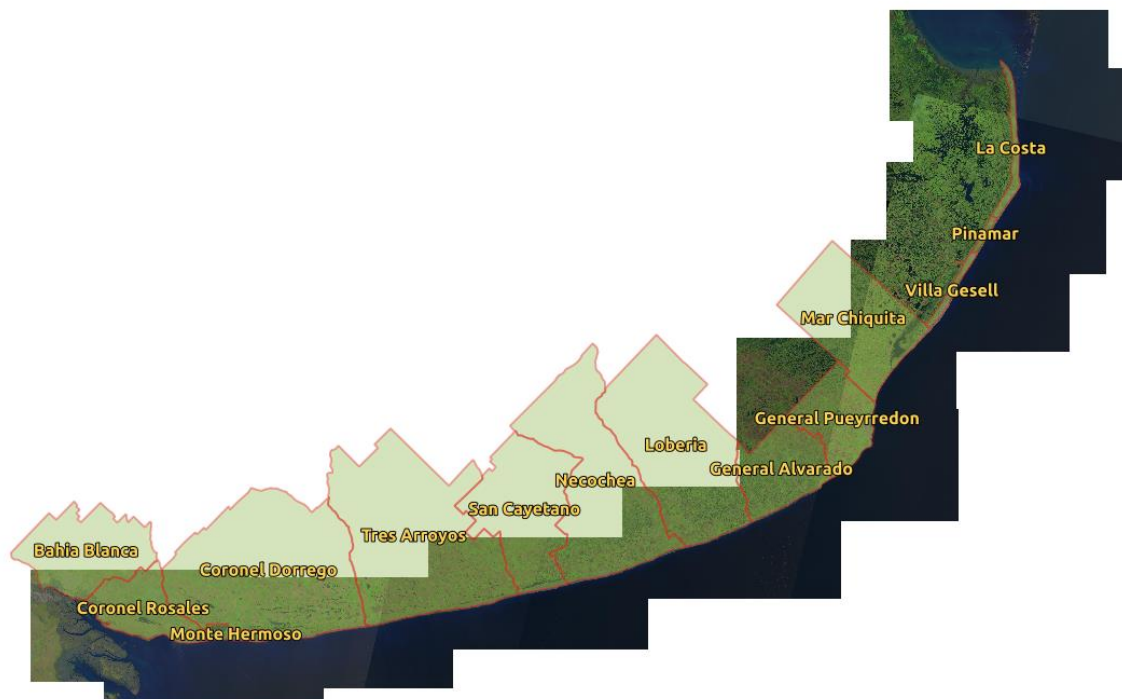


Figura 1.1. Partidos del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires.

Esta región litoral se ve afectada por numerosos problemas ambientales y climáticos, principalmente debidos a la erosión costera. Las actividades antrópicas como la construcción de defensas costeras, el crecimiento urbano sobre estructuras medanosas, la extracción de arena y la explotación de acuíferos sin un apropiado manejo han agravado los procesos erosivos y acrecentado la vulnerabilidad frente al Cambio Climático.

La constante acción del oleaje y el impacto de los eventos de tormenta severos (Sudestadas) son los responsables primarios de la dinámica erosiva de la costa bonaerense. Estudios referidos a obras puntuales como la instalación de rompeolas para prevenir erosión en la zona de acantilados en Mar del Plata, la ejecución de defensas costeras para protección de rutas o los planes de modificación de una de las escolleras del Puerto de Mar del Plata refuerzan la necesidad de contar con un manejo costero integral y planificado. Resulta en este contexto que se plantea la preocupación de la provincia de Buenos Aires respecto de la vulnerabilidad de la costa ante las distintas amenazas que afectarían su dinámica en el marco del Cambio Climático.

1.2 Asistencia técnica

El análisis de los procesos costeros naturales (meteorología, climatología, hidrodinámica y morfología) en relación a los cambios en las actividades humanas y del uso/cobertura del suelo, resulta un insumo necesario para el estudio del riesgo a la erosión costera de manera integral y la generación de información necesaria para la concreción de un plan integral de manejo costero bonaerense.

En este marco, el Departamento de Costa Marítima de la Provincia de Buenos Aires solicitó la Asistencia Técnica a CTCN (Climate Technology Center & Network) que plantea dos objetivos generales: i) diagnosticar el estado actual de la dinámica en la costa oceánica de la provincia, e ii) implementar un mapa de riesgo frente al Cambio Climático y delinear recomendaciones de manejo costero, para utilizar como insumo en la ejecución de un Plan de Manejo Integral Estratégico de la costa bonaerense a desarrollarse a futuro.

Entre los objetivos específicos a alcanzar por esta Asistencia Técnica se destacan: i) determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera durante las últimas décadas (nivel del mar, oleaje, viento, cambios morfológicos), ii) estimar a partir de proyecciones de Cambio Climático los posibles escenarios costeros futuros, y iii) desarrollar labores de transferencia tecnológica, capacitación y formación asociadas al proyecto. Entre los principales productos de esta asistencia se destacan la puesta en valor de las herramientas de modelación numérica del solicitante, la capacitación y entrenamiento en el manejo de las mismas y la elaboración de un manual de recomendaciones de manejo costero para la costa oceánica de Buenos Aires.

Esta Asistencia Técnica se lleva a cabo con los equipos profesionales del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina y el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) de Uruguay.

1.3 Metodologías y criterios

El Entregable 4 corresponde a una serie de actividades que se centran en el estudio de la dinámica costera de la provincia de Buenos Aires desde una perspectiva histórica y de futuro.

Entre las actividades realizadas se destacan un análisis histórico de la dinámica costera y el análisis estadístico de las variables determinantes de la dinámica costera, las proyecciones de cambio climático para la costa de la provincia de Buenos Aires y un análisis de alta resolución de impactos y riesgo en zonas piloto de la costa marítima de la provincia de Buenos Aires utilizando la modelación numérica de detalle en sitios específicamente determinados por su importancia en el sistema. En este informe se presenta un resumen de las metodologías y los criterios aplicados en los análisis anteriormente desarrollados, que corresponde a lo presentado en los Informes 4.1, 4.2 y 4.3 donde se extienden los detalles de las mismas.

2 MODELOS NUMÉRICOS

2.1 *Introducción*

Para realizar el análisis histórico de la dinámica costera y el análisis estadístico de las variables determinantes de la dinámica de la costa marítima de la provincia de Buenos Aires, y el estudio de alta resolución de zonas piloto se utilizaron e implementaron una serie de modelos numéricos. A pesar de existir algún grado de superposición entre las herramientas utilizadas, esta variedad permitió alcanzar los distintos objetivos de la Asistencia Técnica llevada a cabo en conjunto por dos grupos de trabajo en países diferentes.

A continuación se resumen las características principales de los modelos utilizados y sus objetivos y resultados principales. La clasificación aquí presentada tiene que ver con la escala espacial de cada uno de ellos, destacando modelos globales, regionales y locales.

2.2 *Modelos globales y datos remotos*

Los modelos de escala global utilizados en esta Asistencia Técnica corresponden a dos tipos: los modelos que proveyeron datos necesarios para las simulaciones a otras escalas espaciales y los modelos climáticos globales (GCMs) han sido usados para conectar predicciones de gran escala con dinámicas regionales mediante métodos de regionalización (*downscaling*). Además, la calibración y validación de los modelos utilizados en esta Asistencia Técnica requirieron de información obtenida con metodologías que responden al sensoriamiento remoto. Es el caso de las mediciones de viento, niveles y oleaje que fueron tomadas desde diferentes misiones de radar. Este tipo de datos requiere de un análisis de calidad previo que en todas las aplicaciones fue realizado.

2.2.1 *Batimetrías*

La información batimétrica de base utilizada en las modelaciones implementadas consistió en aquella volcada en las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de la Argentina. En algunos casos a esta información se sumó aquella de relevamientos locales para modelos de detalle. Pero en el caso de los modelos de mayor escala, más oceánicos, se necesitó utilizar información de los modelos globales de batimetría. En este caso se utilizaron dos fuentes: i) GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*) y ii) ETOPO1.

2.2.2 Reanálisis de vientos

La principal fuente de datos de vientos que se utilizó resultó el reanálisis climático de escala global desarrollado por el Centro Nacional de Predicciones Ambientales de Estados Unidos (NCEP).

Este reanálisis, CFSR, se refiere al modelo acoplado atmósfera-océanos-continentes-capas de hielo y al algoritmo de asimilación de datos utilizados en el mencionado centro de desarrollo. Abarca el período 1979-2010 con una resolución espacial del dominio atmosférico de ~38 km y un paso temporal de 1 hora. Desde 2011, NCEP tiene implementado este sistema de forma operativa, almacenando y poniendo a disposición sus datos en una base de datos denominada CFSv2. Este último puede considerarse una prolongación de CFSR que permite extender la base de datos hasta el presente. En este trabajo se abarcó el período de 40 años comprendido entre 1979 y 2018: los datos de 1979-2010 son del reanálisis CFSR y los de 2011-2018 de CFSv2.

A ambas bases de datos se accedió a través de la plataforma de archivo de datos para investigación (RDA) del Centro Nacional para la Investigación de la Atmósfera (NCAR) y la Corporación de Universidades para la Investigación de la Atmósfera (UCAR). Específicamente, para el funcionamiento de los modelos utilizados en esta Asistencia Técnica, se descargaron las variables viento en superficie y presión reducida al nivel medio del mar.

2.2.3 Marea astronómica

Tanto para forzar el modelo hidrodinámico de mayor escala (*ASTide*) como algunos de los modelos regionales planteados en esta Asistencia Técnica, se utilizó el modelo global de marea FES2014 que ofrece una serie de componentes de marea en una discretización global. El modelo global FES2014 es un modelo oceánico global de cálculo de marea astronómica elaborado por LEGOS, Noveltis, CNES y CLS de Francia, y ofrece un total de 34 componentes de marea en una grilla de $1/16^\circ$.

2.2.4 GCMs

Los Modelos Climáticos Globales (GCMs) son modelos numéricos capaces de evaluar el efecto que los cambios en los forzantes climáticos producen en un gran número de variables a escala global. Por ello, constituyen la base para las proyecciones climáticas regionales. En esta Asistencia Técnica se utilizaron proyecciones de 31 GCMs diferentes:

1. ACCESS1.0 (Bureau of Meteorology, Australia)
2. ACCESS1.3 (Bureau of Meteorology, Australia)
3. BCC-CSM1.1 (Beijing Climate Center, China)
4. BCC-CSM1.1m (Beijing Climate Center, China)
5. BNU-ESM (Beijing Normal University, China)
6. CanESM2 (Canadian Centre for Climate Modelling, Canada)
7. CCSM4 (National Center for Atmospheric Research, USA)
8. CESM1(BGC) (National Center for Atmospheric Research, USA)
9. CESM1(CAM5) (National Center for Atmospheric Research, USA)

10. CMCC-CM (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy)
11. CMCC-CMS (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy)
12. CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Météorologiques, France)
13. CSIRO-Mk3.6.0 (CSIRO Atmospheric Research, Australia)
14. FGOALS-g2 (Institute of Atmospheric Physics, China)
15. GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA)
16. GFDL-ESM2G (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA)
17. GFDL-ESM2M (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA)
18. HadGEM2-CC (Met Office Hadley Centre ESM, UK)
19. HadGEM2-ES (Met Office Hadley Centre ESM, UK)
20. INM-CM41.5x2 (Institute of Numerical Mathematics, Russia)
21. IPSL-CM5A-LR (Institut Pierre Simon Laplace, France)
22. IPSL-CM5A-MR (Institut Pierre Simon Laplace, France)
23. IPSL-CM5B-LR (Institut Pierre Simon Laplace, France)
24. MIROC-ESM (Center for Climate System Research, NIES y RCGC, Japan)
25. MIROC-ESM-CHEM (Center for Climate System Research, NIES y RCGC, Japan)
26. MIROC5 (Center for Climate System Research, NIES y RCGC, Japan)
27. MPI-ESM-LR (Max-Planck-Institute for Meteorology, Germany)
28. MPI-ESM-MR (Max-Planck-Institute for Meteorology, Germany)
29. MRI-CGCM3 (Meteorological Research Institute, Japan)
30. NorESM1-M (Norwegian Climate Center, Norway)
31. NorESM1-ME (Norwegian Climate Center, Norway)

2.2.5 Datos remotos

La cobertura temporal de las 13 misiones recopiladas en IMOS se inicia en 1985, con un faltante en el año 1991, y presenta una cantidad de datos en aumento hacia la actualidad producto de una mayor cantidad de misiones (seis en 2018: SENTINEL-3A, JASON-3, SARAL, HY-2, CRYOSAT-2, JASON-2).

La distribución espacial de la cantidad de datos IMOS disponibles en la zona de estudio (costa marítima bonaerense) y el porcentaje de los mismos que son catalogados como de buena calidad difiere según región. Se observa que en las regiones alejadas de la costa hay ~45000 datos de los cuales más del 90 % son de buena calidad, mientras que en el sector costero tanto la cantidad como el porcentaje de datos buenos decrecen. De todas formas, en la región en la que hay menos datos, la cantidad catalogados como de buena calidad superan los 10000. El motivo del decrecimiento en la cantidad de datos buenos en la zona costera se debe a problemas en la medición altimétrica atribuidos al cambio tierra-agua en la trayectoria del satélite.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos altimétricos a partir de las misiones presentes en la base de datos IMOS. Hay dos variables que reportan sobre la velocidad del viento: velocidad del viento sin calibrar (*WSPD*) y velocidad del viento calibrada (*WSPD_CAL*). Para las misiones GEOSAT, ERS1, TOPEX, ERS2, GFO y ENVISAT, los valores de *WSPD_CAL*, están fuera del rango de lo esperable, tanto los que se obtienen directamente de la base de datos, como los que se generan reproduciendo funciones de calibración. Para las misiones JASON 1, JASON 2 y JASON 3, CRYOSAT-2, HY-2, SARAL y SENTINEL-3A los valores de los datos calibrados se encuentran dentro de lo esperable. Por lo tanto, para esta Asistencia Técnica se optó por utilizar los datos de todas las misiones, utilizando el dato calibrado si proviene de las misiones

JASON 1,2 y 3, CRYOSAT-2, HY-2, SARAL y SENTINEL-3A, y el dato sin calibrar si proviene de las misiones GEOSAT, ERS1, TOPEX, ERS2, GFO y ENVISAT.

Además, estos mismos radares altimétricos montados en satélites de baja altura proporcionan observaciones de altura significativa del oleaje (Hs). Esta información también fue utilizada para la validación de los modelos de oleaje.

Los datos de estimación de la elevación de superficie libre mediante altimetría satelital se obtuvieron a través del sitio *Radar Altimeter Database System (RADS)*. Se trata de una base de datos homogeneizada, validada y con validación cruzada de datos de elevación de superficie libre a partir de altimetría satelital. Se descargaron los datos correspondientes a los siguientes satélites y misiones: Sara A y B, Jason 1 B y C, Jason 2 A y B, Cryosat 2 A, Jason 3, y Sentinel 3 A.

2.3 Modelos regionales

2.3.1 Modelo regional de marea del Atlántico Sur (*AStide*)

El modelo de mareas para el Atlántico Sur, denominado *AStide* y desarrollado en el IMFIA (UdelaR, Uruguay), se utilizó para forzar modelos locales del Río de la Plata y Frente Marítimo y zonas costeras argentinas. El dominio de este modelo incluye la costa marítima de la provincia de Buenos Aires, y por lo tanto se utilizó para forzar un modelo regional de marea en esta zona para realizar un análisis hidrodinámico retrospectivo.

El modelo numérico utilizado para la implementación del *AStide* es el MOHID (Instituto Superior Técnico – MARETEC, Portugal). El *AStide* utiliza la versión 2D del MOHID. La malla de cálculo presenta una discretización constante de 0,1° en latitud y longitud. La batimetría está basada en la información proporcionada por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN). Los datos de vientos y presiones se extrajeron de los reanálisis de NCEP-CFSR (*National Center for Environmental Prediction de Estados Unidos*) que presentan 6 horas de resolución temporal y 0.5° de resolución espacial. Se utiliza un coeficiente de rugosidad de fondo n de Manning de 0,005.

En las fronteras abiertas del modelo se utiliza el esquema de relajación Blumberg-Kantha según la profundidad y el efecto de la marea astronómica se impone a partir de la superposición de 13 componentes armónicas de la marea tomadas del modelo global de mareas FES2014. El paso temporal de cálculo se define $\Delta t = 180$ s y para la parametrización de la turbulencia se utiliza la formulación de Smagorinsky.

La calidad del modelo *AStide* se evaluó comparando las series simuladas y las observadas en las estaciones mareográficas de Puerto Deseado, Puerto Madryn y Mar del Plata. Además, se compararon en los mismos puntos los componentes armónicos simulados con los provistos por el modelo global de mareas FES2014.

2.3.2 Modelo hidrodinámico costa bonaerense (*hindcast*)

Se implementó un modelo hidrodinámico para la costa oceánica de la provincia Buenos Aires con el objetivo de realizar simulaciones retrospectivas (*hindcast*) cubriendo el período 1985-2016 (31 años). La herramienta numérica elegida para este modelo resultó TELEMAC/MASCARET, en particular su módulo hidrodinámico bidimensional TELEMAC2D.

El dominio del modelo abarca la costa de la provincia de Buenos Aires (incluyendo el Río de la Plata) y se extiende hasta el golfo de San Matías al sur y Río Grande (Brasil) al norte, y más allá de la Plataforma Continental hasta los 2300 m de profundidad aproximadamente. El modelo incluye la descarga de los ríos Paraná y Uruguay.

La grilla de cálculo está formada por elementos triangulares de tamaño variable (dentro del rango 1-7 Km). La batimetría se caracterizó a partir de las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), más complementos en la zona uruguaya y brasilera provenientes del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) y el modelo global GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*). El paso de discretización temporal es de $\Delta t = 60$ s y el modelo de turbulencia utilizado es de Smagorinsky. Se utilizaron datos horarios de viento en 10 m y presión a nivel del mar de reanálisis de NCEP: CFSR (1985-2010) y CFSRv2 (2010-2016). La condición de borde en la frontera oceánica del modelo proviene del modelo del Atlántico Sur *ASTide*.

El modelo se calibró y validó en base a información de niveles observados en estaciones mareográficas de la costa marítima de la provincia de Buenos Aires e información de altimetría satelital. Para la calibración se trabajó sobre el año 2010, comparando predicciones de marea astronómica en las estaciones de Mar del Plata, Monte Hermoso, Quequén y San Blas; y niveles observados en la estación de Mar del Plata. Para la validación se utilizaron otras ventanas temporales de datos disponibles de niveles en Mar del Plata, y además se utilizaron datos obtenidos a partir de altimetría satelital en todo el dominio de simulación y con énfasis en la zona costera de la Provincia de Buenos Aires. En la comparación de niveles simulados con niveles tomados de satélites, se evaluaron estos indicadores: CRMSE (*Centered Root Mean Square-Error*), el sesgo (BIAS), correlación de Pearson (r), gráficos de dispersión y cuantil-cuantil. Los datos simulados fueron interpolados en espacio y tiempo para hacerlos coincidir con las observaciones satelitales. La comparación por indicadores se realizó por zonas

2.3.3 Modelo hidrodinámico costa bonaerense (erosión costera)

El dominio del modelo hidrodinámico implementado para aportar al estudio de cuestiones sedimentológicas y morfológicas, se desarrolla longitudinalmente a lo largo de la costa marítima bonaerense, desde la Península de Valdés hasta la localidad costera de La Paloma en Uruguay en una franja costera que se extiende hasta aproximadamente la isobata de 100 m y sólo incluye la porción exterior de Río de la Plata.

El software utilizado para este modelo es el MIKE 21 y se operó bajo la licencia que posee la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH, Buenos Aires).

Se construyó una grilla de discretización constituida por elementos triangulares para cubrir todo el dominio del modelo con tres diferentes texturas (A para la zona de menor interés, C para la zona donde se requiere mayor precisión, y B una transición gradual entre A y C) siguiendo los siguientes criterios:

- Texturas lo suficientemente gruesas como para mantener costos computacionales aceptables, pero lo suficientemente finas como para obtener buena precisión.
- Triángulos casi equiláteros, evitando ángulos pronunciados.
- Área máxima de los elementos: 110 km²
- Disminución del área de los elementos hacia la costa

La batimetría del modelo se representó a partir de las cartas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) más información complementaria en el entorno de los puertos. Como forzante hidrodinámico se optó por representar la onda de marea en los bordes abiertos del modelo utilizando al modelo *ASTide* como proveedor de las condiciones de borde. Respecto al forzante meteorológico, por cuestiones de accesibilidad y transferencia, se utilizaron los datos del modelo global ECMWF, que provee valores de presión y velocidad del viento a 10 m en dos direcciones con una discretización espacial de 0.125° y un paso temporal de 3 horas.

La resistencia hidráulica se parametrizó en términos del coeficiente de rugosidad n de Manning, la difusión turbulenta se definió utilizando la formulación de Smagorinsky y como coeficiente de arrastre del viento se adoptó un valor constante. Se adoptó para las simulaciones un paso temporal variable permitiendo cumplir la relación CFL (Courant-Friedrich-Lévy).

Para la calibración se seleccionó el período correspondiente al año 2016, ya que en el mismo se cuenta registros simultáneos en Mar del Plata y San Clemente. En primer lugar se simuló la marea predicha en el puerto de Mar del Plata, forzando el sistema con componentes de marea en los bordes abiertos. Luego se simuló para una condición de marea total, forzando el sistema con simulaciones del modelo *ASTide*. Para las comparaciones se calcularon dos indicadores estadísticos: R^2 y el Error Cuadrático Medio (RMSE). Para la validación se simuló el año 2010 para comparar niveles observados en San Clemente.

2.3.4 Modelo regional de oleaje

El modelo numérico de oleaje utilizado se implementó en la plataforma de modelación de oleaje WAVEWATCH III® v5.16, un modelo de tercera generación desarrollado por el OMB (*Ocean Modeling Branch*) perteneciente al NCEP (*National Centers for Environmental Prediction, USA*). El modelo fue implementado con una aproximación multigrilla (tres grillas anidadas: Global, 1, 1.250° x 1.000°; Atlántico Sur, 2, 0.310° x 0.310°; y Región Buenos Aires, 3, 0.083° x 0.083°) y utilizando la opción ST4 que determina la estrategia de modelación del término fuente de la ecuación de acción del oleaje correspondiente al aporte de energía del viento y la disipación por rotura (*whitecapping*).

La grilla de menor resolución (1) es de cobertura global a los efectos de prescindir de condiciones de borde. De esta forma todo el oleaje es generado dentro del modelo. La que le sigue (2) abarca el Atlántico Sur con una resolución que se asimila a los campos de viento utilizados como forzante. Finalmente, la (3) abarca la zona de estudio con una resolución de 5' (~8km). Las batimetrías de las grillas (1) y (2) fueron tomadas de ETOPO1 y la grilla (3) utilizando cartas náuticas de la región.

La discretización del dominio espectral en cada una de las grillas de cálculo se realizó de manera de cubrir el círculo completo con un incremento uniforme en direcciones de 10°, en las tres se fijó la frecuencia mínima en 0.0412 Hz (T=24.27s) y se definió un factor de incremento geométrico de 1.1. La diferencia entre grillas está en la cantidad de frecuencias utilizadas. En la (3), para capturar con mayor detalle el oleaje local, se usaron 30 frecuencias, lo que permite alcanzar una frecuencia máxima de 0.6532 Hz (T=1.53s). Mientras que en la (1) y (2) se usaron 25 frecuencias, alcanzando una frecuencia máxima de 0.456 Hz (T=2.46s), lo cual es un límite usualmente utilizado en la modelación del oleaje a escala de cuenca oceánica.

El modelo avanza en el tiempo en base a una estrategia que se la conoce como “*método del paso de tiempo fraccionado*”, que se basa en dividir la ecuación gobernante y cada parte se resuelve con un paso de tiempo acorde a la misma. Para esto se definen cuatro pasos de tiempo para cada grilla de cálculo: paso de tiempo global, paso de tiempo asociado a la propagación espacial, paso de tiempo asociado a la propagación intra-espectral y un paso de tiempo para la integración del término fuente. En cada grilla se utilizaron distintos pasos de tiempo.

Los campos de viento utilizados corresponden a CFSR para el período 1979-2010 y CFSv2 para 2011 hasta el presente (para mantener la misma resolución, la base CFSv2 se interpoló bilinealmente de acuerdo a la base CFSR). Para la utilización de la parametrización ST4, se modificó el valor del parámetro BETAMAX (parámetro adimensional que multiplica el término fuente asociado al aporte de energía por parte del viento) a 1.55 para la grilla regional (3), mientras que para las grillas (1) y (2) se mantuvo su valor por defecto (BETAMAX=1.43).

La validación del modelo se realizó comparando los datos de oleaje altimétricos con los resultados de las simulaciones en siete regiones que abarcan a toda la costa marítima bonaerense. Para esto, se realizó una interpolación de los valores simulados al instante y punto de la observación. La caracterización de los errores se basó en los indicadores RMSE (*Centered Root Mean Square-Error*), el sesgo (BIAS), correlación de Pearson (r), y la realización de diagramas de dispersión y gráficos cuantil-cuantil.

2.3.5 *Modelo de transporte litoral de la Provincia de Buenos Aires*

Para analizar el transporte litoral en la costa marítima de la provincia de Buenos Aires, se utilizó el Sistema LITPACK, desarrollado por el DHI (Dinamarca) que se encuentra diseñado para abordar la problemática vinculada al análisis de los cambios morfológicos de largo plazo sobre una línea de costa.

LITPACK es una herramienta de modelación que se utiliza para el estudio de cambios morfológicos en costas con perfiles de playa cuasi-uniformes donde los cambios de la línea de costa son graduales. LITPACK permite determinar la hidrodinámica del escurrimiento producido por las olas y las corrientes, y los fenómenos responsables de los movimientos de sedimentos en la costa. Basado en estas condiciones es posible predecir la evolución natural de la línea de costa y la influencia de modificaciones debido al uso de estructuras marinas como puertos, espigones, muelles, revestimientos, etc.

LITPACK está compuesto por una serie de programas de cálculo (módulos STP, LITDRIFT y LITLINE). El módulo STP (modelo de transporte) y los módulos LITDRIFT (modelo numérico determinístico integral que calcula las corrientes a lo largo de la costa, la deriva litoral y el balance de sedimentos) y LITLINE (modelo de evolución de costas) representan los procesos físicos principales de esta dinámica.

El modelo STP calcula el transporte total de sedimentos (q_t) como la suma del transporte de fondo (q_b) y el transporte en suspensión (q_s). El transporte de material cohesivo como carga de fondo es calculado mediante la formulación de Engelund y Fredsøe

La aplicación a la costa bonaerense de la modelación del transporte litoral demandó la definición sobre una serie de opciones y parámetros para la ejecución del cálculo que se sintetizan aquí:

- *Sediment description*: **Single**. Implica que el cálculo de la deriva litoral se basa en el tamaño medio del grano D_{50} y en la velocidad media de asentamiento que se especificaron para los perfiles.
- *Ripples*. **Included**. Esto significa que se incluye el efecto de los ripples sobre la tensión de corte en el fondo. Los ripples se describen mediante cuatro parámetros con los siguientes valores: $C_1=0.1$, $C_2=2$, $C_3=16$, $C_4=3$.
- *Sediment transport parameters*. Densidad relativa del sedimento: **2.65**. Parámetro crítico de Shields: **0.045**. Porosidad del sedimento: **0.4**
- *Sediment calculation parameters*. Teoría de olas: **Stokes (1er orden)**. Términos convectivos: **Incluidos**. Descripción de la concentración de fondo: **Determinístico**.

Otros detalles de la aplicación a esta zona de estudio se mencionan a continuación:

Se analizó al menos un perfil asociado a cada uno de los partidos costeros.

- En los casos en los que no se contó con información granulométrica, se adoptó el valor de $D_{50} = 0,2$ mm para el desarrollo del cálculo.
- Cada perfil se asoció a la información de la dinámica costera (oleaje y niveles de marea) de la boya virtual más cercana.
- Para el cálculo del transporte litoral de sedimentos se utilizaron series cronológicas de olas y niveles correspondientes al período 2007-2016, realizando el análisis sobre la base de 10 años de información continua.

La validación de los resultados de esta modelación, consistió en la comparación de valores de deriva litoral simulados con aquellos señalados por diferentes autores de acuerdo a cada zona. Además, se complementó con una comparación del flujo neto de energía de las olas (PI), dada la relación directa entre PI y el transporte litoral, planteada por otros autores para el mismo tramo costero.

El software utilizado para este modelo (LITPACK) se operó bajo la licencia que posee la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH, Buenos Aires).

2.4 Modelos locales

2.4.1 Modelo del entorno de las localidades de Quequén y Necochea

Se implementó un modelo en el entorno del puerto de Quequén, cuyo borde exterior paralelo a la costa coincide con la ubicación de las boyas virtuales. Este modelo (DL-QN), se desarrolla longitudinalmente 43 km a lo largo de la costa y 15 km en forma perpendicular, abarcando las localidades de Necochea, Quequén, Bahía de los Vientos y Costa Bonita. Dado que para estudiar el impacto morfodinámico se requiere de mayor precisión y para no tener tiempos de simulaciones excesivas con el modelo local, se desarrolló adicionalmente un modelo de detalle (DD-QN) de la zona de análisis que se encuentra anidado al DL-QN. Este modelo se desarrolla longitudinalmente 16 km a lo largo de la costa y 4 km en forma perpendicular.

El software utilizado para este modelo es el MIKE 21 y se operó bajo la licencia que posee la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH, Buenos Aires).

Para el armado de la batimetría se utilizaron datos relevados en la zona del Puerto de Quequén y se complementaron con datos obtenidos de cartas del Servicio de Hidrografía Naval. Las grillas de discretización se materializaron con elementos triangulares. Para el modelo local se utilizaron dos texturas de elementos en todo el dominio (en el rango 300-400 m) mientras que para el modelo de detalle se definieron tres texturas (30-300 m).

Los parámetros físicos, tanto del modelo local como del modelo de detalle, son similares a los del modelo hidrodinámico regional. Para reducir costos computacionales, para el módulo de oleaje, se optó por utilizar una definición paramétrica de desacoplado direccional en lo que refiere a la formulación espectral del oleaje, y una formulación cuasi estacionaria en la formulación temporal. A su vez, se adoptó una discretización del oleaje en 16 direcciones.

Se simuló el período 01/01/2010 – 01/07/2010 del modelo local DL-NQ, utilizando como forzante los datos de oleaje determinados en las boyas virtuales que coinciden con el borde oceánico del modelo. Para contrastar los resultados del módulo de oleaje se contó con datos medidos por un olígrafo situado a las afueras del puerto de Quequén, y la calidad de la comparación se evaluó con los indicadores R^2 y Error Cuadrático Medio (RMSE) para la altura significativa de ola y los períodos medio y pico.

Las simulaciones vinculadas al estudio morfodinámico de este sector costero contemplaron las siguientes acciones:

- Se realizó un análisis preliminar simplificado de un sistema de bypass de arena superando la interrupción del puerto.
- Se modeló una fuente de sedimentos en dos posiciones distintas, bajo dos tipos de ola diferentes para observar hacia donde se dirige el sedimento.
- Se tomó la ola más frecuente por un lado y por el otro una ola frecuente, no necesariamente la segunda más frecuente, pero sí que tenga características perjudiciales para la obra que se estaba poniendo a prueba (dirección distinta a la óptima).
- Se tomaron olas de características constantes para poder hacer un análisis comparativo más directo, de ahí que se selecciona olas recurrentes.
- La tasa de caudal sólido adoptada se eligió de forma tal que sea similar a la deriva litoral que hay sin la presencia de las escolleras (se la tomó del cálculo de la deriva litoral).
- Se buscó determinar en cual posición Bahía de los Vientos recibe mayor caudal de sedimentos, determinada a partir de la sobre-concentración producida por la fuente.

2.4.2 Modelo del entorno de Mar del Plata

Para estudiar en el entorno costero del Puerto de Mar del Plata se implementó un modelo local (DL-MdP), de 50 km de extensión a lo largo de la costa y 13 km de ancho) y un modelo de detalle (DD-MdP), anidado al local y que toma como condiciones de borde los resultados de este último, que se desarrolla 7 km a lo largo de la costa y 5 km en forma perpendicular a la misma. El modelo local incluye las localidades de Mar del Plata y Camet.

El software utilizado para este modelo es el MIKE 21 y se operó bajo la licencia que posee la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH, Buenos Aires).

Las batimetrías del modelo local y del modelo de detalle se plantearon a partir de datos de las cartas del Servicio de Hidrografía Naval. Las grillas de discretización se materializaron con elementos triangulares. Para el modelo local se utilizó un solo paso medio de los elementos (orden 400 m) en todo el dominio mientras que para el modelo de detalle se definieron 8 texturas (en el rango 70-220 m). Los parámetros físicos, tanto del modelo local como del modelo de detalle, son similares a los del modelo hidrodinámico regional. Las condiciones de borde de oleaje se obtuvieron de las boyas virtuales.

Para validar el modelo morfológico acoplado se procedió a reproducir una serie de perfiles batimétricos ubicados en la boca del puerto de Mar del Plata relevados en diferentes fechas durante el período 04/2009 – 10/2009. Los parámetros para caracterizar el sedimento fueron los siguientes: $D_{50} = 0,21$ mm, coeficiente de graduación de 1,57 y una porosidad de 0,4. El

transporte de material no cohesivo como carga de fondo se estimó utilizando la formulación de Engelund y Fredsøe.

La validación del modelo morfológico se realizó a partir de la comparación entre los perfiles batimétricos relevados y simulados. También se compararon las variaciones del nivel de fondo en ambos perfiles.

Las simulaciones vinculadas al estudio morfodinámico de este sector costero contemplaron las siguientes acciones:

- Se modelaron dos trampas de sedimentos para ver si disminuía la sedimentación en la boca del puerto.
- Las trampas se modelaron haciendo cambios en la batimetría (una trampa a -8m y otra a -11m), ambas junto a la escollera Sur.
- La morfodinámica se calibró a partir de datos antecedentes: dos rectas en la boca de acceso en las que se midió la batimetría en tres oportunidades para analizar las variaciones temporales.

2.4.3 Modelo del entorno de la localidad de Las Toninas

Se implementó un modelo local (DL-LT), de 40 km de extensión a lo largo de la costa y 11,5 km de ancho) y un modelo de detalle (DD-LT), anidado al local y que toma como condiciones de borde los resultados de este último, que se desarrolla 11,5 km a lo largo de la costa y 3,5 km en forma perpendicular a la misma. El modelo local incluye las localidades de Las Toninas, San Clemente del Tuyú y Costa Azul.

El software utilizado para este modelo es el MIKE 21 y se operó bajo la licencia que posee la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH, Buenos Aires).

Para el armado batimétrico del modelo local y del modelo de detalle se utilizaron datos de las cartas del Servicio de Hidrografía Naval. Las grillas de discretización se materializaron con elementos triangulares. Para el modelo local se utilizó una sola textura de elementos en todo el dominio (orden 250 m) mientras que para el modelo de detalle se definieron tres texturas (en el rango 30-250). Los parámetros físicos, tanto del modelo local como del modelo de detalle, son similares a los del modelo hidrodinámico regional.

Las simulaciones vinculadas al estudio morfodinámico de este sector costero contemplaron las siguientes acciones:

- Se adoptaron los mismos parámetros de calibración que para el modelo de detalle de Mar del Plata.
- Se modelaron tres espigones paralelos a la costa con el objetivo de impedir la erosión entre las calles 4-12 (presencia de cables de fibra óptica).
- Se obtuvo un diseño preliminar de los espigones del *Coastal Engineering Manual*.
- Se sometió a los espigones a dos tipos de olaje distintos, siguiendo el mismo criterio que en el caso de Quequén.

3 PROYECCIONES CLIMÁTICAS

3.1 Oleaje y marea meteorológica

El análisis de las proyecciones climáticas fue realizado a partir del estudio de las variables que caracterizan la dinámica de la costa marítima como el oleaje y marea meteorológica, y el nivel medio del mar.

Para la obtención de proyecciones de las variables de la dinámica marítima se utilizó una metodología estadística de reducción de escala (*downscaling* estadístico) cuyos pasos se resumen a continuación:

- 1) **Determinación de las variables a predecir (*predictando*) y las variables de predicción (*predictor*).** El *predictando* lo componen la altura de ola significativa (Hs), la dirección media espectral del oleaje (Dm), el período medio espectral del oleaje (Tm) y las variaciones de nivel de mar por acción de la atmósfera (SS). La información de esta caracterización fue tomada de los análisis retrospectivos de niveles y oleaje (boyas virtuales). El predictor consiste en una variable con capacidad de explicar el comportamiento del *predictando* y para el que se disponga de información de proyecciones de cambio climático, por lo que se optó por el gradiente del campo de presiones en superficie (MSLP) en un dominio que abarca el Atlántico Sur.
- 2) **Agrupamiento guiado mediante regresión (*regression guided clustering*).** Se identificaron condiciones atmosféricas (valores del *predictor*) que dan lugar a valores similares de las variables que caracterizan la dinámica marítima costera (valores del *predictando*). Se utilizó la técnica de agrupamiento guiado mediante regresión (*regression guided clustering*) que calibra una regresión lineal entre el predictor y el *predictando*, luego utiliza técnicas de agrupamiento (*clustering*) para generar grupos.
- 3) **Determinación de los patrones de circulación (WP), su frecuencia y la distribución de probabilidad del *predictando*.** Cada uno de los grupos producto del agrupamiento corresponde a un patrón de circulación (*Weather Pattern; WP*), que se visualiza en este caso mediante el promedio de los campos de presión en superficie de los instantes correspondientes al agrupamiento. Cada WP tiene asociada a su vez una frecuencia de ocurrencia, dada por el número de datos en el grupo, y la distribución de probabilidad empírica de las variables que se quiere predecir (Hs, Dm, Tm, SS).
- 4) **Proyección de las salidas de los modelos de circulación globales en los patrones de circulación, para distintos escenarios de Cambio Climático.** Una vez definidos los WP, se tomaron los valores del *predictor* (gradiente del campo de presiones en superficie;

MSLP) de los resultados de 30 Modelos de Circulación Globales (GCM) corridos en el marco del CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), para el escenario de cambio climático RCP8.5 y para el período actual y el horizontes 2080-2100, y se proyectaron sobre los grupos (WP) definidos previamente. Dado que cada WP tiene asociada una distribución empírica, se obtuvieron las estimaciones del valor esperado del *predictando*. La baja magnitud de los cambios obtenidos para estas condiciones no justificó la inclusión de otros escenarios y horizontes que, a priori, resultarían menos severos.

5) **Evaluación de cambios esperables en las variables a predecir (*predictando*)**. El cambio para cada escenario y horizonte temporal se evaluó, para cada modelo, como la resta del valor esperado obtenido con el *predictor* en el período actual y el obtenido con el *predictor* en condiciones futuras. El cambio en el *predictando* se considera significativo únicamente si al menos el 80% de los modelos muestran el mismo sentido de cambio y si la media de todos los cambios es mayor a su desviación estándar.

Para la aplicación de la metodología descrita en la costa marítima de la provincia de Buenos Aires resultó necesario definir algunas variables:

- la variable de ponderación (α) a utilizar en el agrupamiento guiado mediante regresión,
- el número de grupos (N_{clus}) y
- el método de agrupamiento (k -means o SOM en combinación con k -means).

La identificación de la combinación de estas variables más adecuada para el caso de la costa bonaerense, se exploró para un único punto y es el de la boya virtual 25 referente de la dinámica costera en Necochea. Los datos de esta boya se utilizaron para un período de calibración (1980-2006) y uno de validación (2006-2016). El período de calibración se utilizó para identificar los grupos (WP), su frecuencia de ocurrencia y la distribución de probabilidad del *predictando* asociado a grupo. El período de validación se utilizó para evaluar qué porcentaje de la varianza de los distintos *predictandos* se logra explicar con la agrupación obtenida. Una vez seleccionado el método de agrupamiento y los valores de α y N_{clus} para los datos de la boya virtual 25 (Necochea), se aplicó la metodología anteriormente citada al resto de las boyas virtuales.

Para el análisis de la varianza explicada para el periodo de validación (2006-2016), se presentaron los resultados obtenidos con tres predictores diferentes obtenidos a partir del campo de presiones en superficie:

- (i) campo de gradiente de presiones instantáneo,
- (ii) campo de gradiente de presiones promedio en 24 horas (1 día) y
- (iii) campo de gradiente de presiones promedio en 72 horas (3 días).

A partir de los resultados obtenidos, para las proyecciones en todos los nodos de la costa bonaerense, se decidió utilizar el gradiente del campo de presiones promedio en 24 horas como predictor, la combinación SOM + k -means como método de agrupamiento automático para identificar 100 patrones de circulación (WP) por boya y α igual a 0.2.

Una vez contruidos y caracterizados los grupos (WP) para cada uno de los nodos analizados, se realizaron las proyecciones de las salidas de los GCMs para distintos escenarios, y se evaluaron los cambios esperables en las variables a predecir. Para ello se procedió de la siguiente forma:

- (1) Se proyectaron los campos de presiones de superficie de los GCMs del período 1985-2005 en los distintos grupos de cada nodo, obteniendo así una caracterización del valor esperado de cada una de las variables analizadas (Hs, Dm, SS, etc.) para cada modelo y para cada nodo en el presente.
- (2) Se proyectaron los campos de presiones de superficie de los GCMs del período 2081-2100 (escenario RCP8.5), en los distintos grupos de cada nodo, obteniendo así una caracterización del valor esperado de cada una de las variables analizadas para cada modelo y para cada nodo hacia fin de siglo.
- (3) Se restan las dos estimaciones obtenidas (fin de siglo y presente), obteniendo el cambio proyectado para cada variable y cada nodo por cada uno de los modelos.
- (4) Se calcula el cambio proyectado promedio de cada variable y para cada nodo y se determina si el mismo es significativo o no. Se considera que el cambio es significativo si al menos el 80% de los modelos muestran el mismo sentido de cambio y si la media de todos los cambios es mayor a su desviación estándar.

El cambio esperable se analizó en las siguientes variables: altura de ola significativa media (Hs media), altura de ola significativa de cuantil 95% (Hs 95%), marea meteorológica de cuantil 95% (SS 95%), nivel de mar total de cuantil 95% (TWL 95%) y dirección media del flujo de energía del oleaje (Dm).

3.2 Nivel medio del mar

La estimación de las tendencias regionales de cambio en el nivel medio de mar a lo largo del siglo XXI se obtienen directamente de los datos utilizados para la elaboración del capítulo 13 del informe IPCC AR5 y su material complementario publicado en 2013 por el IPCC.

Las proyecciones de nivel medio del mar regional, de acuerdo a los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, fueron obtenidas a partir de los datos utilizados para realizar los análisis de cambio en el nivel de mar regional del informe IPCC AR5. Estos datos se encuentran disponibles en la página web de la Universidad de Hamburgo. El dominio de los datos disponibles es global con resolución es de $1^\circ \times 1^\circ$.

Se asumió que los cambios regionales en el nivel medio del mar pueden diferir de la media global. Esto se debe entre otras cosas a procesos dinámicos del océano, cambios en la batimetría y cambios gravitatorios debido a la redistribución de las masas de agua en el sistema climático. Los procesos que afectan al nivel de mar incluyen tanto al océano, la atmosfera, los hielos terrestres y el ciclo hidrológico. Existen otros procesos que pueden afectar al cambio, pero que escapan del análisis del informe IPCC AR5, como por ejemplo los efectos debido a movimiento tectónico y transporte de sedimento a los océanos, entre otros.

Estos procesos contribuyen de diferentes maneras y su influencia se determina mediante distintas metodologías. En particular, las contribuciones se pueden separar en cuatro subgrupos:

- componentes relacionadas al océano,
- componentes relacionados a los hielos,
- componente relacionado al aporte de aguas terrestres (reservorios, ríos, etc.), y
- componente relacionado al ajuste isostático glacial (GIA).

Las **componentes relacionadas al océano** se calcularon a partir de variables obtenidas de 21 modelos atmosféricos globales (GCMs): ACCESS1-0, ACCESS1-3, CCSM4, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME, y se dividen en tres categorías:

- (i) anomalía de nivel de mar dinámica,
- (ii) anomalía global asociada a la expansión térmica, y
- (iii) anomalía debido a la presión atmosférica sobre el mar a través del efecto barométrico inverso.

Las **componentes relacionadas a los hielos** se dividen en cinco:

- (i) el balance de masa superficial (por acumulación),
- (ii) el balance de masa superficial (por ablación de hielos),
- (iii) las contribuciones dinámicas dada por cambios en los flujos de los hielos de Groenlandia y la Antártida,
- (iv) las contribuciones dinámicas por reacciones a los cambios topográficos de Groenlandia y la Antártida, y
- (v) la contribución de los glaciares (el resto de los hielos terrestres sin incluir Groenlandia y la Antártida).

Para determinar el balance de masa superficial se utilizan diferentes aproximaciones según sea para Groenlandia o la Antártida. Para el primero, se obtuvo el balance a partir de la temperatura superficial del aire y ajustando los resultados utilizando variables de salida de varios modelos del CMIP5. Para el segundo caso, se utilizan resultados de modelos del CMIP3. Por otra parte, la contribución dinámica se determinó escalando la tasa media de pérdida de masa de hielo (en unidades de mm/año, determinada para el periodo de años 2005-2010 descripta en capítulos anteriores del IPCC) desde 2007 hasta el 2100. Luego, para la contribución de los glaciares se utiliza una función parametrizada ajustada a diferentes modelos globales de glaciares ya existentes, que determina el cambio en el nivel de mar a partir de la temperatura del aire en superficie, obtenido también a partir de modelos del CMIP3 y CMIP5.

La **contribución relacionada a las aguas terrestres** se calculó de forma similar a la utilizada en el caso del aporte dinámico de los grandes hielos terrestres, escalando la tasa de aporte al cambio de nivel de mar global conocido.

Por último, la **componente relacionada al ajuste isostático glacial (GIA)** está asociada a la transferencia de masas de hielo al océano durante la última desglaciación y no está asociado al cambio climático contemporáneo. Existen modelos que analizan su contribución y para este caso se calcula a partir del modelo ICE-5G y el modelo de capa de hielo de ANU utilizando el código SELEN para la ecuación de nivel de mar.

Con estos análisis, y a partir del aporte de cada contribución, se obtuvieron las series temporales de aumento del nivel medio del mar en nueve puntos a lo largo de la costa marítima de la provincia de Buenos Aires para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

4 ANÁLISIS DE RIESGO COSTERO

4.1 Metodología SimpleCoast

El principal objetivo de este análisis consiste en estimar los impactos del oleaje y niveles extremos de marea evaluando los procesos de erosión e inundación que pueden desarrollarse en un punto para diferentes escenarios.

Sobre la base de esta idea se desarrollan las siguientes etapas:

- Cuantificación de la peligrosidad. Consiste en la identificación de escenarios de análisis definidos a partir de la relación entre las variables Altura significativa del oleaje (H_s) y Niveles de Marea (N) y sus correspondientes períodos de retorno (Tr).
- Evaluación del impacto de las amenazas costeras, a fin de cuantificar sus efectos en términos de altura de inundación de la playa y erosión costera.
- Identificación de un índice de riesgo costero relativo, incluyendo información sobre los efectos de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. Posteriormente, se evalúa el riesgo costero relativo considerando diferentes períodos de retorno que caracterizan el nivel de la amenaza.

4.2 Cuantificación de la peligrosidad

Como información de base fueron utilizados los resultados del análisis de valores extremos para alturas del oleaje y niveles de marea correspondientes a distintas boyas virtuales planteadas en este estudio, obteniéndose valores de cada variable asociados a distintos períodos de retorno.

En el caso de la información referida al oleaje, la misma fue propagada desde la ubicación de las boyas virtuales hasta zonas de baja profundidad cercanas a cada playa utilizando el módulo LITDRIFT del modelo LITPACK, con el propósito de representar adecuadamente la transformación de las olas contemplando los procesos de refracción, asomeramiento y fricción de fondo. De esta manera se obtuvieron los parámetros del oleaje adecuados para la implementación de las expresiones de cálculo aplicadas para estimar los impactos en términos de erosión e inundación de la playa.

4.3 Evaluación de los impactos

Para esta aplicación se utilizaron las herramientas de cálculo de libre disponibilidad en el paquete SimpleCoast desarrollado y ofrecida por Deltares (Países Bajos).

En todos los casos, los cálculos se realizaron sobre perfiles de playa que resultan representativos cada área de estudio, habiendo sido relevados por el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP-CIC).

4.4 Evaluación de niveles de inundación de la playa

Se utilizó el módulo 'Flooding' de SimpleCoast que requiere del ingreso de numerosos valores relacionados con las características del perfil de playa, el oleaje y el nivel de la marea. Se detalla a continuación la secuencia ordenada de los valores de los principales parámetros requeridos.

- a) **Profundidad del agua al pie de la duna.** Requirió de definir el pie de la duna en cada perfil de playa. Se consideró que el pie de la duna coincide con el fin de la playa frontal o línea de bajar (valor obtenido de las tablas de marea del Servicio de Hidrografía Naval, SHN).
- b) **Altura de las olas y nivel de la marea.** Se utilizó el modelo LITDRIFT para propagar el oleaje correspondiente a diferentes escenarios de cálculo a los largo de los perfiles de playa desde las boyas virtuales. Las condiciones de borde establecidas (altura, periodo y dirección de las olas, y niveles de marea) correspondieron a distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 y 100 años). Parámetros resultantes: altura de ola significativa en aguas costeras, nivel de la marea en aguas costeras y altura de ola significativa al pie de la duna.
- c) **Pendiente del perfil de playa.** Se consideraron formulaciones diferentes para perfiles con berma y perfiles sin berma.
- d) **Cálculo del run-up.** De las tres opciones de fórmulas disponibles para calcular el run-up se seleccionó la fórmula de Stockdon debido a que fue diseñada para playas de arena.
- e) **Máximo nivel de inundación.** Una vez determinado el valor de run-up se obtuvo el máximo nivel de inundación mediante una expresión que considera a la marea astronómica, la marea meteorológica y la sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje o wave setup.
- f) **Cálculo del sobrepaso.** Para los casos en los que fuera necesario, se estimaron caudales de sobrepaso mediante las fórmulas del Manual EUROTOP.

4.5 Evaluación de la erosión sobre el perfil de playa

Para estimar el retroceso de la línea de costa se utilizó el módulo de cálculo 'Littoral' de SimpleCoast. Este módulo requiere del ingreso de numerosos valores relacionados con las características del perfil de playa, el oleaje y el nivel de la marea. Se detalla a continuación la secuencia ordenada de pasos para la obtención de los valores de los principales parámetros requeridos para el cálculo.

- a) **Caracterización del perfil de playa: pendiente, altura de la duna y granulometría.** La granulometría del perfil, definida por el diámetro medio del sedimento D_{50} , se obtuvo a partir de la revisión de trabajos locales (en los casos en los que no se contó con información se adoptó el valor de $D_{50} = 0,2$ mm para el desarrollo del cálculo).
- b) **Altura de las olas y nivel de la marea.** Misma metodología que para la estimación de los niveles de inundación en el módulo 'Flooding'.

- c) **Cálculo de la erosión de las dunas.** Son dos las fórmulas disponibles para calcular la erosión de las dunas en el módulo '*Littoral*' de SimpleCoast. Para esta aplicación se seleccionó la fórmula de van Rijn debido a que permite introducir el tiempo de duración de las condiciones de olas y niveles.

4.6 Caracterización del riesgo costero

La caracterización del riesgo costero se basó en la combinación de la peligrosidad y la vulnerabilidad, la cual incluye el concepto de exposición. Para cada componente se desarrolló un índice compuesto por indicadores considerados determinantes para analizar las particularidades de la amenaza y las características sociales y económicas de la población expuesta a la misma.

El índice de peligrosidad está compuesto por dos indicadores que representan la erosión potencial de la playa frente a una amenaza (temporales) y la cota de inundación asociada a los fenómenos de sobrelevación del nivel de agua por efectos meteorológicos y por la acción de las olas (marea meteorológica, set-up del oleaje, *run-up* y eventualmente sobrepaso).

El índice de vulnerabilidad fue extraído de un reciente trabajo local desarrollado por colegas del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Dicho índice abarca once variables que involucran aspectos demográficos, educativos, sanitarios, de salud, económicos, productivos, laborales y de exposición de la población. Estas variables fueron agrupadas en tres indicadores: demográfico, condiciones de vida y trabajo y consumo.

Cada indicador fue clasificado en cinco categorías valoradas del 1 al 5, establecidas cuantitativamente cuando fue posible. Para las categorías que no fueron cuantificadas se realizó una descripción cualitativa. El índice de peligrosidad fue calculado de acuerdo a la caracterización de la inundación y la erosión, y el índice de vulnerabilidad fue obtenido a partir de la caracterización demográfica, de condiciones de vida y de trabajo y consumo. Finalmente el índice de riesgo costero se computa como la multiplicación de los índices de peligrosidad y de vulnerabilidad. La escala de riesgo costero es la siguiente: 0-5: muy bajo riesgo, 5-10: bajo riesgo, 10-15: riesgo moderado, 15-20: riesgo alto y 20-25: riesgo muy alto.