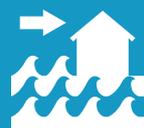


# NAP Costas

Plan Nacional de  
Adaptación Costera  
de Uruguay

Documento preparatorio

Casos piloto. Playa Carrasco (Montevideo)





# IH cantabria

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



## MVOTMA

Ministerio de Vivienda  
Ordenamiento Territorial  
y Medio Ambiente



## CTCN

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK



## DESARROLLO DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS, LA VULNERABILIDAD Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ZONA COSTERA DE URUGUAY

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCO

Han elaborado este informe:

Ing. Patricia González-Lamuño

Dr. Saúl Torres-Ortega

Dr. Alexandra Toimil

Prof. Raúl Medina

Ing. Moisés Álvarez Cuesta

Ing. Sara Sanz Sáenz

Además, han participado en el proyecto:

Dr. Paula Camus

Dr. Melisa Menéndez

Dr. Marta Ramírez

Tec. Sheila Abad

Dr. Pedro Díaz-Simal

Ing. Juan Ortiz

El proyecto se ha desarrollado bajo la dirección del Prof. Iñigo Losada Rodríguez.

*Nota: En este documento se utiliza la coma (p.ej. 85,32) como indicador decimal, y el punto (p.ej. 250.000) como separador de miles y millones.*

*Fotografía de portada: Playa Carrasco. Departamento de Montevideo. Autor Jimmy Baikovicus, bajo licencia CC BY-SA 2.0.*

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| Resumen Ejecutivo .....  | 3  |
| Antecedentes .....   | 7  |
| 1 Características de la zona piloto.....                                   | 8  |
| 1.1 Descripción general y diagnóstico.....                                 | 8  |
| 2 Clima marítimo en la zona de estudio.....                                | 12 |
| 2.1 Dinámicas históricas.....  | 12 |
| 2.2 Dinámicas futuras.....   | 15 |
| 3 Riesgo de inundación costera.....  | 16 |
| 3.1 Exposición.....  | 16 |
| 3.1.1 Exposición socioeconómica .....                                      | 16 |
| 3.1.2 Exposición física.....   | 19 |
| 3.2 Peligrosidad .....   | 19 |
| 3.2.1 Mapas de inundación .....  | 19 |
| 3.3 Riesgo .....   | 24 |
| 3.3.1 Población afectada por inundación costera.....                       | 24 |
| 3.3.2 Daños sobre los activos construidos debido a inundación costera..... | 27 |
| 4 Riesgo de erosión costera .....  | 30 |
| 4.1 Exposición.....  | 30 |
| 4.1.1 Exposición socioeconómica .....                                      | 30 |
| 4.1.2 Exposición física.....   | 31 |
| 4.2 Peligrosidad .....   | 32 |
| 4.2.1 Retroceso de la línea de costa.....                                  | 34 |
| 4.3 Riesgo .....   | 37 |
| 5 Conclusiones.....  | 40 |
| 6 Referencias.....   | 43 |

## RESUMEN EJECUTIVO

### DESCRIPCIÓN

- Playa Carrasco (Departamento de Montevideo) es una playa urbana ubicada en los barrios residenciales de Punta Gorda (al oeste) y Carrasco (este), a 15 kilómetros hacia el este del centro de la ciudad de Montevideo.
- Es una playa de arena fina blanca de aproximadamente 4.000 metros de longitud y 40 metros de anchura media, que en algunos tramos dispone de un campo de dunas y confinada en la mayor parte de su trasdós por el muro del paseo marítimo.

### DIAGNÓSTICO

A partir de la información del riesgo percibido por los agentes locales y del análisis de imágenes históricas de la playa se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La desembocadura de Arroyo Carrasco supone un confinamiento parcial al transporte de arena. La forma de la flecha indica que el sentido medio anual del transporte de sedimentos en la unidad fisiográfica es de oeste a este.
- La continuidad del transporte de sedimento está actualmente limitada por la ausencia de aportes de arena, debido a la canalización de los cauces fluviales y la construcción de diques y espigones, por el extremo oeste.
- La zona oeste de la playa no tiene playa seca y se produce el descalce del muro con temporales.

### DINÁMICAS ACTUALES

- La zona de estudio se ubica en la zona exterior del Río de la Plata, donde tienen lugar procesos complejos debido, entre otros, a la interacción del flujo entrante hacia el continente en las zonas profundas y el flujo de descarga por las zonas someras.
- La playa tiene una forma rectilínea gobernada por la dirección del flujo medio de energía del oleaje ( $112,5 - 157,5^\circ$ ).
- La altura de ola asociada al percentil 50% es menor a 1 metro, y la altura de ola asociada al percentil 95% es igual a 1,5 metros.
- El patrón de corrientes en la zona está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea junto con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos.

### DINÁMICAS FUTURAS

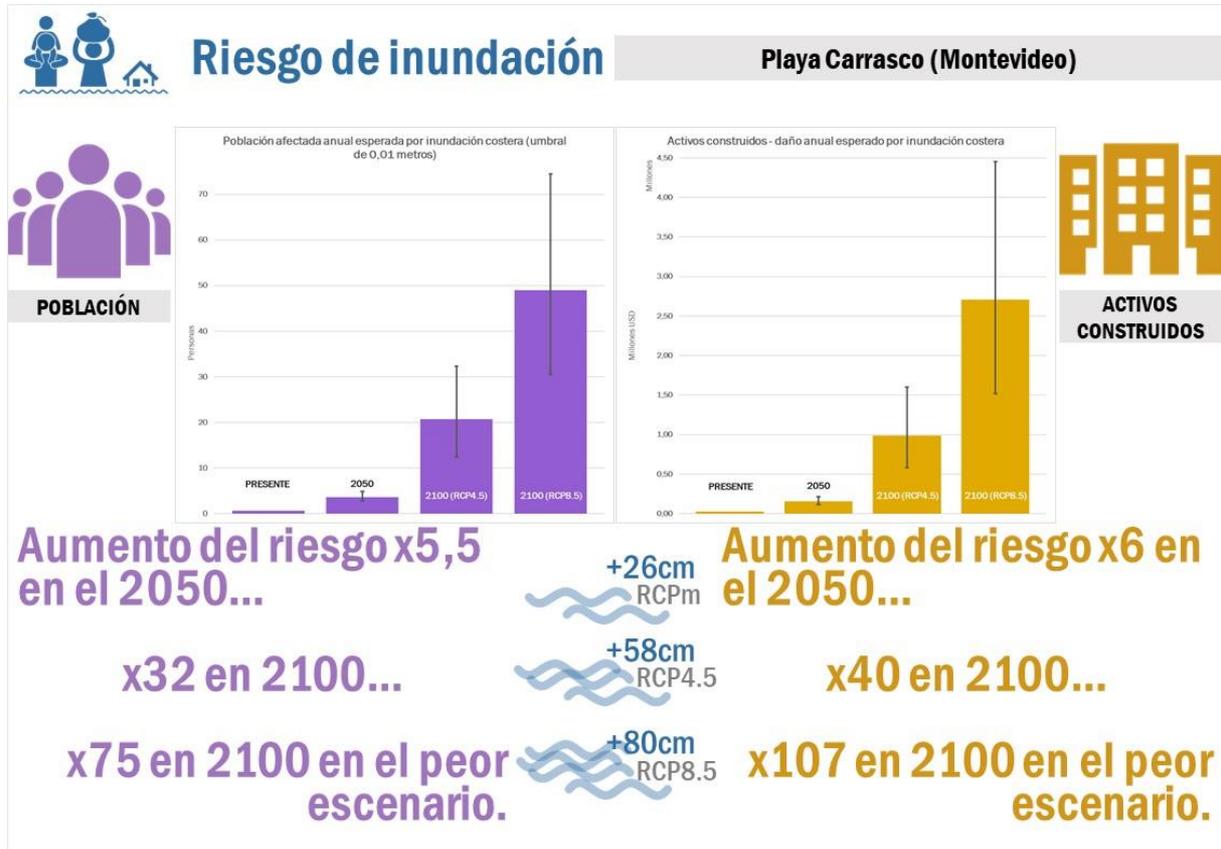
- El aumento medio del nivel medio del mar esperado en 2100 en la costa de Uruguay es de 0,80 metros para el peor escenario (RCP8.5).
- La magnitud de los cambios debido al aumento de nivel medio del mar en 2100 en los parámetros del oleaje y del residuo del nivel del mar es pequeña. Se esperan cambios de altura de ola significativa del orden de 0,03 - 0,04 m para los incrementos y 0,04 - 0,05 m para las

disminuciones, cambios positivos de periodo de pico del orden de 0,05 s y negativos del orden de 0,1 s, y un giro antihorario del oleaje esperado entre 3-6°. Los cambios en el residuo del nivel del mar son del orden de 0,01-0,015 m.

## INUNDACIÓN

Del análisis de riesgo por inundación costera se concluye:

- Una de las zonas más expuestas del área de estudio es la zona urbana situada detrás de la parte más occidental de la playa, a la altura de la avenida Bolivia y la calle 6 de Abril.
- En el presente, solamente aparecen problemas de inundación costera para eventos con probabilidad baja (periodo de retorno de 100 años) o muy baja (periodo de retorno de 500 años) de ocurrencia.
- En el futuro, se prevé un aumento en la intensidad de los eventos extremos debido al aumento del nivel medio del mar. El riesgo de inundación para eventos con probabilidad alta de ocurrencia en el futuro será equiparable al riesgo de inundación en el presente para eventos con probabilidad muy baja de ocurrencia. En 2050, la superficie inundable asociada al evento periodo de 50 años será superior a la superficie inundable asociada al evento de periodo de 100 años en el presente. En 2100 (RCP4.5) un evento de periodo de 25 años generará un área inundada mayor que un evento de periodo de 500 años en el presente; y en 2100 RCP8.5 la superficie inundable más cercana a la generada con un evento de periodo de 500 años en el presente será la generada con un evento de periodo de 10 años.
- En 2100, tanto en el RCP4.5 como en el RCP8.5, la zona de Punta Gorda situada entre la rambla y la avenida Bolivia y la zona de Carrasco situada entre la rambla y la avenida Pedro Blanes; y la zona este de Carrasco situada entre la rambla y la avenida General Rivera, son zonas con riesgo potencial de inundación alto.

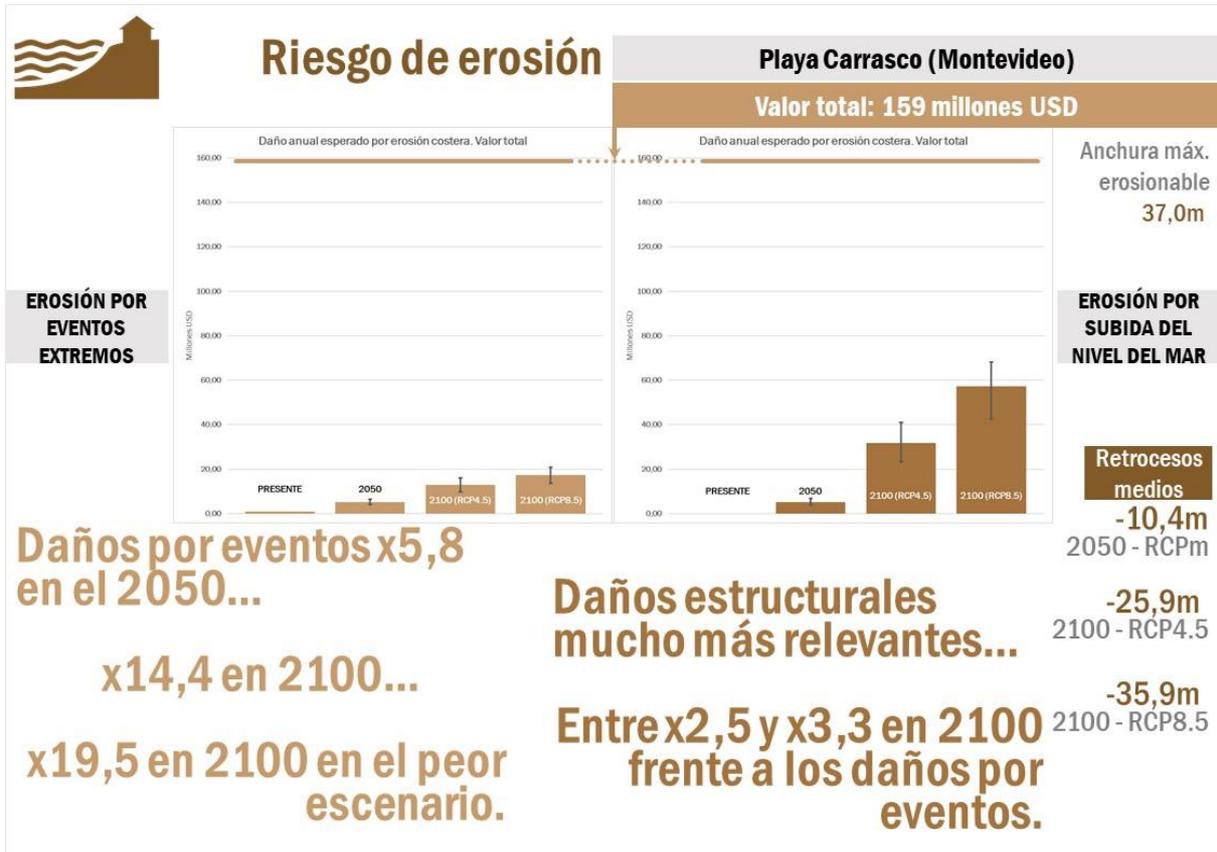


## EROSIÓN

Del análisis de riesgo por erosión costera:

- Se ha estimado que Playa Carrasco es la cuarta playa más valiosa de la costa en términos absolutos.
- El valor recreativo proporcionado dobla el valor de protección (110 millones de USD anuales frente a 49), proporcionando un valor total de casi 160 millones de USD anuales.
- El tramo de playa más expuesto a la erosión costera es el tramo entre la avenida Bolivia y el Hotel Sofitel, tanto por la proximidad al tramo oeste de la playa ya erosionado, como por la anchura de playa seca y del campo de dunas.
- En base a imágenes históricas se ha estimado que en el presente este tramo de playa ha sufrido retrocesos de hasta 15 metros provocados por temporales.
- Mientras que, en el presente, un evento extremo de 5 años de periodo de retorno originaría una pérdida del 10% de la superficie de la playa, un evento de la misma probabilidad de ocurrencia en el 2100RCP8.5 originaría una pérdida esperada del 54% de la superficie de la playa.
- Además, se estima que el retroceso estructural de la línea de costa provocará la pérdida permanente de entre 9 y 12 metros de anchura de playa en 2050, y de hasta 37 metros en 2100.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO



## ANTECEDENTES

Este documento es parte del proyecto “**Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay**”, financiado por el Climate Technology Center & Network, y corresponde a una de las evaluaciones de riesgo frente al cambio climático de los 6 sitios piloto seleccionados por el Gobierno de Uruguay. Los estudios piloto complementan el análisis de riesgo realizado a escala nacional y recogidos en los entregables D4.1 (IHCantabria, 2019c) y D4.2 (IHCantabria, 2019d) de este mismo proyecto.

Para el análisis de los sitios piloto se ha desarrollado una metodología específica que se ha recogido en el Entregable 4.4 de este proyecto (IHCantabria, 2019e). Por tanto, las bases metodológicas sobre las que se sustentan los resultados que se recogen a continuación no se describen en este documento.

Como primer paso en el análisis de los casos, durante los talleres celebrados en el marco de este proyecto en Montevideo en 2017, se hizo un análisis de los diferentes sitios piloto planteados por la administración uruguaya con los actores y agentes locales relevantes de cada una de las zonas de estudio.

Este documento analiza concretamente el caso piloto de Playa Carrasco, una de las dos playas consideradas para la Intendencia de Montevideo a propuesta de los departamentos competentes en la gestión de playas que son el Departamento de Planificación y el Departamento de Gestión Ambiental de la Intendencia.

En los talleres anteriormente mencionados, los agentes locales participantes destacaron los siguientes aspectos como característicos de la problemática de Playa Carrasco:

- Problemas evidentes de erosión costera por acción antropogénica, fundamentalmente por la construcción de la rambla (paseo marítimo) sobre la duna primaria, así como las evacuaciones de los pluviales.
- Erosión por viento también relevante.
- Falta de conservación de la vegetación dunar.
- Inundación y descalce y destrucción de los muros de protección como consecuencia de la erosión.

Sobre esta base se ha procedido a desarrollar el estudio local que consta de: un diagnóstico a partir de la observación de la evolución histórica de la playa y de las dinámicas imperantes; el estudio de las dinámicas generadoras de la inundación y erosión con base en datos históricos y con sus proyecciones a futuro ante diferentes escenarios de cambio climático; el análisis de la exposición a la inundación y erosión en la zona de estudio y, finalmente, una cuantificación del riesgo derivado de la inundación y erosión ante diferentes escenarios de cambio climático.

Este análisis de riesgo deberá sentar las bases para posteriores estrategias o planes de adaptación que adecuen los futuros niveles de riesgos proyectados al riesgo asumible o tolerable que se determine.

## 1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA PILOTO

### 1.1 Descripción general y diagnóstico

Playa Carrasco (Figura 3) es una playa urbana ubicada en los barrios residenciales de Punta Gorda (al oeste) y Carrasco (este), a 15 kilómetros hacia el este del centro de la ciudad de Montevideo, en el Departamento de Montevideo (Figura 1).

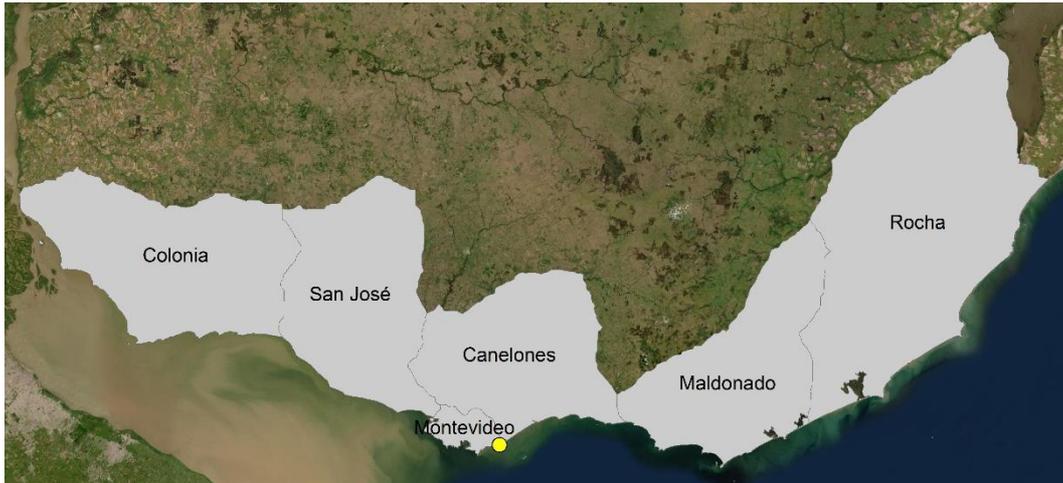


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Playa Carrasco, Montevideo).

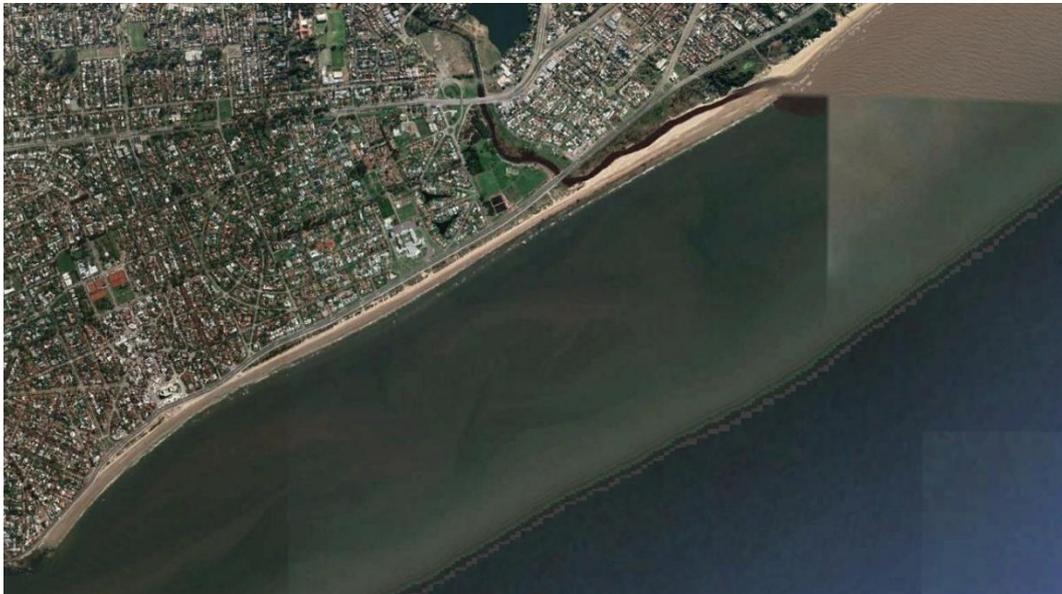


Figura 2. Situación de Playa Carrasco en 2019 (Fuente: Google Earth).

### **Principales elementos morfológicos**

Playa Carrasco es una playa de arena fina blanca de aproximadamente 4.000 metros de longitud y 40 metros de anchura media, que en algunos tramos dispone de un campo de dunas y confinada en la mayor parte de su trasdós por el muro del paseo marítimo.

Desde el punto de vista morfodinámico, la playa es fundamentalmente rectilínea y sin confinamiento lateral por lo que el transporte de sedimentos dominante es longitudinal y está gobernado por la dirección del flujo medio de energía del oleaje en la zona.

### **Fuentes y sumideros de sedimento**

Playa Carrasco tenía dos potenciales fuentes de sedimento: la arena procedente de las playas ubicadas al oeste y los aportes locales. Respecto a la arena procedente de las playas del oeste, si bien hay evidencias de que este aporte existió, la canalización de los cauces fluviales y la construcción de diques y espigones hacen que ese aporte sea, en la actualidad, despreciable. Algo similar ocurre con los aportes locales de los arroyos que desembocaban en la playa. La construcción de viales, autopistas y otras obras de fábrica han reducido y prácticamente eliminado el volumen de arena que la playa recibía por este mecanismo.

El balance neto de sedimentos en la playa es, por tanto, negativo. La playa pierde arena por el extremo este y no recibe suficiente arena ni de los arroyos locales ni de las playas ubicadas al oeste. Un aspecto destacable es la acumulación de arena en la flecha de la desembocadura.

### **Evolución histórica**

Tal y como se puede ver en las imágenes siguientes, la desembocadura de Arroyo Carrasco (en el extremo este de la playa) supone un confinamiento parcial al transporte de arena. Comparando la situación de la playa en 2019 (Figura 3) con la situación de la playa en 2001 (Figura 4) se puede apreciar la acumulación de arena en la flecha, y el sentido de la misma evidencia que el transporte de sedimentos en la zona es de oeste a este. En las dos imágenes de satélite se puede observar la ausencia de playa seca en el extremo oeste de la playa, a la altura de la Avenida Bolivia, lo que indica que la playa no recibe arena por ese extremo y/ o que los aportes locales se han reducido o eliminado. Tan solo en las zonas en las que la carretera se encuentra retranqueada hacia el núcleo urbano la playa mantiene su playa seca y dunas. La falta de playa seca permite que el agua durante temporales alcance el muro y provoque el descalce del mismo.

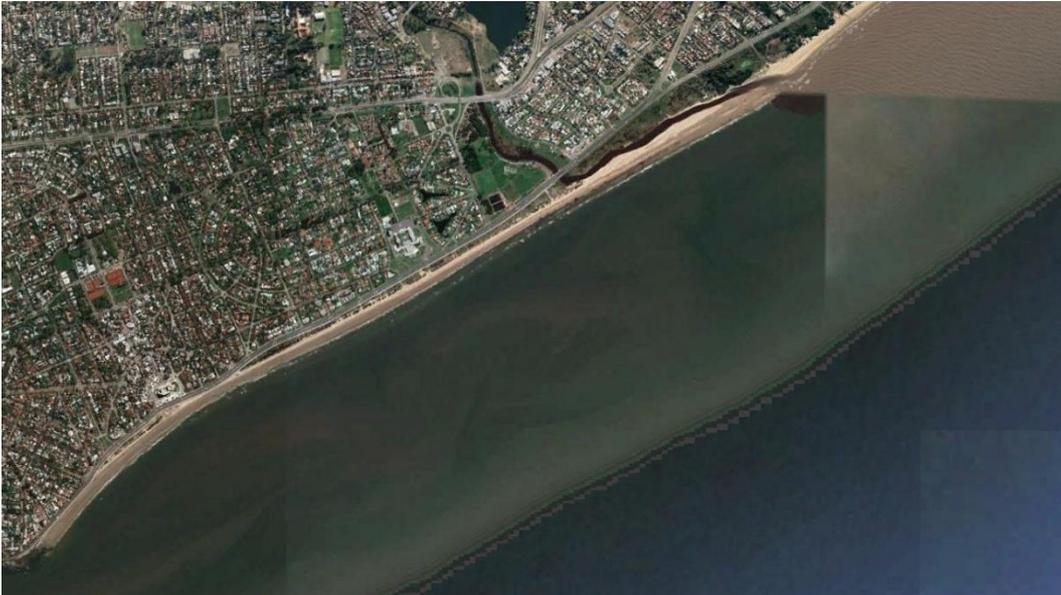


Figura 3. Situación de Playa Carrasco en 2019 (Fuente: Google Earth).



Figura 4. Situación de Playa Carrasco en 2001 (Fuente: Google Earth).

En base a las imágenes de satélite se ha estimado un volumen de transporte longitudinal de sedimento. Como se puede observar en las imágenes, la flecha de la desembocadura de Arroyo Carrasco ha crecido aproximadamente 1.000 metros en 18 años, con una anchura media de 60 metros. Asumiendo una profundidad de cierre de 4,5 metros y una berma de 1,2 metros, se ha estimado un volumen de arena acumulado en la flecha en 18 años igual a 342.000 m<sup>3</sup>. Esto supone una tasa anual de transporte longitudinal de 19.000 m<sup>3</sup>/año.

### Diagnóstico inicial

Un diagnóstico inicial conduce a concluir que Playa Carrasco es una playa en un continuo proceso erosivo como consecuencia de la falta de aporte de arena de las diferentes fuentes que alimentaban la playa natural antes de la actuación antrópica en la zona.

## 2 CLIMA MARÍTIMO EN LA ZONA DE ESTUDIO

La costa uruguaya tiene aproximadamente 672 kilómetros de largo, de los cuales 452 km corresponden al Río de la Plata y 220 km al océano Atlántico. El Río de la Plata es un estuario con una dinámica compleja debido a la acción conjunta del caudal de los ríos Uruguay y Paraná, la marea astronómica (régimen micro-mareal), la marea meteorológica y el oleaje. Playa Carrasco (Montevideo) se localiza en el límite entre la zona intermedia y la zona exterior del estuario del Río de la Plata (Figura 5), donde tienen lugar procesos complejos debido, entre otros, a la interacción del flujo entrante hacia el continente en las zonas profundas y el flujo de descarga por las zonas someras (Fossati et al., 2014).



Figura 5. Morfología del Río de la Plata (Boschi, 1988).

### 2.1 Dinámicas históricas

Como primera aproximación para conocer y comprender las dinámicas en la zona de estudio, se han utilizado las fichas (Figura 7, Figura 8 y Figura 9) del Atlas Climático generado dentro del proyecto (IHCantabria, 2019a). Se ha escogido el punto más cercano a Playa Carrasco (punto 35, Figura 6). La profundidad en este punto es de aproximadamente 9,7 metros.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO

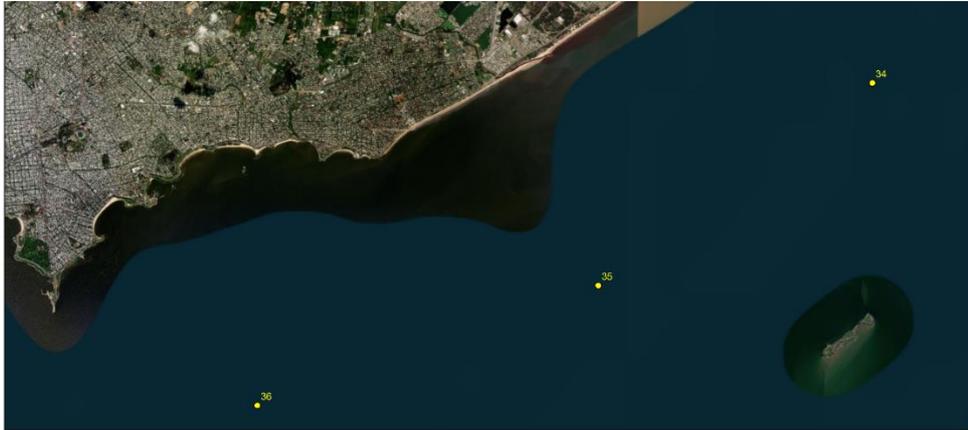


Figura 6. Localización del punto del Atlas más cercano a Playa Carrasco.

En el punto marítimo de estudio, los oleajes más frecuentes y energéticos son los que provienen del sector direccional 112,5°-157,5° (Figura 7). Las alturas de ola son pequeñas, siendo la altura de ola asociada al percentil 50% menor a 1 metro, y la altura de ola asociada al percentil 95% igual a 1,5 metros. El oleaje presenta una variabilidad estacional pequeña, con cambios en la mediana de la altura de ola menores de 50 centímetros entre los meses de verano y los meses de invierno.

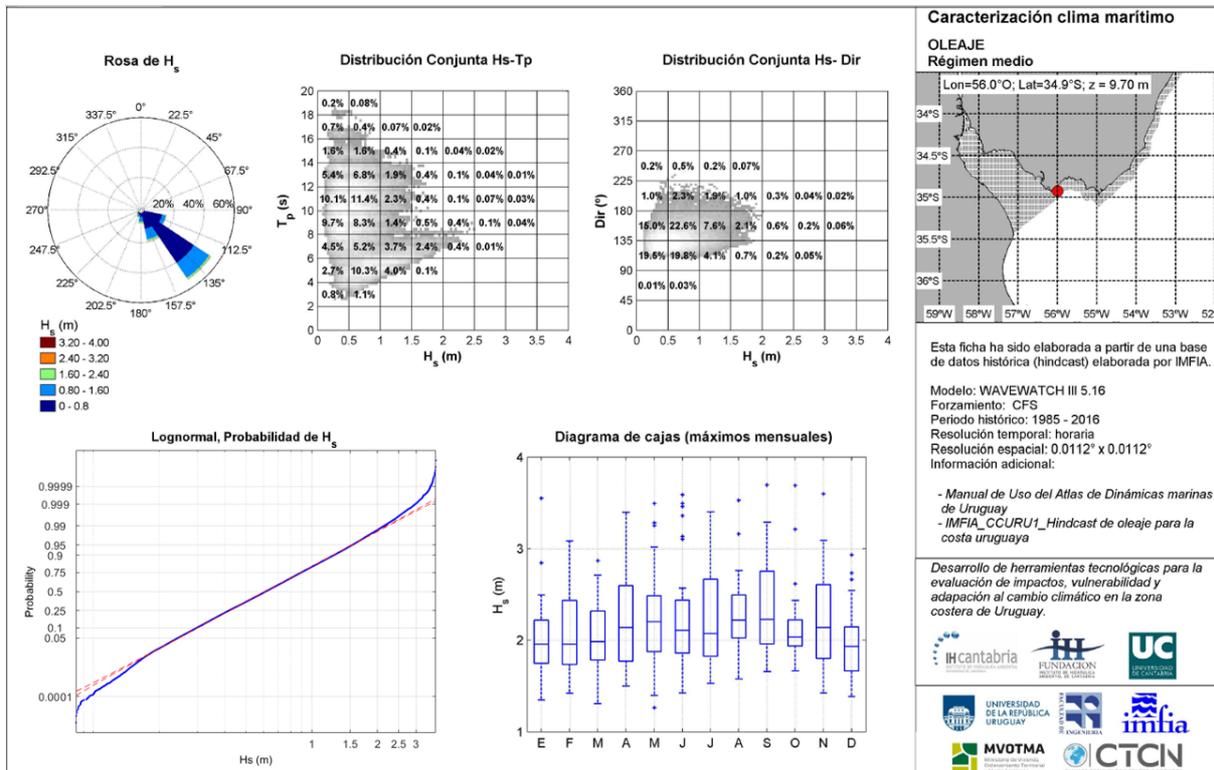


Figura 7. Caracterización del régimen medio de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

En la Figura 8 se muestra el ajuste del régimen extremal de altura de ola significativa. En la tabla ubicada en la parte inferior izquierda de la ficha se recoge la altura de ola significativa (y el intervalo de

confianza del 95%) asociada a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. La diferencia entre la altura de ola asociada a un periodo de retorno de 100 años y la asociada a un periodo de retorno de 10 años es de 20 centímetros.

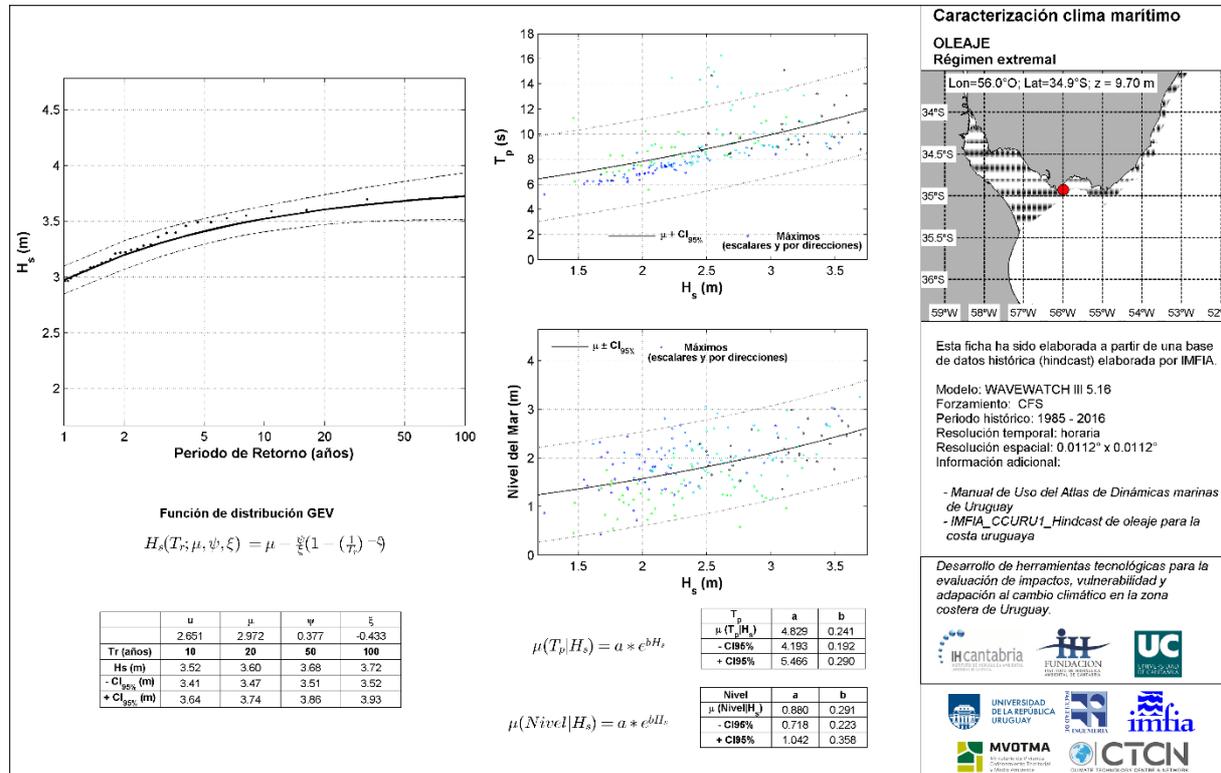


Figura 8. Caracterización del régimen extremal de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

En la tercera ficha (Figura 9) se caracterizan los regímenes medio y extremal del nivel del mar y la distribución direccional de las corrientes marinas. Cabe destacar de la rosa direccional de corrientes que las direcciones predominantes de las corrientes provienen de los sectores [225° - 270°] y [45° - 90°]. Las corrientes provenientes del sudoeste tienen una intensidad de hasta 0,32 m/s, con intensidades máximas de hasta 0,96 m/s, mientras que las corrientes del noreste tienen una intensidad de hasta 0,32 m/s. El patrón de corrientes en la zona está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea junto con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos (Fossati et al., 2014).

Se aprecia la misma variabilidad estacional que en el oleaje en el nivel del mar (cambios estacionales en la marea meteorológica), con cambios en el nivel de hasta 50 centímetros en los percentiles 50% y 75% entre los meses de enero y diciembre y los meses de junio, julio y agosto.

En la parte inferior de la ficha se muestra el ajuste de extremos del nivel del mar. La tabla recoge el nivel del mar asociado a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. Se observa que la diferencia entre nivel del mar asociado a un periodo de retorno de 100 años y el asociado a un periodo de retorno de 10 años es de 30 centímetros, 10 centímetros mayor que la diferencia entre las alturas de ola asociadas a los mismos periodos de retorno (20 centímetros).

Teniendo en cuenta que la contribución del oleaje en la sobreelevación de la lámina de agua es un porcentaje de la altura de ola, desde el punto de vista del impacto de inundación costera, donde se estudian eventos con cotas de inundación extremas, el nivel del mar en el punto climático de estudio debe ser considerado como la dinámica predominante. La cota de inundación (CI) es un indicador para estimar el nivel total del mar, y se calcula como la suma del *run-up*, las mareas y el aumento del nivel medio del mar, en el caso de estar calculando cotas de inundación futuras.

En este caso, un evento extremo de nivel del mar, considerando como tal la suma de marea meteorológica y marea astronómica, puede generar una sobreelevación de la lámina de agua mucho mayor que un evento extremo de oleaje.

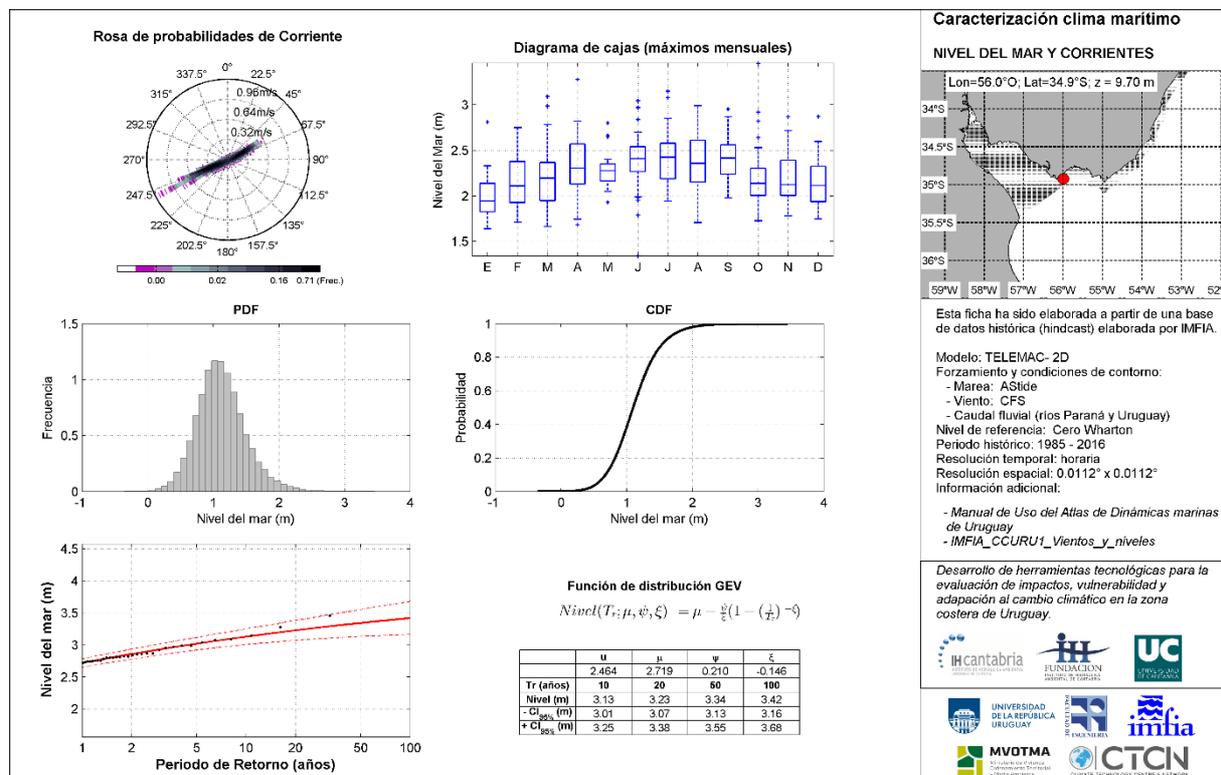


Figura 9. Caracterización del nivel del mar y corrientes en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

## 2.2 Dinámicas futuras

Por lo que respecta al estudio de los impactos de inundación y erosión costera, las conclusiones más importantes del estudio de las proyecciones de oleaje, residuo del nivel del mar y nivel medio del mar generadas dentro del marco del proyecto (IHCantabria, 2019b) se resumen en los siguientes puntos:

- Se esperan aumentos máximos del percentil 95% de la altura de ola significativa del 4%, una disminución máxima del periodo de pico del orden de 3%; un giro de la dirección media del oleaje hacia el E del orden de los 3-4°, y aumentos del residuo del nivel del mar menores al 1% en el Río de la Plata a fin de siglo XXI (2070-2099) para el escenario RCP8.5. La magnitud de los cambios de altura de ola significativa es del orden de 0,03-0,04 m para los incrementos y 0,04-0,05 m para las disminuciones. Los cambios positivos de periodo de pico son del orden de 0,05

s y los negativos del orden de 0,1 s. El giro antihorario del oleaje se espera entre 3-6°. Los cambios en el residuo del nivel del mar son del orden de 0,01-0,015 m.

- En cuanto al incremento del nivel medio del mar en aguas abiertas próximas a la desembocadura del Río de La Plata, la estimación media con su incertidumbre, definida por el percentil del 5% y del 95%, es de 0,26 [0,21 – 0,31] metros en 2050 para el RCP promedio, de 0,58 [0,48 – 0,67] en 2100 RCP4.5 y de 0,80 [0,66 – 0,93] metros en 2100 RCP8.5.

En términos generales, el incremento del nivel del mar intensificado con un aumento del oleaje y de la componente atmosférica del nivel del mar es susceptible de producir un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos de inundación. El cambio en la dirección de oleaje genera un cambio en el transporte de sedimentos, lo que puede conllevar un aumento de los procesos erosivos y un cambio en la orientación de las playas que puede traducirse en una pérdida de anchura de playa seca.

En este caso, y dado que en el resto de las variables los cambios son pequeños, solamente se han tenido en cuenta las proyecciones de aumento del nivel medio del mar en el modelado de los impactos de inundación y erosión en el futuro. Sin embargo, en los estudios que se vayan a realizar para la implementación de potenciales proyectos de adaptación, estos cambios en las dinámicas correspondientes al oleaje y marea meteorológica deberían ser considerados con detalle por su contribución a los criterios de diseño generalmente empleados.

### 3 RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

#### 3.1 Exposición

##### 3.1.1 Exposición socioeconómica

En el caso del impacto de inundación, la exposición se define a través de la caracterización espacial de la población y de los activos construidos (edificaciones) de las zonas potencialmente inundables existentes dentro del área de estudio. La metodología seguida para el estudio de ambos elementos socioeconómicos se recoge con detalle en el documento metodológico.

La Figura 10 muestra el mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m<sup>2</sup>. Esta caracterización imputa a cada parcela catastral los datos poblacionales de la zona censal en la que se encuentra. Así, una parcela censal con una densidad de población de 0,056 personas/m<sup>2</sup> que ocupa un área de 1.000 m<sup>2</sup>, representa a 56 personas residiendo en dicho polígono.

La Figura 11 muestra la caracterización de los activos construidos, mostrando su valor económico en USD por m<sup>2</sup> (basado en datos catastrales del año 2018) y con nivel de detalle de parcela catastral.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCO



Figura 10. Mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m<sup>2</sup>.

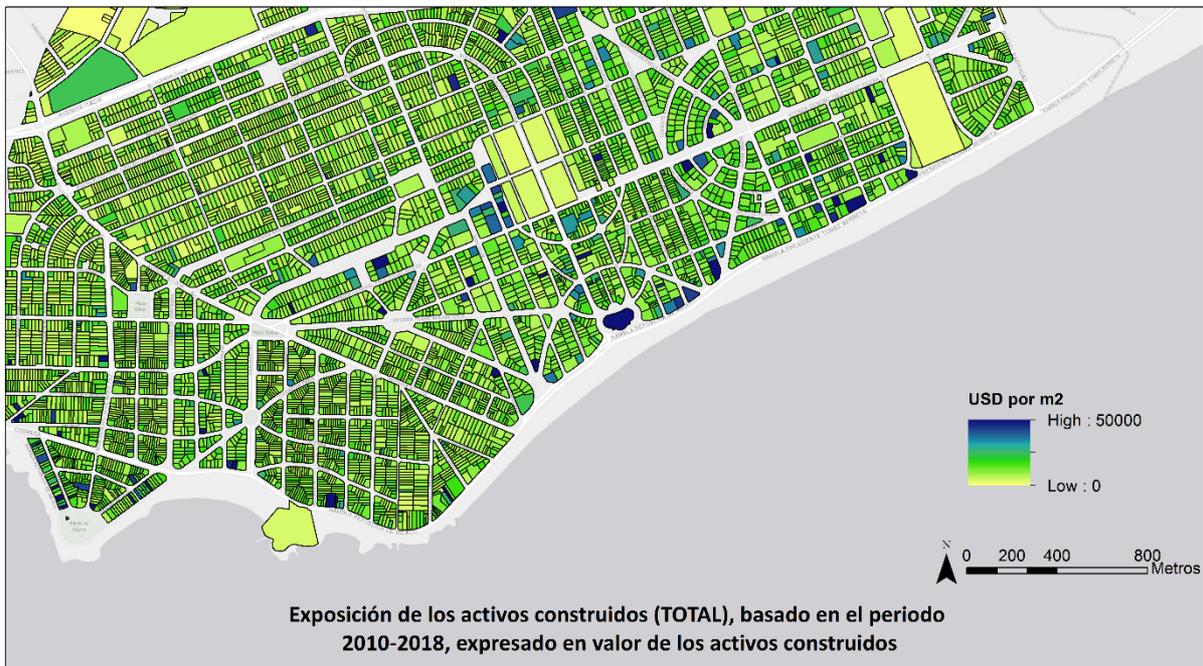


Figura 11. Mapa del valor de exposición del stock construido (total), basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de USD por m<sup>2</sup>.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCO

En la Figura 10 se puede observar que los edificios con mayor densidad de población son los edificios ubicados en la zona sudoeste (Avenida Bolivia), mientras que los edificios ubicados en la zona sudeste y cerca de la rambla son los que tienen menor densidad de población.

En la Figura 11 se observa que destacan por encima del resto de edificios de la zona de estudio el Hotel Sofitel y algunas de las edificaciones aledañas situadas en primera línea de playa, mientras que el resto de la zona presenta valores sensiblemente más reducidos (salvo algunas edificaciones en puntos concretos).

En la Figura 12 se identifican las calles y elementos más representativos de la zona de estudio, y en la Figura 13 se aprecia la tipología de edificación predominante.



Figura 12. Ubicación de los principales elementos de los barrios de Punta Gorda y Carrasco

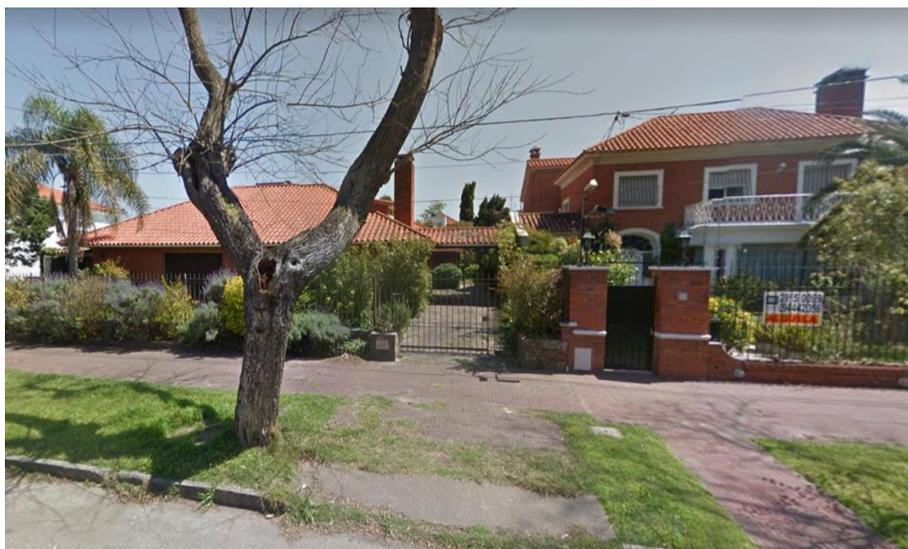


Figura 13. Edificación predominante en la zona de estudio de Playa Carrasco (Fuente: GoogleMaps).

### 3.1.2 Exposición física

El modelo de inundación utilizado crea una malla computacional basada en la topografía subyacente, para lo que se ha utilizado el Modelo Digital de Terreno (MDT) encargado por el MVOTMA y desarrollada por IDEUy.

En la Figura 14 se muestra el MDT de las zonas costeras de baja altitud adyacentes a Playa Carrasco. Como se puede observar, los barrios de Punta Gorda y Carrasco están construidos sobre un terreno de poca altitud, con cotas que varían entre 0 y 4 metros en la zona más cercana a la costa (terreno sombreado en verde en la Figura 14), y entre 4 y 8 metros en la zona más interior (terreno sombreado en naranja y marrón).

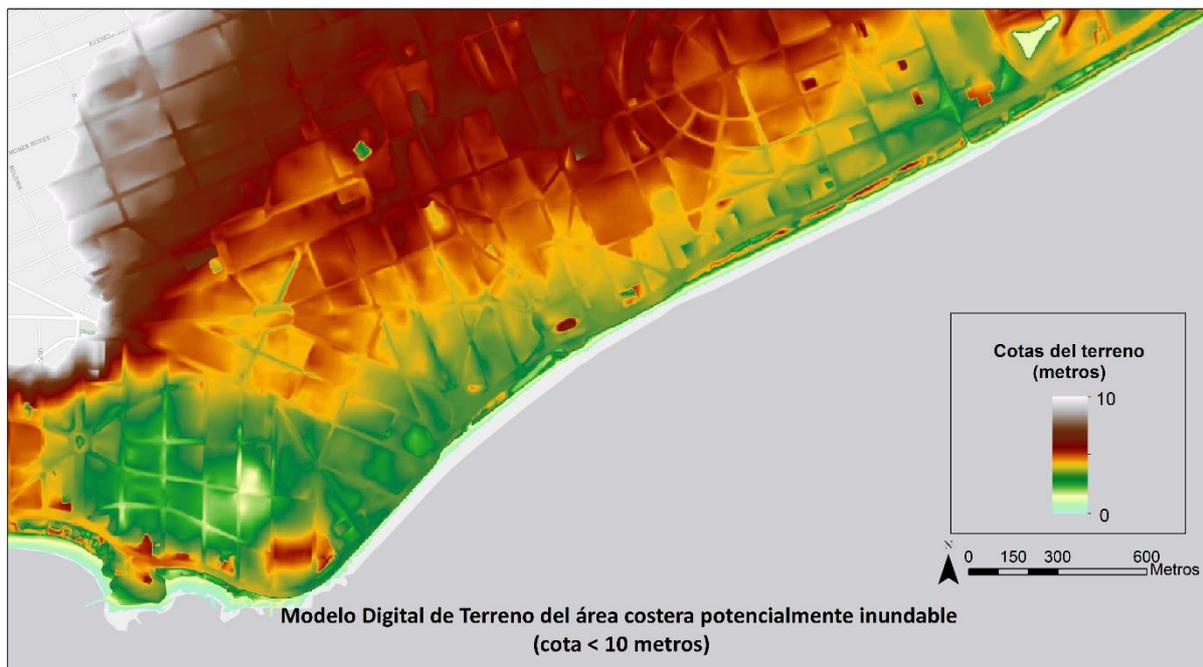


Figura 14. Modelo Digital de Terreno del área potencialmente inundable de la zona de estudio (Fuente: IDEUy).

## 3.2 Peligrosidad

Se ha modelado la inundación costera con un modelo hidrodinámico de procesos (Jamieson et al., 2012) sensible a la rugosidad del terreno que resuelve la inundación en tierra debida a condiciones hidrodinámicas costeras y continentales. El modelo se ha forzado con cotas de inundación extremas y se han obtenido los mapas de peligrosidad asociados. Estos mapas tienen una gran resolución espacial (4x4 metros), y representan la extensión y la profundidad de agua de la zona inundada.

### 3.2.1 Mapas de inundación

Los mapas generados muestran la inundación debido a una amenaza o evento extremo de cota de inundación. En los mapas que se muestran a continuación (Figura 15, Figura 16, Figura 17 y Figura 18) se pueden identificar las zonas susceptibles de inundación, en el presente y en el futuro, para distintos niveles de amenaza: probabilidad de ocurrencia alta (periodos de retorno  $T_r = 5$  y 10 años), media ( $T_r$

= 25 y 50 años), baja ( $Tr = 100$  años) o muy baja ( $Tr = 500$  años). La Tabla 1 recoge las áreas de la superficie inundada en la zona de estudio, para todos los escenarios considerados. Se muestra también la inundación asociada a condiciones medias de oleaje y marea.

En el **presente** (Figura 15), se puede observar que la zona sur de Punta Gorda y la zona sudoeste de Carrasco son zonas más susceptibles a la inundación que la zona sudeste de Carrasco, ya que se aprecia que el agua en el evento de 500 años se propaga fácilmente hacia el interior de la zona sudoeste y que, para este evento, la rambla es rebasada en varios puntos. En la zona este de la playa se puede ver que el cauce de un desagüe que pasa por debajo de la rambla y desemboca en la playa, cerca de la Escuela Naval, facilita la entrada de agua hacia el núcleo urbano. Para el evento con CI de periodo de retorno 100 años se aprecian tres pequeñas zonas potencialmente inundables: el extremo oeste de la playa, la zona oeste del Hotel Sofitel y el desagüe cercano a la Escuela Naval. Se observa que para una amenaza con probabilidad muy baja ( $Tr = 500$  años) de ocurrencia, la extensión de la zona inundable ( $221.664 \text{ m}^2$ ) duplica la superficie inundable asociada al evento de  $Tr = 100$  años ( $111.056 \text{ m}^2$ ). Esta inundación se concentra en el tramo de rambla y las calles que desembocan en ella entre la calle Dos de Abril y el Hotel Sofitel, y especialmente en la zona de la calle 6 de Abril que desemboca en la rambla, y la zona del desagüe cercano a la Escuela Naval.

En vista de los mapas de inundación, la rambla y la zona urbana adyacente a Playa Carrasco tienen inundación para amenazas con periodo de retorno inferior a 100 años, y la mitad de la zona costera de Punta Gorda y Carrasco tiene inundación para eventos extremos de periodo de retorno elevado ( $Tr \geq 500$  años).

En **2050** (Figura 16) y en ausencia de adaptación, se considera como zona inundable con probabilidad de ocurrencia media ( $Tr = 25$  y 50 años) un tramo de aproximadamente 300 metros de la calle 6 de Abril y varias manzanas adyacentes, el tramo de rambla entre el extremo este de la playa y la avenida Bolivia, parte de rambla a la altura de la calle Divina Comedia, además de una pequeña inundación asociada al desagüe de la Escuela Naval. Las amenazas con probabilidad baja y muy baja de ocurrencia provocan la inundación total de la rambla desde el extremo oeste de la playa hasta el hotel, y la inundación parcial de la rambla en varios tramos de la zona este de la playa (del hotel a la escuela). En 2050, la superficie inundable asociada al evento  $Tr = 50$  años es superior a la superficie inundable asociada al evento  $Tr = 100$  años en el presente. Asimismo, la superficie inundable asociada al  $Tr = 500$  años en 2050 ( $442.672 \text{ m}^2$ ) duplica la extensión producida en el presente por el mismo evento ( $221.664 \text{ m}^2$ ).

Por tanto, para el horizonte 2050 se observan dos cuestiones fundamentales. Por un lado, las superficies inundables que en el presente se producen para altos periodos de retorno, se producirán en 2050 con mayor frecuencia, es decir para periodos de retorno más bajos. Por otro lado, para un mismo periodo de retorno, los eventos extremos producirán mucho mayor superficie de inundación en 2050 que en el presente.

En **2100** se puede observar que, en los dos posibles escenarios de emisión contemplados, la zona de Punta Gorda situada entre la rambla y la avenida Bolivia y la zona de Carrasco situada entre la rambla y la avenida Pedro Blanes; y la zona este de Carrasco situada entre la rambla y la avenida General

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO

Rivera, son zonas con riesgo potencial de inundación alto, ya que se consideran como zonas inundables para amenazas con probabilidad media de ocurrencia ( $Tr = 25$  años) en el RCP4.5 (Figura 17), y como zonas inundables para amenazas con probabilidad alta de ocurrencia ( $Tr = 10$  años) en el RCP8.5 (Figura 18). En el RCP8.5 la zona sur de Punta Gorda también tiene zonas inundables con probabilidad de ocurrencia media y alta. En términos de extensión de la superficie inundada, en 2100 y para el RCP4.5 el evento con  $Tr = 25$  años ( $245.504 \text{ m}^2$ ) tiene una superficie mayor que el evento  $Tr = 500$  años en el presente ( $221.664 \text{ m}^2$ ). En 2100 y para el RCP8.5 el evento con superficie inundable más cercana al evento  $Tr = 500$  años en el presente es el evento de  $Tr = 10$  años ( $272.400 \text{ m}^2$ ).

Se puede concluir que, además de la adaptación, la senda de mitigación jugará un papel importante sobre la superficie inundable en esta zona a partir de mitad de siglo. Esto es especialmente reseñable en 2100 año en que, para los casos considerados, el periodo de retorno de 500 años en el presente se divide por un factor de 20 para el RCP4.5 y de 50 para el RCP8.5.

Tabla 1. Extensión de la superficie inundada en la zona de estudio, para cada escenario climático de inundación.

| Área (m <sup>2</sup> ) | Presente | 2050    |         |         | 2100 RCP4.5 |         |         | 2100 RCP8.5 |           |           |
|------------------------|----------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------------|-----------|-----------|
|                        |          | P5%     | Media   | P95%    | P5%         | Media   | P95%    | P5%         | Media     | P95%      |
| <b>Cond. medias</b>    | 5.072    | 13.568  | 15.712  | 18.096  | 25.296      | 29.472  | 33.280  | 32.832      | 38.176    | 43.008    |
| <b>Tr 5</b>            | 76.080   | 85.200  | 86.928  | 88.288  | 95.936      | 109.360 | 139.568 | 135.600     | 174.544   | 251.728   |
| <b>Tr 10</b>           | 83.008   | 89.712  | 91.056  | 93.808  | 121.600     | 153.952 | 189.872 | 183.040     | 272.400   | 384.448   |
| <b>Tr 25</b>           | 88.608   | 102.768 | 112.256 | 128.144 | 186.736     | 245.504 | 329.296 | 320.160     | 430.000   | 531.856   |
| <b>Tr 50</b>           | 93.120   | 139.216 | 152.624 | 167.568 | 277.968     | 361.984 | 441.120 | 433.696     | 536.112   | 680.960   |
| <b>Tr 100</b>          | 111.056  | 181.088 | 209.248 | 239.552 | 389.296     | 464.352 | 547.392 | 535.936     | 680.624   | 832.256   |
| <b>Tr 500</b>          | 221.664  | 405.888 | 442.672 | 479.248 | 655.872     | 763.264 | 877.920 | 863.312     | 1.029.792 | 1.193.120 |

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO

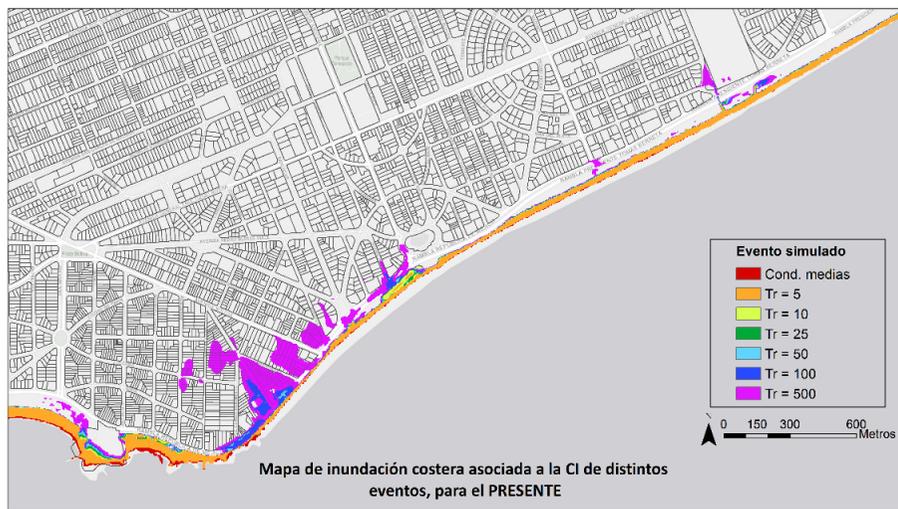


Figura 15. Inundación en el presente para distintos eventos

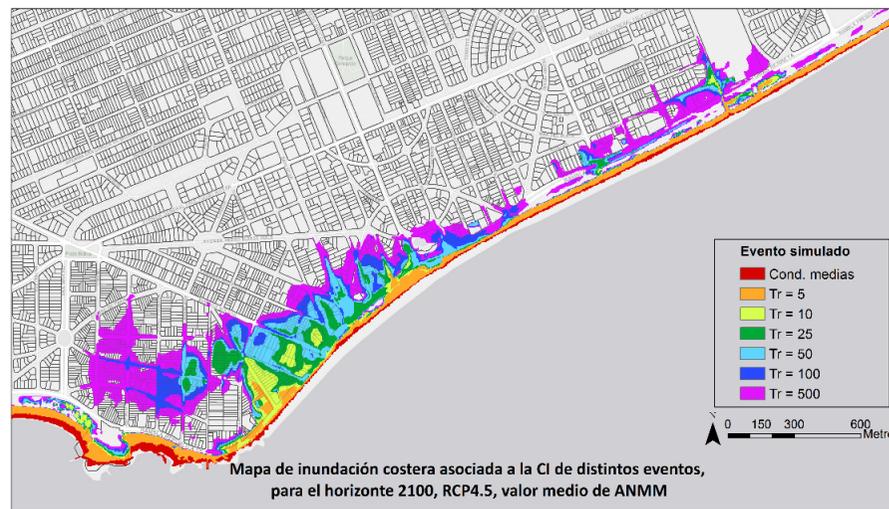


Figura 17. Inundación en 2100 (RCP4.5) para distintos eventos

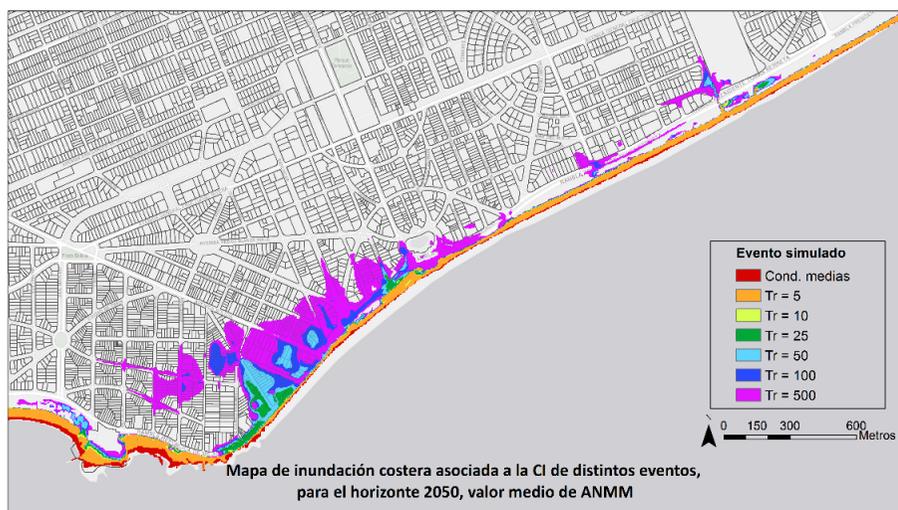


Figura 16. Inundación en 2050 para distintos eventos

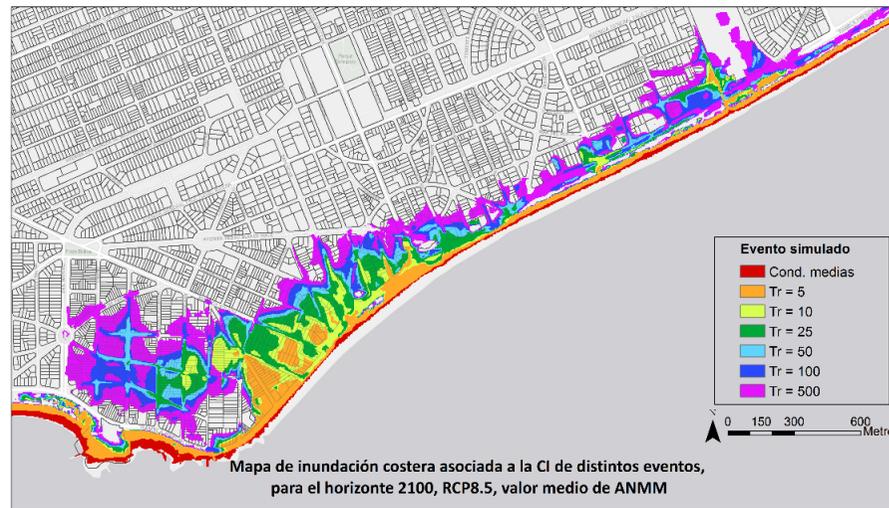


Figura 18. Inundación en 2100 (RCP8.5) para distintos eventos

La consideración de la incertidumbre en el aumento del nivel medio del mar en el estudio de inundación costera permite acotar la extensión y la cota máxima de agua de la superficie inundada. En los mapas siguientes se muestra la superposición de la inundación asociada a un evento extremo para cada uno de los valores considerados de la distribución de aumento de nivel medio del mar, en 2050 (Figura 19) y 2100 para el RCP8.5 (Figura 20).

En el mapa de inundación en 2050 (Figura 19), donde el rango de ANMM es más reducido, las diferencias entre la inundación producida con el ANMM medio y el percentil 5% y 95% son de 20.000 m<sup>2</sup> y 30.000 m<sup>2</sup>, respectivamente. Por otro lado, en el mapa de inundación en 2100 (Figura 20) se puede apreciar la mayor extensión de inundación en Punta Gorda. En 2100, la diferencia de ANMM entre los tres valores considerados es de aproximadamente 14 centímetros, y la diferencia en la superficie inundada del valor medio y los percentiles es de 144.000 m<sup>2</sup> y 150.000 m<sup>2</sup>, respectivamente. La Tabla 2 recoge las diferencias entre las diferentes simulaciones realizadas.

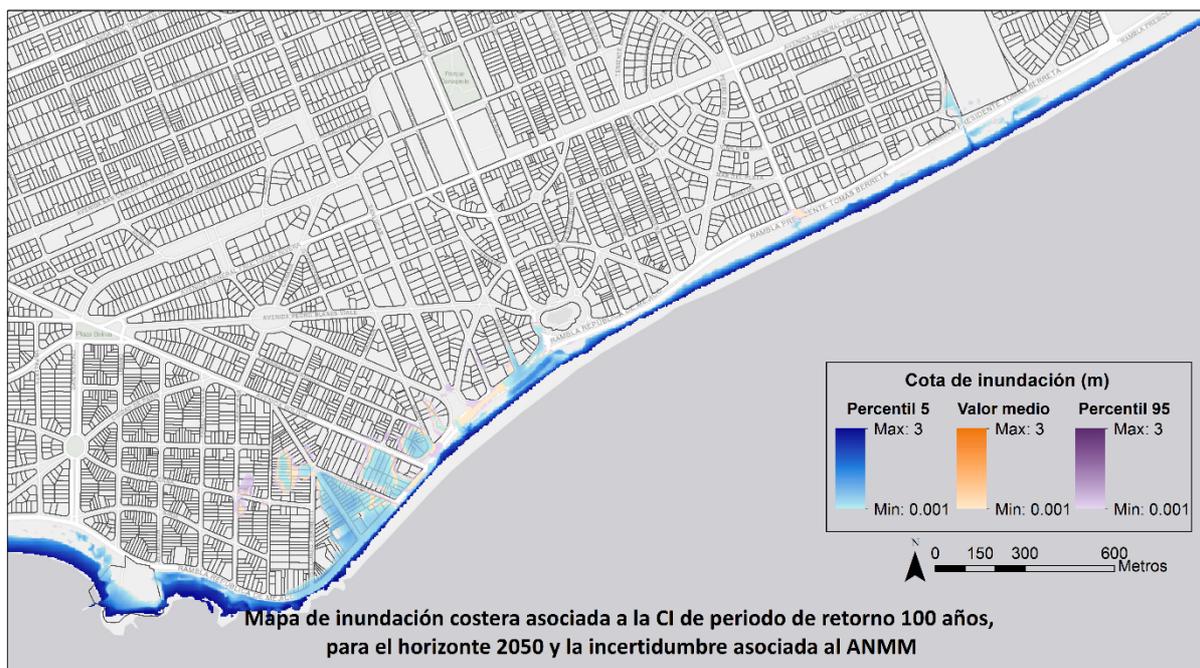


Figura 19. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2050.

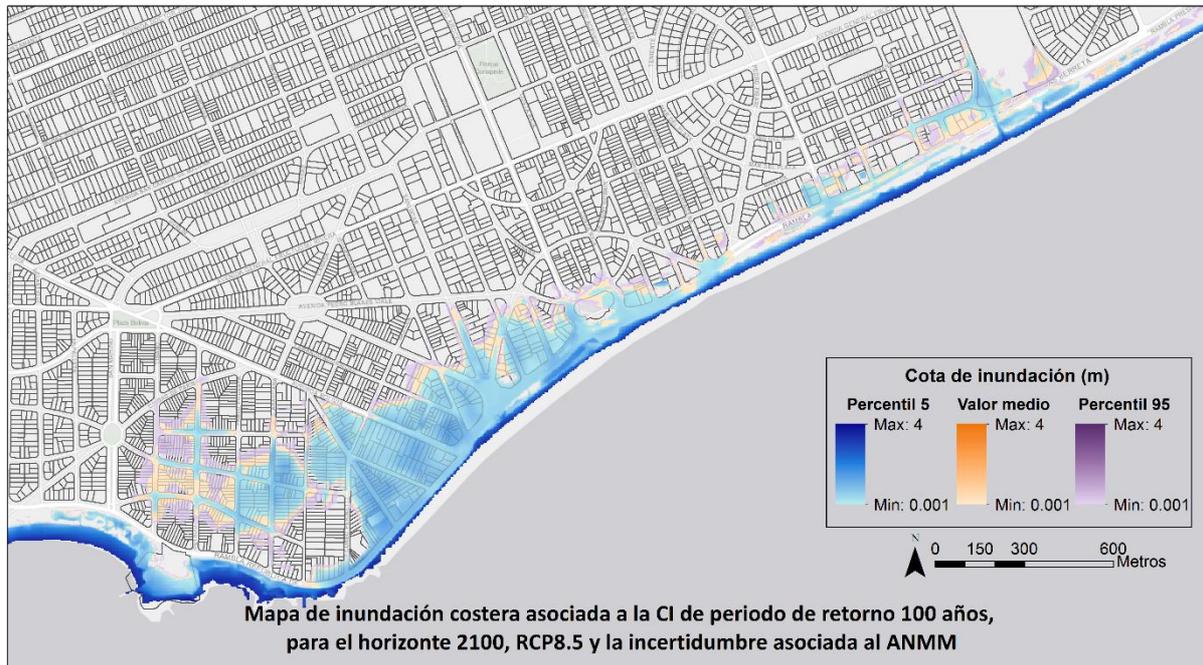


Figura 20. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2100 (RCP8.5).

Tabla 2. Cuantificación de la incertidumbre debida al ANMM en la inundación costera.

|  | 2050    |         |         | 2100 RCP8.5 |         |         |
|--|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|
|  | P5%     | Media   | P95%    | P5%         | Media   | P95%    |
| <b>ANMM (m)</b>                            | 0,21    | 0,26    | 0,31    | 0,66        | 0,80    | 0,93    |
| <b>Superficie inundada (m<sup>2</sup>)</b> | 181.088 | 209.248 | 239.552 | 535.936     | 680.624 | 832.256 |
| <b>Cota máx (m)</b>                        | 3,16    | 3,21    | 3,25    | 3,60        | 3,73    | 3,86    |

### 3.3 Riesgo

El riesgo de inundación se obtiene como la integración de la información de peligrosidad con la exposición y la vulnerabilidad. En este apartado se muestran los resultados cuantitativos del daño sobre la población y los activos construidos de manera numérica en tablas e histogramas para la zona de estudio.

#### 3.3.1 Población afectada por inundación costera

En la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan las consecuencias sobre la población, tanto para el umbral de afección (que puede considerarse como un equivalente a la función de daño) de 0,30 metros como para el de 0,01 metros. Obsérvese que, en el segundo caso, el umbral de afección es tan pequeño que

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO

el resultado de riesgo obtenido sería prácticamente equivalente a lo que en este estudio se ha llamado exposición.

En las tablas se recoge el número de personas que resultarían afectadas para cada periodo de retorno en cada uno de los escenarios analizados. Es importante señalar que para este análisis se ha utilizado la distribución de población correspondiente al presente. Proyecciones de población futuras conducirían a resultados diferentes.

Tabla 3. Consecuencias sobre la población (umbral de 0,30m), expresado en número de personas afectadas. La peligrosidad varía entre el presente y diferentes escenarios. La población sobre la que se proyecta el riesgo es la presente.

|                      | Probabilidad       | 0,2  | 0,1   | 0,04  | 0,02  | 0,01   | 0,002  |     |
|----------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-----|
| Umbral 0,30m         | Periodo de retorno | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 | TR 100 | TR 500 | DAE |
| <b>PRESENTE</b>      | <b>Valor medio</b> | 0    | 0     | 0     | 0     | 2      | 53     | 0   |
| <b>2050</b>          | Percent. 5%        | 0    | 0     | 0     | 10    | 32     | 126    | 1   |
|                      | <b>Valor medio</b> | 0    | 0     | 2     | 15    | 48     | 153    | 1   |
|                      | Percent. 95%       | 0    | 0     | 6     | 25    | 58     | 189    | 2   |
| <b>2100 (RCP4.5)</b> | Percent. 5%        | 0    | 6     | 35    | 69    | 119    | 313    | 5   |
|                      | <b>Valor medio</b> | 1    | 14    | 60    | 103   | 176    | 383    | 8   |
|                      | Percent. 95%       | 8    | 36    | 88    | 151   | 251    | 485    | 14  |
| <b>2100 (RCP8.5)</b> | Percent. 5%        | 7    | 33    | 84    | 145   | 243    | 472    | 13  |
|                      | <b>Valor medio</b> | 27   | 66    | 143   | 244   | 327    | 669    | 24  |
|                      | Percent. 95%       | 61   | 113   | 240   | 326   | 435    | 870    | 40  |

Tabla 4. Consecuencias sobre la población (umbral de 0,01m), expresado en número de personas afectadas. La peligrosidad varía entre el presente y diferentes escenarios. La población sobre la que se proyecta el riesgo es la presente.

|                      | Probabilidad       | 0,2  | 0,1   | 0,04  | 0,02  | 0,01   | 0,002  |    |
|----------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|----|
| Umbral 0,01m         | Periodo de retorno | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 | TR 100 | TR 500 | DA |
| <b>PRESENTE</b>      | <b>Valor medio</b> | 0    | 0     | 0     | 1     | 14     | 127    | 1  |
| <b>2050</b>          | Percent. 5%        | 0    | 0     | 7     | 42    | 84     | 274    | 3  |
|                      | <b>Valor medio</b> | 0    | 0     | 15    | 55    | 110    | 303    | 4  |
|                      | Percent. 95%       | 0    | 1     | 31    | 70    | 136    | 331    | 5  |
| <b>2100 (RCP4.5)</b> | Percent. 5%        | 2    | 23    | 86    | 163   | 256    | 512    | 12 |
|                      | <b>Valor medio</b> | 12   | 56    | 138   | 230   | 318    | 654    | 21 |
|                      | Percent. 95%       | 42   | 86    | 201   | 298   | 383    | 794    | 32 |
| <b>2100 (RCP8.5)</b> | Percent. 5%        | 37   | 79    | 193   | 292   | 371    | 779    | 31 |
|                      | <b>Valor medio</b> | 72   | 156   | 288   | 370   | 529    | 972    | 49 |
|                      | Percent. 95%       | 140  | 247   | 366   | 524   | 728    | 1.170  | 74 |

Se observa cómo en el presente, tan sólo los eventos más extremos afectan a la población en esta zona, y de una manera limitada, pues tan sólo 14 personas se ven afectadas por una inundación de menos de 0,30 metros de altura de agua para eventos de periodo de retorno de 100 años. Este número sí que aumenta hasta más de 125 personas si consideramos el evento de periodo de retorno 500, siendo más de 50 las que experimentan una inundación de más de 0,30 metros de altura de agua. Esta zona donde la población es mayor corresponde con la zona más occidental del área de estudio (Avenida Bolivia y calle 6 de Abril), precisamente la zona en la que la altura de inundación presenta sus mayores valores, y que coincide con una de las zonas más expuestas de la zona de estudio al no contar con zona de dunas tras la playa.

A continuación, se representan las figuras (Figura 21) que recogen el riesgo expresado como el número de personas afectadas expresado en términos de daño anual esperado, para los dos umbrales considerados en el estudio.

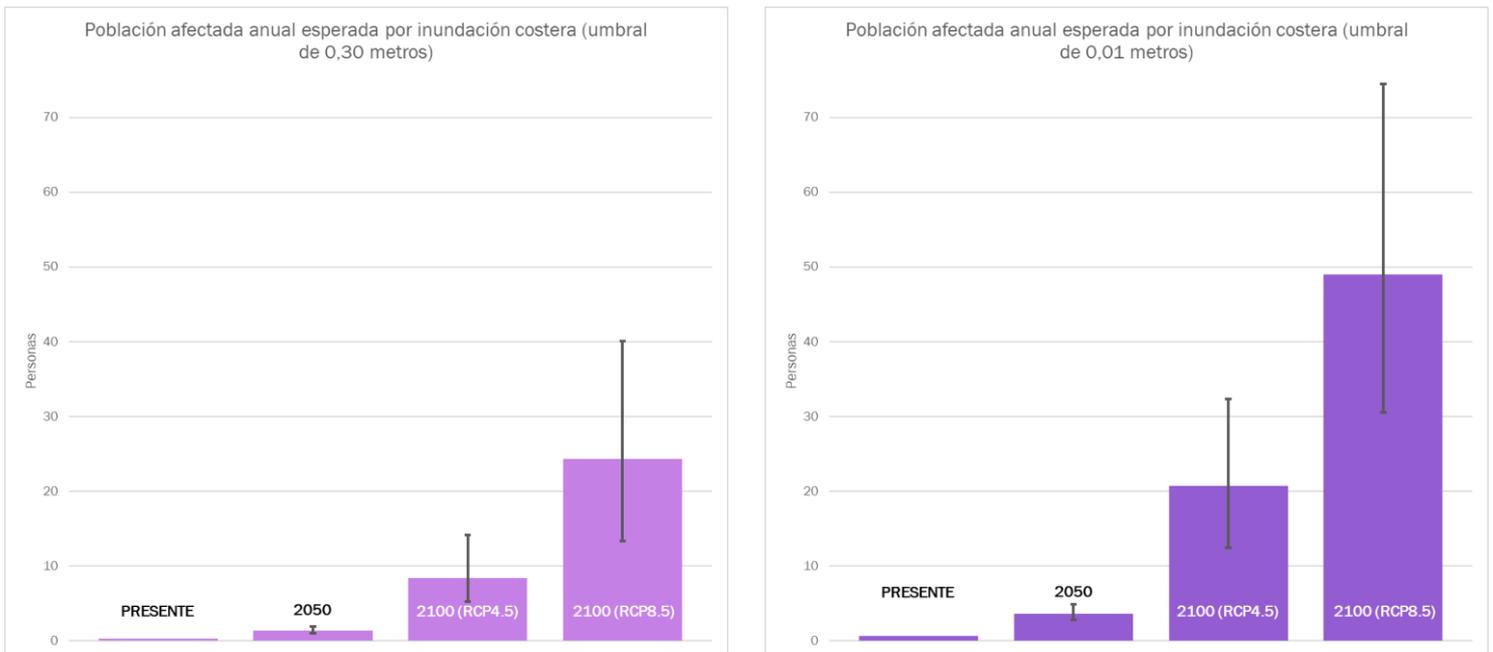


Figura 21. Riesgo de inundación sobre la población, expresado como población anual esperada en número de personas afectadas. A la izquierda, personas afectadas con más de 30 centímetros de altura de agua. A la derecha, personas afectadas con más de 1 centímetro de altura de agua.

Tanto de la observación de las figuras como de las tablas anteriores se comprueba fácilmente como el nivel de riesgo de la población en la zona de estudio aumentará sustancialmente en todos los escenarios futuros, siendo mucho más preocupante la situación a final de siglo. Así, el riesgo pasará desde ser prácticamente inexistente en el presente, hasta una afección esperada de entre 25 y 50 personas a final de siglo para los escenarios más pesimistas. Haciendo referencia a la comparativa entre periodos de retorno, se prevén afecciones sobre la población de hasta 72 personas para periodos de retorno de 5 años, cuando en la actualidad no hay afección hasta periodos de retorno de 100 años.

Si bien toda la población en la franja más cercana a la playa se vería afectada, la mayor afección sucede, como se comentaba antes, en la zona más occidental, desde el entorno del Hotel Sofitel Montevideo, hacia las plazas Thays y Bolivia, pudiendo llegar en los escenarios más pesimistas y mayores periodos de retorno hasta la plaza República de Ecuador, zona por otro lado con una ligera mayor densidad de población.

No obstante lo anterior, estos resultados precisan ser matizados. En primer lugar, la población de base utilizada ha sido la presente. Evidentemente, un incremento de la población en la zona incrementará el riesgo para cualquiera de los escenarios de peligrosidad considerados. Asimismo, la base de datos de población actual no tiene en cuenta la estacionalidad en la distribución de la población por lo que es altamente probable que en esta zona el riesgo aumente por el incremento de población en la época de vacaciones. Finalmente, es también necesario mencionar que los órdenes de exposición de la población expuesta ante los escenarios de peligrosidad considerados parecen evidenciar que las consecuencias negativas podrán ser abordadas a través de la adaptación.

### 3.3.2 Daños sobre los activos construidos debido a inundación costera

En la Tabla 5 se presentan las consecuencias sobre los activos construidos. Se recoge el daño sobre las edificaciones expresado en USD para cada periodo de retorno en cada uno de los escenarios analizados.

Tabla 5. Consecuencias sobre los activos construidos, expresado en USD dañados (estimación en base a datos catastrales).

|                      | Probabilidad       | 0,2       | 0,1        | 0,04       | 0,02       | 0,01       | 0,002      |           |
|----------------------|--------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
|                      | Periodo de retorno | TR 5      | TR 10      | TR 25      | TR 50      | TR 100     | TR 500     | DAE       |
| <b>PRESENTE</b>      | <b>Valor medio</b> | 0         | 0          | 0          | 7.380      | 407.753    | 5.350.864  | 25.184    |
| <b>2050</b>          | Percent. 5%        | 0         | 0          | 129.638    | 1.303.354  | 3.356.914  | 14.719.091 | 113.824   |
|                      | <b>Valor medio</b> | 0         | 0          | 430.576    | 1.919.296  | 4.606.743  | 17.494.937 | 157.454   |
|                      | Percent. 95%       | 0         | 7.853      | 877.668    | 2.750.686  | 6.118.381  | 20.505.762 | 214.084   |
| <b>2100 (RCP4.5)</b> | Percent. 5%        | 21.621    | 717.617    | 3.591.368  | 7.713.782  | 14.031.947 | 33.709.923 | 581.141   |
|                      | <b>Valor medio</b> | 306.944   | 1.929.642  | 6.296.931  | 12.090.351 | 19.617.608 | 43.630.263 | 984.725   |
|                      | Percent. 95%       | 1.216.620 | 3.698.339  | 10.085.026 | 17.596.096 | 26.125.477 | 54.850.196 | 1.600.233 |
| <b>2100 (RCP8.5)</b> | Percent. 5%        | 1.070.720 | 3.450.356  | 9.579.400  | 16.966.923 | 25.337.493 | 53.495.339 | 1.516.335 |
|                      | <b>Valor medio</b> | 2.992.923 | 7.356.290  | 16.817.787 | 25.562.105 | 36.497.332 | 71.774.867 | 2.709.160 |
|                      | Percent. 95%       | 6.484.539 | 13.525.328 | 25.398.359 | 36.747.346 | 51.019.993 | 93.628.868 | 4.455.547 |

De forma similar a como ocurría con la población, se comprueba que en el presente los daños por eventos de periodo de retorno bajo no causan daños o éstos son despreciables, y que es para periodos de retorno por encima de los 100 años es cuando se empiezan a sufrir daños relevantes, por encima

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO

de los 500.000 USD y hasta los 5 millones de USD para eventos extremos de 500 años de periodo de retorno.

La siguiente figura (Figura 22) recoge el riesgo expresado en daño anual esperado, tanto para el valor del conjunto de los activos construidos, como segregado por categorías de stock.

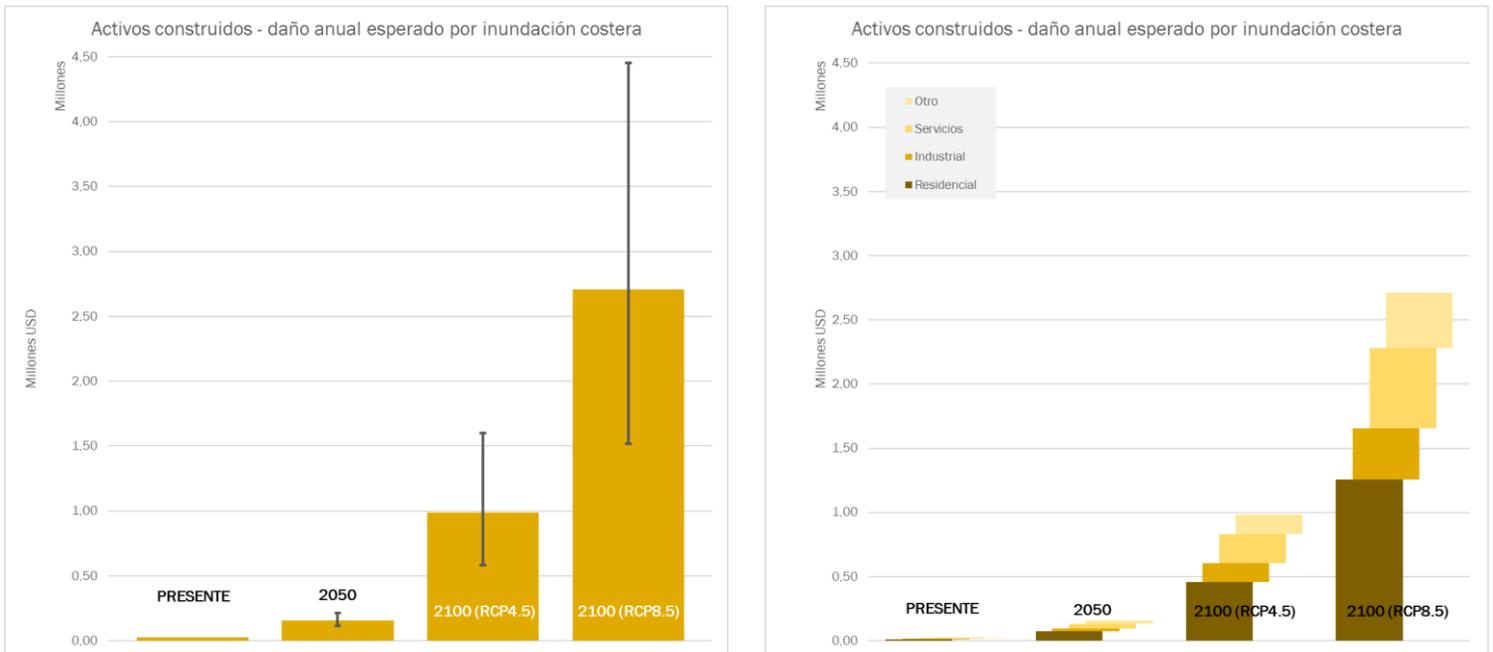


Figura 22. Riesgo de inundación sobre los activos construidos, expresado como daño anual esperado en millones de USD (estimación en base a datos catastrales). A la izquierda, el total de daño esperado. A la derecha, la distinción en categorías de activos construidos (residencial, industrial, servicios y otros).

Se observa que, en los escenarios de final de siglo, los daños sobre los activos construidos se verán incrementados considerablemente. Esto se debe, principalmente, a que será en esos escenarios futuros en los que los edificios con mayor valor (Hotel Sofitel y el área oriental contigua) cuando se vean afectados.

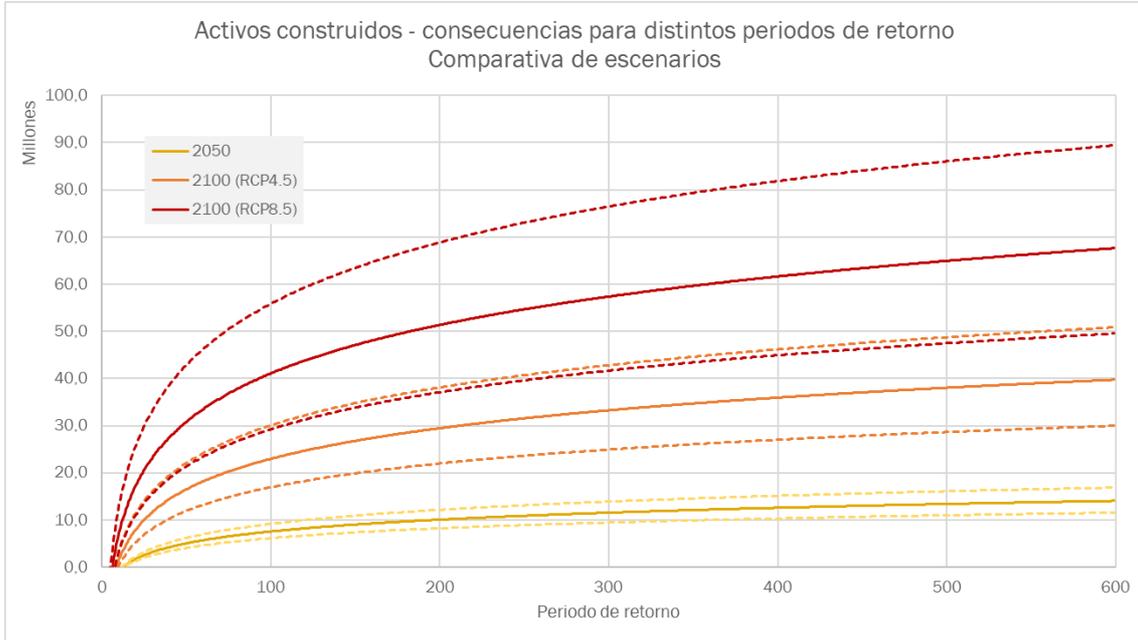


Figura 23. Consecuencias sobre los activos construidos para distintos periodos de retorno para los horizontes 2050 y 2100 (estimación en base a datos catastrales). Las líneas continuas representan el valor medio, mientras que las líneas discontinuas representan los percentiles del 5% y del 95%.

Es en estos mismos escenarios representativos de final de siglo cuando aparecerán daños sobre los activos con eventos de periodos de retorno muy bajos (5 años incluso), situación que ni en el presente ni en el escenario de mitad de siglo se reproduce.

## 4 RIESGO DE EROSIÓN COSTERA

### 4.1 Exposición

#### 4.1.1 Exposición socioeconómica

En el análisis de la erosión costera, se han considerado las playas como los activos expuestos. El valor de exposición de una playa se puede definir a través de criterios ambientales y/o sociales, considerando factores que tengan en cuenta las características, calidad y servicios de cada playa. En concreto en este estudio se ha caracterizado el valor de exposición de las playas por medio de la cuantificación del valor de dos de los servicios principales proporcionados: el valor de protección frente a inundación (de regulación) y el valor recreativo (cultural).

#### Valor de protección

El valor de protección frente a inundación proporcionado por la playa se ha asimilado a la suma de todos los activos existentes en un polígono delimitado por el borde de la playa, una paralela a ésta situada a 300 metros de la anterior, y las perpendiculares a la línea de costa en los extremos de la playa. El planteamiento propuesto plantea que, si no existiese la playa, todos esos activos situados en la franja de 300 metros se verían de una u otra forma afectados, en un porcentaje (factor de daño) que viene determinado por los factores de la Tabla 14.

Tabla 6. Factor de corrección aplicado según la distancia a la playa

| Distancia a la playa (metros) | Factor de daño |
|-------------------------------|----------------|
| 0 – 100                       | 0,40           |
| 100 – 200                     | 0,15           |
| 200 – 300                     | 0,05           |

El valor de los activos construidos en el entorno de 100 metros alrededor de la playa tiene un valor de 2.810 millones de USD, en la franja entre los 100 y 200 metros de 3.162 millones de USD, y en la zona comprendida entre los 200 y 300 metros cercanos a la playa de 2.515 millones de USD. Estos valores son de los más elevados que se observan en el litoral de la costa de Uruguay.

Considerando el valor de estas edificaciones y los factores de daño descritos anteriormente, se ha estimado un valor total de protección de Playa Carrasco igual a 48.986.448 USD (1.059.015 USD por hectárea). Este valor absoluto representa el cuarto valor de protección más elevado de las playas de Uruguay, y más de diez veces mayor a la media del país, que se sitúa en 3,9 millones de USD. En términos de valor por hectárea, sin embargo, el valor de la playa se aproxima bastante a la media del país, aunque por encima de la misma (882.800 USD por hectárea).

Es necesario añadir que esta estimación del valor de protección es en todo caso una cota inferior. En el caso concreto de Playa Carrasco, la playa protege por ejemplo una infraestructura de transporte importante (como es la Rambla República de México – Tomás Berreta) que sería la primera que sufriría

importantes daños en caso de pérdida de la playa. La cuantificación de esta infraestructura no se ha realizado (no sólo hablaríamos de valor constructivo, sino de todo el servicio de transporte y movilidad), pero sin duda incrementaría el valor de protección proporcionado por la playa.

### Valor recreativo

El valor recreativo proporcionado por las playas viene se estima en base a la valoración subjetiva que realizan sus usuarios del tiempo de ocio pasado en ellas. Esta valoración viene a su vez determinada por el uso que cada uno de los individuos realiza de la playa. Para realizar esta valoración se tiene en consideración la población cercana a la playa, el turismo receptivo en la zona (visitantes, estadía media, gasto, turismo interno), las características de los alojamientos cercanos y las características propias de la playa (tamaño, calidad).

La aplicación de este procedimiento nos permite obtener un valor representativo y único para cada playa, resultando para el caso concreto de Playa Carrasco que el valor recreativo de la misma es de 109.982.590 USD (2.377.611 USD por hectárea). Este valor absoluto se sitúa muy por encima de la media del país (18,5 millones de USD) y el valor por hectárea dobla a la media de toda la costa uruguaya (situada en 1 millón de USD por hectárea).

En términos generales, se puede concluir que el principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, doblando el valor del servicio de protección. En el agregado (suma de valor de protección y recreativo), Playa Carrasco es la cuarta playa más valiosa de la costa en términos absolutos, y la trigésima en términos de valor por hectárea.

### 4.1.2 Exposición física

Para el estudio de la erosión costera en playa Carrasco, se considera tanto el transporte longitudinal como el transversal. El transporte longitudinal se evalúa en las celdas longitudinales mediante un modelo one-line (Figura 24), mientras que el transporte transversal se evalúa en los transectos que delimitan las celdas litorales mediante un modelo de Miller y Dean al que se incluye la contribución del ANMM.



Figura 24. Conjunto de celdas litorales donde se ha caracterizado el transporte longitudinal y transversal de sedimento en Playa Carrasco.

Para caracterizar los parámetros morfológicos de las celdas litorales se han utilizado los perfiles topobatimétricos y las curvas granulométricas de Playa Carrasco incluidos en el Informe Técnico 14 correspondiente a la campaña de topografía de costas realizada en noviembre 2018 (Gas Sayago S.A., diciembre 2018). Se ha definido un ancho potencialmente erosionable de playa igual al ancho de playa seca más la mitad del ancho de dunas en el caso de que no existan construcciones antrópicas que delimiten el área potencialmente erosionable. Los rangos de los parámetros morfológicos utilizados en la caracterización física de la playa son los siguientes:

- Orientación respecto al norte: [133° - 156°]
- Pendiente de la zona de rompientes: [0,0136 – 0,01944]
- Tamaño de sedimento (D50): 0,2 milímetros
- Ancho de playa seca: [0 – 60] metros
- Ancho de campo de dunas: [0 - 163] metros

## 4.2 Peligrosidad

En este estudio, la evolución de la línea de costa en Playa Carrasco se ha simulado con un modelo de una línea basado en transectos que permite predecir los cambios a corto y largo plazo producidos por el oleaje, la marea, las corrientes marinas y el ANMM. El modelo acopla un modelo de equilibrio para resolver el transporte transversal y un modelo de una línea para resolver el gradiente de transporte longitudinal.

La playa objeto de estudio es rectilínea y su estabilidad está condicionada por la continuidad del transporte de sedimento en la unidad fisiográfica. El modelado riguroso de la zona objeto de estudio requeriría el uso de modelos numéricos de área 2DH que consten de un módulo hidrodinámico acoplado a un módulo de transporte y de evolución de la batimetría. Se deberían incluir en el modelado la interacción ola-corriente, los aportes fluviales y condiciones de contorno realistas. Este tipo de modelos requieren datos de observaciones para fijar las condiciones de contorno y para calibrar los diferentes parámetros libres de las formulaciones. Por otro lado, el coste de cómputo es elevado, lo que unido a que el modelado de la recuperación de la playa tras temporales está aún en desarrollo, hace inviable la aplicación de este tipo de modelos en la escala temporal del cambio climático. Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo utilizado representa el mejor compromiso entre la escala espacio-temporal del estudio, los procesos considerados y el tiempo de cálculo.

En la Figura 25 se muestra la evolución del transporte longitudinal anual en un punto de Playa Carrasco. Como se puede observar, el transporte tiene sentido oeste – este, como indicaba la flecha de la desembocadura del arroyo Carrasco, y un volumen anual medio de aproximadamente 19.000 m<sup>3</sup>/año. Se aprecia una variabilidad temporal, que se relaciona con la variabilidad temporal de la altura de ola (Figura 26). El mayor transporte longitudinal se produce en el año 2016, donde se aprecia es cuando se tienen alturas de ola elevadas durante más tiempo.

Este transporte se ha estimado utilizando una formulación de transporte potencial (Van Rijn, 2014), que se ha calibrado en base al volumen de sedimento observado en las imágenes de satélite de 2019 y 2001.

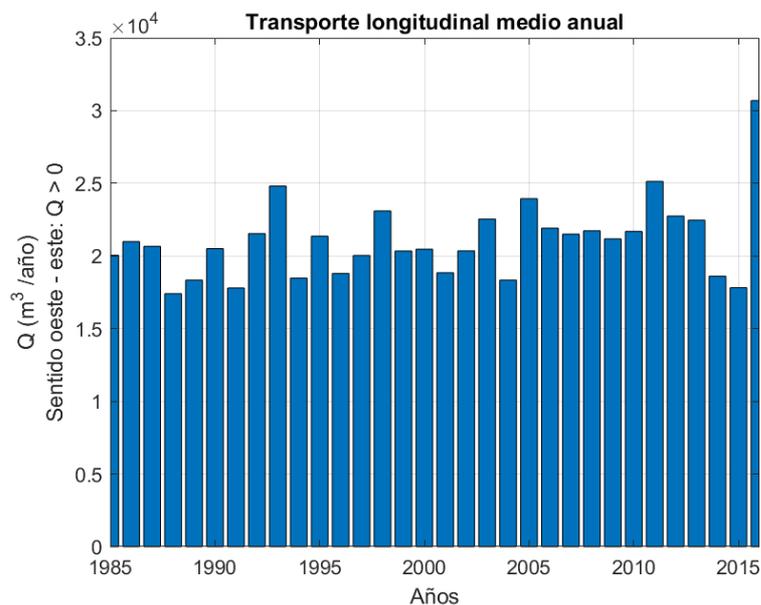


Figura 25. Transporte longitudinal medio anual en Playa Carrasco.

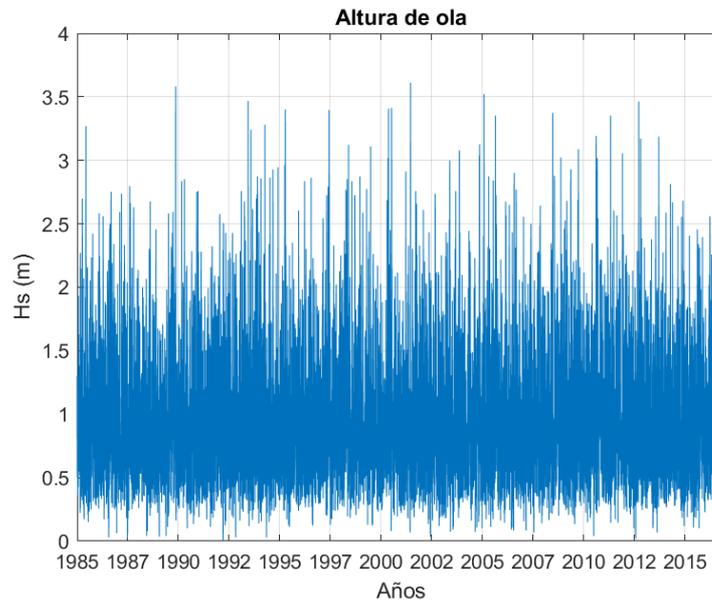


Figura 26. Serie temporal de altura de ola significativa en rotura en Playa Carrasco.

#### 4.2.1 Retroceso de la línea de costa

A partir de la evolución de la línea de costa obtenida con el modelo de erosión, se han obtenido dos tipos de resultados. Por un lado, se ha estimado el retroceso estructural de la línea de costa, que se ha definido como el retroceso permanente de la playa debido al ANMM, y, por otro, se han obtenido los retrocesos asociados a diferentes periodos de retorno, en el presente y en el futuro. Estos retrocesos son retrocesos asociados a temporales, y son por tanto recuperables.

En la Figura 27 se representa el retroceso estructural de la línea de costa en 2050 y 2100 debido al ANMM y la incertidumbre asociada. Como se puede observar en la figura, en las zonas limitadas por infraestructuras la playa se erosiona totalmente, y en las zonas de playa con campo de dunas queda un margen de playa entre la rambla y la línea de costa futura. En la zona oeste de la playa, donde no existe playa seca, las líneas de costa inicial y futuras se superponen. En la Figura 28 se muestra la Figura 27 ampliada en la zona oeste de la playa.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCO



Figura 27. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en Playa Carrasco. La línea marrón representa la línea de costa inicial, la línea verde (2050, RCP promedio) y moradas (2100, RCP8.5) representan la línea de costa en el futuro debido al ANMM.



Figura 28. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 ampliado en Playa Carrasco. La línea marrón representa la línea de costa inicial, la línea verde (2050, RCP promedio) y moradas (2100, RCP8.5) representan la línea de costa en el futuro debido al ANMM.

A partir de del retroceso de la línea de costa se ha estimado el área de playa erosionada debido al ANMM, en 2050 y 2100 (Tabla 8). La superficie erosionada debido al ANMM se considera como superficie de playa no recuperable, ya que al estar limitada por la rambla y la carretera la playa no puede adaptarse a las nuevas condiciones de dinámicas y retranquearse hacia el interior.

En las tablas siguientes se muestra el retroceso estructural de la línea de playa en la celda litoral 18, ubicada a la altura del hotel Sofitel. Por su proximidad a la zona erosionada del extremo oeste de la playa, y por la presencia de un campo de dunas pequeño, esta zona de la playa está más expuesta a la erosión que las zonas de playa más cercanas a la desembocadura del río. En esta zona se han medido, a través de imágenes de satélite, retrocesos de aproximadamente 15 metros durante los temporales que tuvieron lugar en 2016.

En la zona de playa cercana a la plaza se ha considerado una anchura máxima erosionable de playa igual a 37 metros. Como se puede observar, en 2050 el ANMM provocará la erosión de entre 8,90 y 11,88 metros de playa, y en 2100 (RCP8.5) la desaparición de la playa en este tramo.

Tabla 7. Retroceso estructural (m) de la línea de costa debido al ANMM (celda litoral 18).

| Retroceso estructural<br>(metros) | 2050 |       |       | 2100 RCP4.5 |       |       | 2100 RCP8.5 |       |       |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                                   | P5%  | Media | P95%  | P5%         | Media | P95%  | P5%         | Media | P95%  |
|                                   | 8,90 | 10,39 | 11,88 | 22,07       | 25,91 | 29,75 | 30,29       | 35,95 | 37,00 |

En la Tabla 8 se recoge la superficie erosionada debido al retroceso estructural de la línea de costa, estimada a partir de los retrocesos obtenidos en cada celda litoral. En 2050 se espera una pérdida permanente de la superficie de playa entre 38.401 y 51.232 m<sup>2</sup>, mientras que en 2100 puede llegar hasta 161.652 m<sup>2</sup>. Como se ha mencionado anteriormente, esta superficie de playa no es recuperable, salvo que se implementen medidas de adaptación.

Tabla 8. Área erosionada (m<sup>2</sup>) de playa debido al ANMM.

| Área erosionada<br>(m <sup>2</sup> ) | 2050   |        |        | 2100 RCP4.5 |         |         | 2100 RCP8.5 |         |         |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
|                                      | P5%    | Media  | P95%   | P5%         | Media   | P95%    | P5%         | Media   | P95%    |
|                                      | 38.401 | 44.837 | 51.232 | 94.284      | 110.405 | 125.494 | 127.594     | 148.112 | 161.652 |

En la Tabla 9 se recogen los resultados de área erosionada asociada al retroceso de la línea de playa de periodos de retorno 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Esta área de playa erosionada es playa erosionada durante eventos extremos y, si no se toman medidas, puede no ser recuperable en su totalidad. Ante la falta de aportes y depósitos de arena, los temporales provocarán la erosión permanente de la playa y la socavación de los muros en más puntos de la rambla, como sucede en el extremo oeste de la playa.

Como se puede observar en la Tabla 9, si en el presente se puede llegar a tener una erosión de la playa de 55.695 m<sup>2</sup> (Tr = 100 años) o de hasta 71.057 m<sup>2</sup> (Tr = 500 años), en 2100, para los mismos niveles de amenaza, la playa se podrá erosionar 133.690 m<sup>2</sup> y 190.775 m<sup>2</sup>, respectivamente.

Tabla 9. Área erosionada (m<sup>2</sup>) de playa asociado a distintos periodos de retorno.

| Área erosionada (m <sup>2</sup> ) | Presente | 2050    |         |         | 2100 RCP4.5 |         |         | 2100 RCP8.5 |         |         |
|-----------------------------------|----------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
|                                   |          | P5%     | Media   | P95%    | P5%         | Media   | P95%    | P5%         | Media   | P95%    |
| Tr 5                              | 25.870   | 60.089  | 69.079  | 77.976  | 98.860      | 116.113 | 132.057 | 115.553     | 133.690 | 149.973 |
| Tr 10                             | 33.089   | 71.527  | 81.311  | 91.169  | 113.784     | 131.164 | 147.564 | 135.776     | 153.866 | 167.289 |
| Tr 25                             | 42.211   | 85.724  | 96.618  | 107.683 | 128.041     | 145.980 | 158.009 | 154.374     | 170.517 | 183.745 |
| Tr 50                             | 48.978   | 96.165  | 107.866 | 119.386 | 136.728     | 152.386 | 163.814 | 163.826     | 180.587 | 189.012 |
| Tr 100                            | 55.695   | 106.453 | 118.593 | 130.270 | 144.040     | 157.003 | 168.163 | 171.701     | 186.506 | 190.727 |
| Tr 500                            | 71.057   | 128.609 | 141.591 | 152.172 | 153.378     | 164.951 | 175.245 | 184.523     | 190.775 | 193.987 |

### 4.3 Riesgo

El riesgo de erosión, al igual que se realizaba con el de inundación, se obtiene como la integración de la información de peligrosidad con la exposición y la vulnerabilidad. En este apartado se muestran los resultados cuantitativos de las consecuencias sobre el valor económico de los servicios ecosistémicos de protección y recreativo proporcionado por Playa Carrasco.

Basando el estudio en el valor económico total de los servicios, y en los datos de erosión obtenidos y reflejados en las tablas anteriores, se obtiene que las consecuencias de la erosión que sufrirá la zona de estudio varían en el presente entre los 1,7 y 13,2 millones de USD anuales para eventos extremos de erosión de periodos de retorno entre los 5 y los 500 años de periodo de retorno (Tabla 10).

Tabla 10. Consecuencias debidas a eventos extremos de erosión sobre el valor anual de los servicios proporcionados por la playa, expresado en USD anuales dañados.

|                      | Probabilidad       | 0,2        | 0,1        | 0,04       | 0,02       | 0,01       | 0,002      |            |
|----------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                      | Periodo de retorno | TR 5       | TR 10      | TR 25      | TR 50      | TR 100     | TR 500     | DAE        |
| <b>PRESENTE</b>      | <b>Valor medio</b> | 1.746.288  | 2.856.973  | 4.649.265  | 6.259.430  | 8.094.021  | 13.175.060 | 895.909    |
| <b>2050</b>          | Percent. 5%        | 9.421.629  | 13.349.808 | 19.174.998 | 24.130.557 | 29.570.148 | 43.159.248 | 4.048.955  |
|                      | <b>Valor medio</b> | 12.451.667 | 17.251.820 | 24.358.304 | 30.360.385 | 36.698.917 | 52.312.583 | 5.217.174  |
|                      | Percent. 95%       | 15.865.488 | 21.688.451 | 30.257.266 | 37.191.175 | 44.281.842 | 60.423.244 | 6.523.287  |
| <b>2100 (RCP4.5)</b> | Percent. 5%        | 25.501.867 | 33.782.641 | 42.778.978 | 48.780.494 | 54.137.574 | 61.384.672 | 9.703.535  |
|                      | <b>Valor medio</b> | 35.180.233 | 44.891.689 | 55.605.913 | 60.593.501 | 64.320.471 | 70.997.526 | 12.864.383 |
|                      | Percent. 95%       | 45.504.934 | 56.818.974 | 65.147.473 | 70.022.585 | 73.789.572 | 80.135.277 | 16.012.143 |
| <b>2100 (RCP8.5)</b> | Percent. 5%        | 34.841.658 | 48.103.913 | 62.184.875 | 70.032.930 | 76.927.053 | 88.844.984 | 13.660.174 |
|                      | <b>Valor Medio</b> | 46.637.468 | 61.776.349 | 75.869.697 | 85.095.906 | 90.765.353 | 94.968.374 | 17.445.716 |
|                      | Percent. 95%       | 58.689.281 | 73.024.599 | 88.097.621 | 93.221.116 | 94.920.292 | 98.192.638 | 20.814.635 |

Estas cantidades se verán incrementadas con los efectos del cambio climático, de tal forma que los 1,7 millones anuales que se experimentan en el presente para eventos extremos de erosión de periodo de retorno de 5 años se multiplicarán por más de 34, sobrepasando los 58 millones de USD anuales, en el

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCO

peor de los escenarios posibles, y que los 13,2 millones de un periodo de retorno de 500 años en la actualidad podrán multiplicarse por 7,5, llegando a superar los 98 millones de USD anuales.

Tabla 11. Consecuencias permanentes sobre el valor anual de los servicios proporcionados por la playa, expresado en USD anuales dañados.

| Horizonte futuro | ANMM               | Consecuencias debido al retroceso estructural (USD) |
|------------------|--------------------|---|
| 2050             | Percent. 5%        | 3,847,861   |
|                  | <b>Valor medio</b> | 5,245,862   |
|                  | Percent. 95%       | 6,849,071   |
| 2100 (RCP4.5)    | Percent. 5%        | 23,196,270  |
|                  | <b>Valor medio</b> | 31,806,663  |
|                  | Percent. 95%       | 41,094,887  |
| 2100 (RCP8.5)    | Percent. 5%        | 42,481,516  |
|                  | <b>Valor medio</b> | 57,242,550  |
|                  | Percent. 95%       | 68,186,214  |

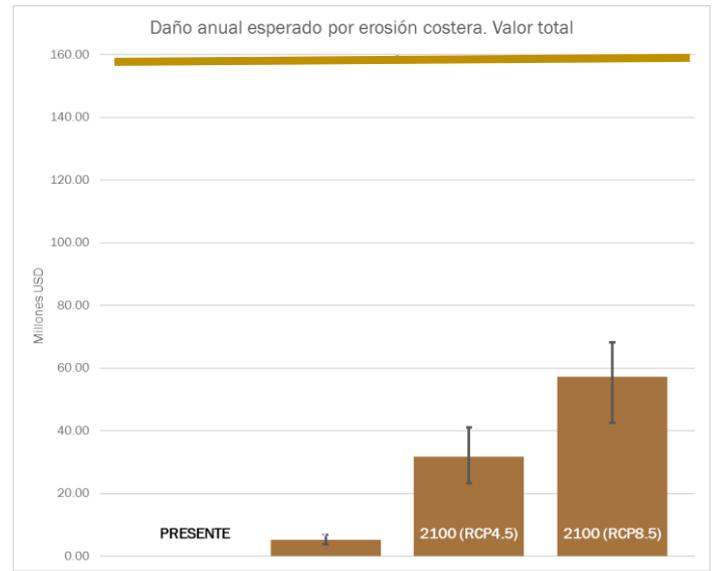
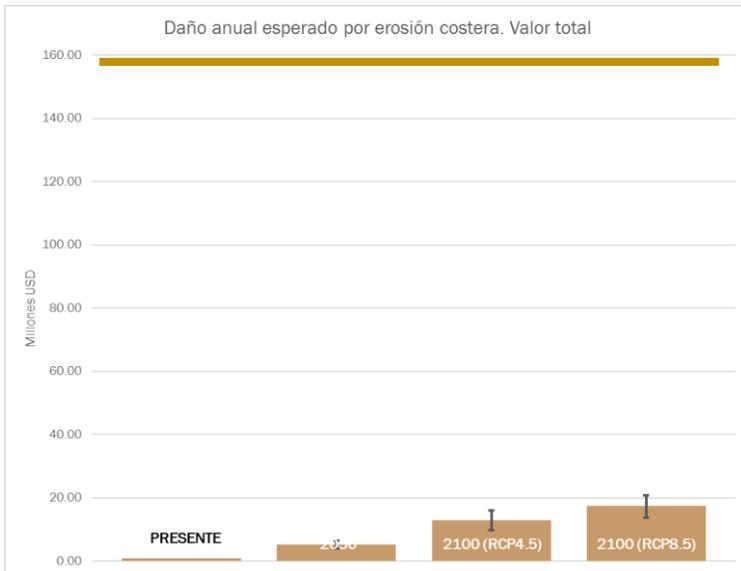


Figura 29. Daño anual esperado por erosión costera sobre el valor anual total de la playa (obtenido de los servicios de protección y recreativo proporcionados por la playa). La figura de la izquierda representa el daño por eventos extremos de erosión, mientras que la figura de la derecha el daño por el retroceso estructural. En ambos casos, la línea continua representa el valor total de la playa.

El daño anual esperado, actualmente en el entorno de los 0,9 millones de USD anuales, aproximadamente se multiplicará por 5 para el año 2050 y al menos por 10 para el año 2100.

Además de esta variación en las consecuencias que se experimentarán por los efectos del cambio climático, la erosión estructural que sufrirá Playa Carrasco debido al ANMM (Tabla 11) añadirá un daño

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCCO

extra que rondará los 5,2 millones de USD anuales en 2050 y que variará entre los 23 y los 68 millones de USD anuales en 2100, por lo que es la aparición de esta erosión estructural la que realmente introduce una componente de riesgo importante, con respecto a las consecuencias debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 38,50 millones de USD (valor presente de los daños, percentil 50%, con una tasa de descuento del 4%). Este valor está condicionado por la tasa de descuento empleada, y variaría entre los 46,25 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 32,28 millones de USD si la tasa a aplicar es del 5% (percentil 50% de los daños).

El valor acumulado desde el presente hasta final de siglo (2100), se estima en 132,15 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 189,77 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

## 5 CONCLUSIONES

Playa Carrasco (Departamento de Montevideo) es una playa urbana ubicada en los barrios residenciales de Punta Gorda (al oeste) y Carrasco (este), a 15 kilómetros hacia el este del centro de la ciudad de Montevideo. Es una playa rectilínea cuya estabilidad está condicionada por la continuidad del transporte de sedimento en la unidad fisiográfica, cuyo sentido medio anual es de oeste a este.

A partir de la información del riesgo percibido por los agentes locales y del análisis de imágenes históricas de la playa se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La desembocadura de Arroyo Carrasco supone un confinamiento parcial al transporte de arena. La forma de la flecha indica que el sentido medio anual del transporte de sedimentos en la unidad fisiográfica es de oeste a este.
- La continuidad del transporte de sedimento está actualmente limitada por la ausencia de aportes de arena, debido a la canalización de los cauces fluviales y la construcción de diques y espigones, por el extremo oeste.
- La zona oeste de la playa no tiene playa seca y se produce el descalce del muro con temporales.

El aumento del nivel medio del mar esperado en 2050 en la costa de Uruguay es de 0,26 metros para el RCP promedio, y el aumento del nivel medio del mar esperado en 2100 es de 0,58 metros para el RCP4.5, y de 0,80 metros para el RCP8.5. Se han modelado los impactos de inundación y erosión costera en el presente y en el futuro en Playa Carrasco y la zona urbana adyacente, y se ha cuantificado el riesgo debido al aumento del nivel medio del mar en términos monetarios. De este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones, que sustentan en la mayor parte las conclusiones anteriores:

- Riesgo de inundación costera

Una de las zonas más expuestas del área de estudio es la zona urbana situada detrás de la parte más occidental de la playa, a la altura de la avenida Bolivia y la calle 6 de Abril. En esta zona los edificios están contruidos sobre terrenos bajos y presentan más densidad de población que los edificios contruidos a lo largo de la rambla. Además, en esta zona la rambla y la carretera está contruidas encima del campo de dunas.

En el presente, solamente se tienen problemas de inundación costera para eventos con probabilidad baja (periodos de 100 años) o muy baja (periodos de 500 años) de ocurrencia. Para estos eventos, en el presente el riesgo de inundación sobre la población expuesta es de 14 y 127 personas, respectivamente, y el riesgo de inundación sobre los activos es de 407.753 y 5.350.864 USD, respectivamente.

En el futuro, se prevé un aumento en la intensidad de los eventos extremos debido al aumento del nivel medio del mar. De esta manera, el riesgo de inundación para eventos con probabilidad alta de ocurrencia en el futuro será equiparable al riesgo de inundación en el presente para eventos con probabilidad muy baja de ocurrencia. En 2050, la superficie inundable asociada al evento de periodo de 50 años será superior a la superficie inundable asociada al evento de periodo de 100 años en el

presente. En 2100 (RCP4.5) un periodo de 25 años generará un área inundada mayor que un evento de periodo de 500 años en el presente; y en 2100 RCP8.5 la superficie inundable más cercana a la generada con un evento de periodo de 500 años en el presente será la generada con un evento de periodo de 10 años.

En 2100, tanto en el RCP4.5 como en el RCP8.5, la zona de Punta Gorda situada entre la rambla y la avenida Bolivia y la zona de Carrasco situada entre la rambla y la avenida Pedro Blanes; y la zona este de Carrasco situada entre la rambla y la avenida General Rivera, son zonas con riesgo potencial de inundación alto, ya que se consideran como zonas inundables para amenazas con probabilidad media de ocurrencia (periodo de 25 años) en el RCP4.5, y como zonas inundables para amenazas con probabilidad alta de ocurrencia (periodo de 10 años) en el RCP8.5.

En 2100 (RCP8.5) el riesgo sobre la población expuesta podría llegar a 728 y 1.170 personas, para eventos con periodos de 100 y 500 años, y el riesgo sobre los activos construidos podría llegar a 51.019.993 y 93.628.868 USD, respectivamente.

- Riesgo de erosión costera

El principal servicio proporcionado por la Playa Carrasco es el de recreación, doblando el valor del servicio de protección. En el agregado (suma de valor de protección y recreativo), Playa Carrasco es la cuarta playa más valiosa de la costa en términos absolutos, y la trigésima en términos de valor por hectárea.

El valor recreativo de la Playa Carrasco se ha estimado en 109.982.590 USD anuales (2.377.611 USD anuales por hectárea). Este valor absoluto se sitúa muy por encima de la media del país (18,5 millones de USD anuales) y el valor por hectárea dobla a la media de toda la costa uruguaya (situada en 1 millón de USD anuales por hectárea). El valor total de protección, considerando el valor de las edificaciones próximas a la playa, se ha estimado en 48.986.448 USD anuales (1.059.015 USD anuales por hectárea). Este valor absoluto representa el cuarto valor de protección más elevado de las playas de Uruguay, y más de diez veces mayor a la media del país, que se sitúa en 3,9 millones de USD anuales. En términos de valor por hectárea, sin embargo, el valor de la playa se aproxima bastante a la media del país, aunque por encima de la misma (882.800 USD anuales por hectárea).

El tramo de playa más expuesto a la erosión costera es el tramo entre avenida Bolivia y el Hotel Sofitel, tanto por la proximidad al tramo oeste de la playa ya erosionado, como por la anchura de playa seca y del campo de dunas. En base a imágenes históricas se ha estimado que en el presente este tramo de playa ha sufrido retrocesos de hasta 15 metros provocados por temporales. En el futuro, retrocesos con la misma probabilidad de ocurrencia que los 15 metros de retroceso del presente provocarán retrocesos por valor igual a la anchura total de la playa. Además, se estima que el retroceso estructural de la línea de costa provocará la pérdida permanente de entre 9 y 12 metros de anchura de playa en 2050, y de hasta 37 metros en 2100.

En base al valor estimado de la playa y a los resultados de erosión obtenidos del modelado, se estima que las consecuencias de la erosión que sufrirá la zona de estudio varían en el presente entre 1,7 y 13,1 millones de USD anuales para eventos extremos de erosión de Tr 5 y 500 años, respectivamente.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA CARRASCO

Estas cantidades se verán incrementadas con los efectos del cambio climático, de tal forma que los 1,7 millones que se experimentan en el presente para eventos de periodo de retorno de 5 años se multiplicarán, sobrepasando los 58 millones de USD anuales, en el peor de los escenarios posibles, y que los 13,1 millones de un periodo de retorno de 500 años en la actualidad superarán los 98 millones de USD anuales.

El daño anual esperado, actualmente en el entorno de los 0,8 millones de USD anuales, aproximadamente se multiplicará por 5 para el año 2050 y al menos por 10 para el año 2100.

Además de esta variación en las consecuencias que se experimentarán por los efectos del cambio climático, la erosión estructural que sufrirá Playa Carrasco debido al ANMM añadirá un daño extra que rondará los 5,2 millones de USD anuales en 2050 y que variará entre los 23 y los 68 millones de USD anuales en 2100, por lo que es la aparición de esta erosión estructural la que realmente introduce una componente de riesgo importante, con respecto a las consecuencias debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños estructurales desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 38,50 millones de USD (valor presente de los daños, percentil 50%, con una tasa de descuento del 4%). Este valor está condicionado por la tasa de descuento empleada, y variaría entre los 46,25 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 32,28 millones de USD si la tasa a aplicar es del 5% (percentil 50% de los daños).

El valor acumulado desde el presente hasta final de siglo (2100), se estima en 132,15 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 189,77 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

## 6 REFERENCIAS

Boschi, E.E. (1988). El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). Anuario del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Autónoma de México, Vol. 15, pp. 159 – 182.

Fossati, M., Santoro, P., Mosquera, R., Martínez, C., Ghiardo, F., Ezzati, P., Pedocchi, F., Piedra-Cueva, I. (2014). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. Revista Iberoamericana del Agua (1), pp. 48-63.

Gas Sayago S.A. (diciembre, 2018). Informe Técnico 14. Campaña de topografía de costas de noviembre 2018.

IHCantabria (2019a). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D3.1: Atlas de Dinámicas Marinas de Uruguay.

IHCantabria (2019b). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D3.2: Proyecciones de cambio climático. Oleaje, residuo del nivel del mar y nivel medio del mar en Uruguay.

IHCantabria (2019c). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D4.1: Informe técnico sobre los resultados del proyecto. Escala nacional.

IHCantabria (2019d). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D4.2: Informe técnico sobre la metodología aplicada en el proyecto. Escala nacional.

IHCantabria (2019e). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D4.4: Informe técnico sobre la metodología aplicada en el proyecto. Escala piloto.

Jamieson, S.R., Lhomme, J., Wright, G., Gouldby, B. (2012). Highly efficient 2D inundation modelling with enhanced diffusion-wave and sub-element topography. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 165 (10), pp. 581-595.

Van Rijn, L.C. (2014). A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. Coastal Engineering, 90, pp. 23 – 39.