

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Análisis de la inundación costera por efecto del cambio climático en el municipio Puerto de la Cruz (Tenerife, España)

Trabajo realizado por: Yailin Fernández González

Dirigido: Javier López Lara David Lucio Fernández

Titulación:

Máster Universitario en Costas y Puertos

Santander, septiembre de 2022

Análisis de la inundación costera por efecto del cambio climático en el

municipio puerto de la cruz (Tenerife, España)

Autora: Yailin Fernández González

Directores: Javier López Lara, David Lucio Fernández

Convocatoria: septiembre 2022

Resumen

El litoral del municipio Puerto de la Cruz, localizado al norte de la isla de Tenerife (Islas Canarias) está formado por deltas lávicos que aumenta la exposición a refracciones convergentes del oleaje, lo que hace a su costa vulnerable ante los eventos de inundación. A lo largo de la historia se han reportado pérdidas materiales y su población se ha visto afectada por estos episodios. Dicha situación, recalca la necesidad de estudios que evalúen los impactos de inundación costera, en un contexto de Cambio Climático (CC) como paso previo a la planificación de medidas de adaptación. El estudio se lleva a cabo con cinco escenarios climáticos: un periodo de referencia histórico y dos escenarios futuros; RCP 4.5 y el RCP 8.5 a mitad y final de siglo. En este contexto, se aplica una metodología de alta resolución para modelar la inundación costera a escala local, tras haber obtenido el clima marítimo en la costa, en cada uno de los escenarios climáticos y haber aplicado un procedimiento de propagación híbrida que tiene en cuenta los cambios en las dinámicas del oleaje y nivel al mismo tiempo. Para definir la inundación en el litoral se determina el nivel del mar o TWL (por sus siglas en inglés) generado por eventos extremos. Estos resultados, junto al modelo digital del terreno (MDT) de alta resolución y la rugosidad del terreno se emplean como input del modelo bidimensional hidrodinámico de la bañera mejorado basado en SIG, y así se obtienen mapas de inundación para diferentes periodos de retorno en cada uno de los escenarios. En el caso de estudio, a pesar de que existe un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, el descenso del oleaje y por consecuente del run-up, no compensa el aumento de nivel del mar y la inundación costera no se ve intensificada en los escenarios climáticos alternativos estudiados.

Palabras claves: inundación costera, cambio climático, impactos costeros, proyecciones de cambio climático, adaptación.

Coastal flooding assessment under climate change in the

municipality of Puerto de la Cruz (Tenerife, Spain)

Author: Yailin Fernández González

Directors: Javier López Lara, David Lucio Fernández

Call: September 2022

ABSTRACT

The coastline of the municipality of Puerto de la Cruz, located in the north of the island of Tenerife (Canary Islands) is formed by lava deltas that increase exposure to convergent wave refractions, which makes its coast vulnerable to flooding events. Throughout history, material losses have been reported and the population has been affected by these episodes. This situation highlights the need for studies to assess the impacts of coastal flooding in the context of Climate Change (CC) as a preliminary step to planning adaptation measures. The study is carried out with five climate scenarios: a historical reference period and two future scenarios; RCP 4.5 and RCP 8.5 at mid and end of the century. In this context, a high-resolution methodology is applied to model coastal inundation at the local scale, after obtaining the maritime climate at the coast in each of the climate scenarios and applying a hybrid propagation procedure that takes into account changes in wave and level dynamics at the same time. To define coastal inundation, the total water level (TWL) generated by extreme events is determined. These results, together with the high-resolution digital terrain model (DTM) and terrain roughness are used as input to the GIS-based enhanced twodimensional hydrodynamic model of the bathtub, thus obtaining inundation maps for different return periods in each of the scenarios. In the case study, although there is an increase in the frequency and intensity of extreme events, the decrease in waves and consequently in run-up does not compensate for the increase in sea level and coastal flooding is not intensified in the alternative climate scenarios studied.

Keywords: coastal flooding, climate change, coastal impacts, climate change projections, adaptation.

Dedicatoria

A mi madre y hermana

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a Javier López por abrirme las puertas, confiar en mí y darme su apoyo constante. Agradezco a David Lucio y Alberto Fernández por su orientación técnica en la realización de este TFM. También a Gabriel Díaz por compartir sus conocimientos con tanto dinamismo e ideas atrevidas que llevan jugadas ganadoras. Gracias a Mauricio González; el coordinador del máster por su paciencia y enseñarme que los sueños con voluntad, trabajo y creencia son posibles. Le agradezco a La Fundación Carolina por darme la oportunidad de mejorar mi formación académica e incrementar mis capacidades. Gracias a Mariana Roldan por los consejos y a Cristina Sánchez por el intercambio cultural e intelectual. Le agradezco a Sonia; mi compañera de clase, de piso, amiga y todos los sustantivos que se pueden surgir a partir de un año de experiencias juntas... gracias por estar siempre, por saber que decir en cada momento y contagiarme con tu alegría. Especialmente le agradezco a mi familia de Cuba y a Marlon Mederos por ser mi soporte y correr hasta la meta conmigo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	. 15
1.	1. Motivación de estudio	. 15
2.	1. Objetivos	. 16
2.	METODOLOGÍA	. 16
3.	DATOS	. 18
3.	1. Topo-batimetría	. 18
3.	2. Series climáticas	. 20
4.	DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO	. 24
4.	1. Localización	. 24
4.	2. Casos de estudio	. 26
4.	3. Caracterización del clima marítimo en aguas profundas	. 27
5.	DOWNSCALING HÍBRIDO	. 37
5.	1. Selección MAXDISS	. 37
5. co	2. Propagación numérica del oleaje desde aguas profundas hasta la osta con el modelo SWAN	. 39
5.	3. Reconstrucción del oleaje en los puntos objetivo: RBF	. 43
6.	MODELADO DE LA INUNDACIÓN	. 44
6. ex	2. Caracterización del clima marítimo en la costa. Régimen medio y xtremal	. 44
6.	3. Cálculo de la sobreelevación	. 46
6.	4. Método de inundación	. 50
7.	RESULTADOS	. 52
8.	MEDIDAS BLANDAS DE GESTIÓN LOCAL	. 65
9.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	. 66
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 69
11.	ANEXOS	. 71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (Izquierda) Fotografía en planta de Puerto de la Cruz y curvas de nivel
topo-batimétricas cada 2,5 m. (Derecha) Mapa de colores de la topo-batimetría
de Puerto de la Cruz. Fuente: Elaboración propia19
Figura 2. Datum del mareógrafo de Tenerife. Fuente: (Puertos del Estado ,
2011)
Figura 3. Serie Histórica. Periodo [1985-2005]. Punto [28,4395] [-16,5605].
Fuente: Elaboración propia21
Figura 4. RCP 4.5. (Izquierda) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-
2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia
Figura 5. RCP 8.5. (Izquierda) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-
2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia
Figura 6. Serie de marea meteorológica (MM) en el punto [28,4400] [-16,5600].
(Izquierda) Marea meteorológica (MM) del RCP 4.5 del periodo [2026-2045] y
[2081-2100]. (Derecha) Marea meteorológica (MM) del RCP 8.5 del periodo
[2026-2045] y [2081-2100]. Fuente: Elaboración propia
Figura 7. Serie de marea astronómica (MA) en el punto [28,4400] [-16,5600].
Fuente: Elaboración propia
Figura 8. Aumento del nivel medio del mar (ANMM) en los escenarios RCP 4.5
y RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia23
Figura 9. Localización de la ciudad Puerto de la Cruz. Fuente: Fuente:
Elaboración propia
Figura 10. Límites de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia
Figura 11. Función de distribución acumulada de la serie histórica (izquierda)
Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA
Figura 12. Histograma de la serie histórica (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y
(Derecha) Hs (m)
Figura 13. Histograma de densidad de la serie histórica (izquierda) Hs (m) y Dir
(°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de
AMEVA
Figura 14. Rosa de oleaje de la serie histórica (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs
(m). Fuente: Resultado de AMEVA 29
Figura 15. Función de distribución acumulada del RCP 4.5. Periodo [2026-
2045] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA 29

Figura 16. Histograma del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Dir. (°), Figura 17. Histograma de densidad del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp Figura 18. Rosa de oleaje del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) Figura 19. Función de distribución acumulada del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.... 31 Figura 20. Histograma del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Dir. (°), Figura 21. Histograma de densidad del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp Figura 22. Rosa de oleaje del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y Figura 23. Función de distribución acumulada del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.... 33 Figura 24. Histograma del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Dir. (°), Figura 25. Histograma de densidad del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp Figura 26. Rosa de oleaje del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) y Figura 27. Función de distribución acumulada del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Resultado de AMEVA...... 34 Figura 28. Histograma del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Dir. (°), Figura 29. Histograma de densidad del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp Figura 30. Rosa de oleaje del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y

Figura 31. Análisis extremal de la serie Histórica. Periodo [1985-2005]. Punto Figura 32. Análisis extremal RCP 4.5. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Figura 33. Análisis extremal del RCP 8.5. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Figura 34. Estados de mar del periodo actual y proyecciones (color negro) y Figura 35. Malla general (izquierda) y de detalle (derecha) numéricas estructuradas para la propagación del oleaje en el modelo SWAN en Puerto de la cruz. Fuente: Resultado de la herramienta GUIH-SWAN.......41 Figura 36. Esquema del montaje numérico para la propagación del oleaje en la Figura 37. Comparación de la serie de oleaje series temporales propagadas y reconstruida......43 Figura 38. Función de distribución acumulada de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA...... 44 Figura 39. Histograma de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Dir. (°), Figura 40. Histograma de densidad de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de AMEVA......45 Figura 41. Rosa de oleaje de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA. 45 Figura 42. Análisis extremal de la serie Histórica del punto 2. Periodo [1985-Figura 43. (Izquierda) Zona de estudio tramificada y secciones para determinar la pendiente. (Derecha) Perfiles longitudinales de las secciones para Figura 44. Análisis extremal del TWL de la serie Histórica del tramo 2. Fuente:

Figura 45. Análisis extremal del TWL del RCP 4.5 del tramo 2. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Fuente: Elaboración Figura 46. Figura 47. Análisis extremal del TWL del RCP 8.5 del tramo 2. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Fuente: Elaboración propia......50 Figura 48. Zona de estudio con la línea de inundación que alimenta el modelo Figura 49. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el periodo histórico [1985-2005] con Tr=2 años. Fuente: Elaboración propia. 53 Figura 50. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 4.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo Figura 51. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 8.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo Figura 52. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el periodo histórico [1985-2005] con Tr=5 años. Fuente: Elaboración propia. 55 Figura 53. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 4.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo Figura 54. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 8.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo Figura 55. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el periodo histórico [1985-2005] con Tr=10 años. Fuente: Elaboración propia.... 56 Figura 56. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 4.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo Figura 57. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 8.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo Figura 58. Área de inundación por Tr y escenario climático. Fuente: Elaboración

Figura 59. Profundidad máxima alcanzada por Tr y escenario climático. Fuente:
Elaboración propia 60
Figura 60. Área de inundación por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5
y 10 años. Fuente: Elaboración propia62
Figura 61. Porcentaje de variación del área de inundación respecto al periodo
histórico por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5 y 10 años. Fuente:
Elaboración propia62
Figura 62. Profundidad media de inundación por tramo y escenario climático
para los Tr=2, 5 y 10 años. Fuente: Elaboración propia64
Figura 63. Porcentaje de variación de la profundidad media de inundación
respecto al periodo histórico por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5 y
10 años. Fuente: Elaboración propia64

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	
Ecuación 2	

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AMEVA:	Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales
ANMM:	aumento del nivel medio del mar
CC:	Cambio Climático
Dir.:	dirección media
Hs:	altura de ola significante
IH Cantabria:	Instituto de Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria
MA:	marea astronómica
MDT:	modelo digital de terreno
MM:	marea meteorológica
NMM:	nivel medio del mar
Ru:	<i>run-up</i> o remonte
Tm:	periodo medio
Тр:	período pico
TWL:	<i>total wáter level</i> o nivel total de agua

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación de estudio

El municipio Puerto de la Cruz, localizado al norte de la isla de Tenerife (Islas Canarias) tiene un litoral formado por deltas lávicos que aumenta la exposición a refracciones convergentes. Este hecho, más la energía que proyectan las olas, la poca disipación y la turbulencia del mar debido a los escollos y canales de derrame, hace a la costa del municipio vulnerable ante los eventos de inundación (Luque, 2017).

A lo largo de la historia su población y entorno ha sido afectada por estos episodios. Un ejemplo es el temporal que ocurrió el 10 de marzo del 2003, cuando enormes olas de hasta 6,0 m saltaron y entraron en Lago Martiánez dejando 12 heridos graves. Otro caso corresponde al 15 de abril del mismo año en el que se reportaron vientos muy fuertes del Noroeste y alturas de olas de 8,0 m que causaron destrozos en rompeolas, avenida marítima, complejos turísticos y mobiliarios urbanos, así como inundación de comercios y restaurantes. Registros indican que un temporal de esta magnitud no se había producido desde enero de 1987 (Luque, 2017).

Los informes de Evaluación sobre el Cambio Climático (CC) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (*IPCC*, por sus siglas en inglés) ponen de manifiesto el incremento e intensidad de los eventos extremos y su repercusión a corto y largo plazo. En el quinto informe definieron 4 nuevos escenarios denominados: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Estas variantes encuentran su denominación en la Trayectoria de Concentración Representativas (*RCP*, por sus siglas en ingles), con 4 niveles que oscilan entre 2,6 y 8,5 W/m². También se basan en las condiciones socioeconómicas actuales y las perspectivas de crecimiento. Los resultados de cada escenario indican que, para el año 2100 la concentración de CO² superará a la actual (IPCC, 2013) y tendrá influencia en las inundaciones costeras. Además, alertan sobre la necesidad de priorizar en políticas de gestión de riesgos y de adaptación al CC. Por lo que el municipio requiere de estudios que contribuyan a reforzar la capacidad de adaptación y resiliencia para promover soluciones que gestionen y reduzcan la inundación en el litoral costero.

Ante dicha problemática, se propone el análisis de la inundación costera por efecto del CC a escala local en el municipio Puerto de la Cruz, combinando técnicas estadísticas y numéricas fiables disponibles en la literatura, además escenarios de CC y horizontes que permitan la proyección de los oleajes en costa, para inferir mapas de inundación futura y planear medidas de adaptación.

2.1. Objetivos

Objetivo Principal

El presente estudio tiene el objetivo principal de determinar y analizar la inundación costera generada por eventos extremos debido al CC, en una zona de la costa del municipio Puerto de la Cruz (ubicado en Tenerife, España) para anticipar el impacto y planear medidas de adaptación.

Objetivos secundarios

Para darle cumplimiento al objetivo principal es necesario el planteamiento y desarrollo de los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar el clima marítimo de un periodo de referencia climático correspondiente al pasado [1985-2005] y otros dos periodos de proyecciones futuras de corto plazo [2026-2045] y largo plazo [2081-2100] en Puerto de La Cruz (Tenerife, España).
- Trasladar 20 años de oleaje de cinco series climáticas a la costa de Puerto de La Cruz mediante la estrategia híbrida de reducción de escala.
- Determinar la inundación generada por eventos extremos en la costa de Puerto de La Cruz y obtener mapas sobre un modelo digital de terreno de alta resolución.
- Plantear medidas blandas de adaptación en base a los resultados.

2. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento al objetivo principal, que es la predicción de la inundación en el frente costero de Puerto de la Cruz, es necesario el desarrollo de los 6 pasos metodológicos que se exponen a continuación:

- 1. Recopilar el clima en off shore como fuente información fiable.
- 2. Seleccionar casos representativos del clima.

- 3. Propagar hasta la costa los estados de mar seleccionados.
- 4. Transferir el clima hacia la costa para forzar el modelo de inundación costera.
- 5. Inundar tierra con el modelo de bañera basado en SIG.
- 6. Aplicar los resultados para el planeamiento de las medidas de adaptación.

La metodología propuesta consiste en definir el clima de olas en aguas profundas a partir de bases de datos y aplicar modelos estadísticos para caracterizarlo. Luego transferir el clima de olas a la costa mediante una reducción de escala híbrida de un subconjunto representativo de las condiciones del estado del mar de áreas abiertas siguiendo los siguientes pasos (Camus, Mendez, & Medina, 2011):

- Seleccionar un subconjunto n=1000 y luego n=100 de estados de condiciones de mar abierto aplicando el algoritmo de máxima disimilitud (MAXDISS).
- Transferir el clima de olas de aguas profundas a aguas poco profundas de los n=100 estado de mar más representativos utilizando el modelo de propagación de olas SWAN.
- Reconstruir la serie temporal de los parámetros del oleaje en la costa cercana mediante una técnica de interpolación basada en funciones de base radial (RBF).

Una vez tenido el clima en la zona de interés, se aplican modelos estadísticos para caracterizarlo. A partir de este, se determinar la sobreelevación del nivel debido a la rotura del oleaje generados por eventos extremos, aplicando una formulación semiempírica calibrada para cada escenario y ocho periodos de retorno (Tr= 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años). La máxima sobreelevación alimenta a un modelo bidimensional de bañera mejorado basado en SIG que da como resultado la inundación en tierra representada en forma de mapa sobre el modelo digital de terreno (MDT) de alta resolución que incluye las defensas costeras.

Esta metodología es aplicable a cualquier otro trabajo con el mismo objetivo, incluso cuando las técnicas aplicadas cambien.

3. DATOS

Trabajar con bases de datos fiables es fundamental para llevar a cabo una buena evaluación de la inundación. En el presente trabajo se cuenta con datos de resolución espacial y temporal suficiente, homogéneas y continuas capaces de para representar las condiciones medias y extremas, así como la variabilidad climática natural de una zona del litoral de Puerto de la Cruz (Lucio Fernández, Tomás Sampedro, & Losada Rodríguez, 2020).

3.1. Topo-batimetría

Se ha empleado información topobatimetrica facilitada por el Instituto de Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria (IH Cantabria) que presenta una resolución espacial de 2,5 m x 2,5 m. Los fondos marinos son bastante irregulares con pendiente acentuadas hacia el norte donde se distinguen zonas más pronunciadas y otras más suaves. Las cotas batimétricas van de 2,5 m hasta la -497. Existen dos depresiones una pequeña y alargada frente al Puerto de la Cruz. La segunda situada al este del Puerto de la Cruz, es relativamente grande, muy irregular, con afloramientos rocosos en el centro de la depresión, y con poco espesor en aguas de menos de 30 m. La segunda situada al este del municipio, es relativamente grande, muy irregular, con aflora 1.



Figura 1. (Izquierda) Fotografía en planta de Puerto de la Cruz y curvas de nivel topo-batimétricas cada 2,5 m. (Derecha) Mapa de colores de la topo-batimetría de Puerto de la Cruz. Fuente: Elaboración propia.

La topo-batimetría está referida al nivel medio del mar (NMM) más actual disponible de la Isla de Tenerife como se muestra en la Tabla 1 y figura 2.

Tabla 1. Diferencias entre el Cero Geográfico y el Cero Geodésico (+ por encimapor debajo). Fuente: (Puertos del Estado , 2011).

Referencias con respecto al cero hidrográfico						
	Cero Geodésico		NMM más actual en		Cero Geodésico MDT	
				cada isla		
Isla	Nombre	Altura (m)	Año	Altura (m)	Nombre	Altura (m)
Tenerife	NMMS	1,274	2011	1,365	NMMS	1,444



Figura 2. Datum del mareógrafo de Tenerife. Fuente: (Puertos del Estado, 2011).

3.2. Series climáticas

Las series de datos de oleaje histórica empleada (y validadas por (Ramírez Pérez, Menéndez García, Camus Braña, & Losada Rodríguez, 2019)) son producto del reanálisis ERA5 (Centro Europeo de Previsiones Climáticas a Medio Plazo, ECMWF). Las proyecciones climáticas de alta resolución provienen del modelo climático regional CNRM-CM5 facilitado por el Centro Nacional de Investigación de meteorología de Francia, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelo climático regional utilizado perteneciente a MEDCORDEX. Fuente: (Ramírez Pérez, Menéndez García, Camus Braña, & Losada Rodríguez, 2019). Aunque bien la metodología puede extenderse a un enfoque multimodelo (Lucio, Tomás, L. Lara, & J. Losada, 2022).

RCM	RCM Id		Institución	País	Experimento
		GCM			
ALADIN52	MEDC	CNRM-CM5	Center National	France	MEDCORDEX
			de Recherches		
			Météorologiques		

Las series de olaje cubren el periodo de referencia [1985-2005] y dos vías de concentraciones futuras representativas RCP 4.5 y RCP 8.5, tanto a corto plazo [2026-2045] como a largo plazo [2081-2100]. Disponen de una resolución espacial en horizontal de 0,11° x 0,11°. Estas proporcionan datos horarios de la altura de ola significante (Hs), período pico (Tp), periodo medio (Tm) y dirección media (Dir.) de 20 años para una zona de la costa de Puerto de la Cruz, como se muestra en la figura 3, figura 4 y figura 5 Los campos de viento no se utilizan debido a su relativa baja influencia en el clima local.



Figura 3. Serie Histórica. Periodo [1985-2005]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. RCP 4.5. (Izquierda) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. RCP 8.5. (Izquierda) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia.

Las series de marea meteorológica (MM), ver figura 6, también provienen del modelo climático regional CNRM-CM5, mencionado anteriormente.



Figura 6. Serie de marea meteorológica (MM) en el punto [28,4400] [-16,5600]. (Izquierda) Marea meteorológica (MM) del RCP 4.5 del periodo [2026-2045] y [2081-2100]. (Derecha) Marea meteorológica (MM) del RCP 8.5 del periodo [2026-2045] y [2081-2100]. Fuente: Elaboración propia.

La variación de la marea astronómica (MA) se obtiene de la base de datos de TPXO9, ver figura 7.



Figura 7. Serie de marea astronómica (MA) en el punto [28,4400] [-16,5600]. Fuente: Elaboración propia.

La base de datos sobre proyecciones climáticas de la variación del nivel medio del mar (ANMM o *SLR* por sus siglas en inglés) regional utilizada es la media ensamblada por (Ramírez Pérez, Menéndez García, Camus Braña, & Losada Rodríguez, 2019) apoyada en el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), denominado AR5, para los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 (Trayectorias de Concentración Representativas: RCP). Esta muestra los cambios para los periodos de 20 años para ambos escenarios climáticos, ver figura 8.



Figura 8. Aumento del nivel medio del mar (ANMM) en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las proyecciones climáticas de NMM muestran un aumento a corto plazo (periodo 2026-2045) de entre 0,10 m y 0,14 m, para ambos escenarios climáticos. Sin embargo, el aumento estimado a largo plazo (periodo 2081-2100) varía en función del escenario climático. Mientras que para el escenario RCP 4.5 se estima un ascenso de entre 0,23 m y 0,25 m, para el escenario RCP 8.5, se prevé una subida del nivel medio del mar de entre 0,33 m y 0,35 m.

4. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. Localización

Puerto de la Cruz es una ciudad y municipio español situado al norte de la isla de Tenerife, en la provincia de Santa Cruz de Tenerife, comunidad autónoma de Canarias, España (ver figura 9). Tiene una extensión de 8,73 km², siendo el municipio más pequeño de la comunidad y está limitado por los municipios Los Realejos y La Orotava. Se asienta en el frondoso Valle de La Orotava, una gran depresión de aproximadamente 150 km². Su costa de arrecifes de lava es acantilada, presenta rocas muy irregulares y protecciones costeras con tipologías diversas (roca, escollera, bloques de hormigón, etc.).



Figura 9. Localización de la ciudad Puerto de la Cruz. Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Tiene un puerto eminentemente pesquero y recreativo con un dique de 140 m de longitud de bloques de hormigón. Dispone de una línea de atraque de 218 m. Dada su localización y su configuración, este muelle solo permite la entrada de embarcaciones de pequeño porte que, en su gran mayoría permanecen varadas o fondeadas al abrigo del propio dique y del contradique (Puertos Canarios, s.f.). Al este, en la playa de San Telmo le sigue un espigón que servía como de escollera de embarcadero ٧ un dique hormigón que bordea todo el bajío de Martiánez.

Puerto de la Cruz es de Interés Turístico Nacional desde 1955. Tiene un alto perfil hotelero, densidad de restaurantes, comercios y alberga a más de 140 edificios históricos protegidos. Frente al mar se encuentra el antiguo puerto, la playa del muelle, La casa de la Real de Aduana del siglo XVII, la fortificación del siglo XVIII: Batería de Santa Bárbara, la Plaza de Europa, el ayuntamiento, el Antiguo convento de Santo Domingo, el mirador Punta del viento, las piscinas naturales de San Telmo, las playas de arena volcánica oscura, la Ermita de San Telmo, El casino de Taoro y el complejo de piscinas de agua salada: Lago Martiánez, todos estos lugares conectados con un paseo marítimo.

Presenta una alta concentración poblacional costera por la bondad de su clima y belleza paisajística. Esta ocupación del frente de mar se produce en terrenos no siempre adecuados (Luque, 2017).

La zona de estudio se centra al norte de la ciudad de Puerto de la Cruz. Se extiende por el norte hasta océano Atlántico, por el sur hasta la Calle de Valois, por el este hasta 250 m desde la playa de Martiánez y por oeste hasta la plaza de Europa. Las coordenadas de los limites se muestran en la figura 10.



Figura 10. Límites de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El lugar fue seleccionado por ser representativo de la zona urbana bien establecida en la interfaz entre la costa y los procesos tierra-mar-población.

4.2. Casos de estudio

De las 4 trayectorias RCP, en este trabajo se han analizado dos de estos cuatro escenarios: el RCP 4.5 representativo de un escenario de estabilización o muy probable y el RCP 8.5 el escenario más pesimista en cuanto al nivel de emisiones. Lo que da lugar a la evaluación de cinco casos de estudio, el escenario de referencia que representa al periodo histórico [1985-2005] y dos escenarios de emisiones futuras; RCP 4.5 y RCP 8.5, cada uno representado por los horizontes temporales [2026-2045] y [2081-2100], unidos a al ANMM no determinista.

Un resumen de los casos de estudio se muestra a continuación:

- 1. Escenario histórico, horizonte temporal [1985-2005] (periodo de referencia)
- 2. Escenario de RCP 4.5, horizonte temporal [2026-2045] (mitad de siglo).
- 3. Escenario de RCP 4.5, horizonte temporal [2081-2100] (final de siglo).
- 4. Escenario de RCP 8.5, horizonte temporal [2026-2045] (mitad de siglo).
- 5. Escenario de RCP 8.5 horizonte temporal [2081-2100] (final de siglo).

4.3. Caracterización del clima marítimo en aguas profundas

En este apartado se analizan las dinámicas marinas que contribuyen en gran medida a los riesgos climáticos costeros, debidos al fenómeno de inundación. Las variables objetivo son parámetros de estado de mar del oleaje y el NMM, MA y MM.

A continuación, se describen el clima marítimo en el punto [28.4395 -16.5605], al norte de Tenerife. Para su análisis estadístico se emplea el software de Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (AMEVA) desarrollado por el IH Cantabria.

Análisis estadístico de la serie Histórica. Periodo [1985-2005]. Régimen medio

De acuerdo con los histogramas, la media (μ) del periodo es de 11,45 s con una varianza (σ) de 2,58 s, mientras que para el caso de la Hs a la media le corresponde una altura ola de 1,76 m con una varianza 0,74 m. La zona de estudio presenta un comportamiento multimodal (un *sea* y un *swell*). El régimen habitual se define por el predominio de olas del nornordeste (NNE) generados por los vientos alisios con un Tp que oscila entre 7,0 s y 17 s y una Hs entre 0 a 6,0 m. También destaca un *swell* con dirección Noroeste (NO) caracterizado por un Tp alto entre 11 s y 21 s, ver figura 11, figura 12, figura 13 y figura 14.



Figura 11. Función de distribución acumulada de la serie histórica (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 12. Histograma de la serie histórica (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y (Derecha) Hs (m).



Figura 13. Histograma de densidad de la serie histórica (izquierda) Hs (m) y Dir (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 14. Rosa de oleaje de la serie histórica (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.

Análisis estadístico del RCP 4.5. Periodo [2026-2045]. Régimen medio

De acuerdo con los histogramas, la media (μ) del periodo es de 11,53 s con una varianza (σ) de 2,51 s, en el caso de la Hs a la media le corresponde Hs de 1,70 m con una varianza 0,71 m. La dirección predominante del oleaje sigue siendo el del nornordeste (NNE) con un Tp que oscila entre 7,0 s y 19 s y una Hs entre 0 a 6,0 m. También destaca un *swell* con dirección Noroeste (NO) caracterizado por un Tp alto entre 11 s y 21 s, ver figura 15, figura 16, figura 17 y figura 18.



Figura 15. Función de distribución acumulada del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 16. Histograma del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 17. Histograma de densidad del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 18. Rosa de oleaje del RCP 4.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.

Análisis estadístico del RCP 4.5. Periodo [2081-2100]. Régimen medio

De acuerdo con los histogramas, la media (μ) del periodo es de 11,59 s con una varianza (σ) de 2,36 s, en el caso de la Hs a la media le corresponde Hs de 1,69 m con una varianza 0,66 m. La dirección predominante del oleaje sigue siendo el del nornordeste (NNE) con un Tp que oscila entre 6,0 s y 18 s y una Hs entre 0 a 6,0 m. Destaca un *swell* con dirección Noroeste (NO) caracterizado por un Tp alto entre 8,0 s y 22 s, ver figura 19, figura 20, figura 21 y figura 22.



Figura 19. Función de distribución acumulada del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 20. Histograma del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 21. Histograma de densidad del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 22. Rosa de oleaje del RCP 4.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.

Análisis estadístico del RCP 8.5. Periodo [2026-2045]. Régimen medio

De acuerdo con los histogramas, la media (μ) del periodo es de 11,84 s con una varianza (σ) de 2,21 s, en el caso de la Hs a la media le corresponde Hs de 1,68 m con una varianza 0,71 m. La dirección predominante pasa a ser el Norte (N) con un Tp que oscila entre 6,0 s y 21 s y una Hs entre 0 a 7,0 m. Sigue destacando destaca un *swell* con dirección Noroeste (NO) caracterizado por un Tp alto entre 8,0 s y 22 s, ver figura 23, figura 24, figura 25 y figura 26.



Figura 23. Función de distribución acumulada del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 24. Histograma del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 25. Histograma de densidad del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 26. Rosa de oleaje del RCP 8.5. Periodo [2026-2045] (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.

Análisis estadístico del RCP 8.5. Periodo [2081-2100]. Régimen medio

De acuerdo con los histogramas, la media (μ) del periodo es de 11,58 s con una varianza (σ) de 2,32 s, en el caso de la Hs a la media le corresponde Hs de 1,64 m con una varianza 0,69 m. La dirección predominante del olejaje es el Norte (N) con un Tp que oscila entre 7,0 s y 19 s y una Hs entre 0 a 6,0 m. También destaca un *swell* con dirección Noroeste (NO) caracterizado por un Tp alto entre 11 s y 21 s, ver figura 27, figura 28, figura 29 y figura 30.



Figura 27. Función de distribución acumulada del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Resultado de AMEVA.



Figura 28. Histograma del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Resultados de AMEVA.



Figura 29. Histograma de densidad del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Resultado de AMEVA.



Figura 30. Rosa de oleaje del RCP 8.5. Periodo [2081-2100] (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.
Régimen extremal

El oleaje *off shore* en la costa de Puerto de la Cruz presenta diferencias en función de las estaciones. No obstante, hace que todas ellas se vean afectadas por un rasgo común, la presencia de los vientos Alisios y, por ende, los oleajes que estos generan. Estos propagan principalmente desde el noreste, estando sus características muy influenciadas la propia orografía, debido a la posible alteración de los vientos.

A continuación, se muestra el análisis extremal multianual y por estaciones de las 5 series climáticas. La tendencia en todos los casos de estudios es creciente. Las estaciones con mayor iniciativa de eventos extremos es invierno y primavera, excepto en el RCP 4.5 y 8.5 a final de siglo donde para periodos de retorno altos es invierno y otoño. La serie histórica alcanza su máxima altura de ola en invierno, estas oscilan entre 5,25 m y 8,55 m, ver figura 31. En la proyección RCP 4.5 de corto plazo destaca la temporada de invierno con alturas de olas entre 5,0 m y 10,5 m, sin embargo, en el largo plazo los resultados de invierno y primavera son muy parecidos, el mínimo de Hs oscila entre 4,17 m y 4,37 m y el máximo entre 7,36 m y 7,60 m, ver figura 32. En la proyección RCP 8.5 a corto plazo prevalece la incidencia del oleaje en invierno alcanzando alturas de olas significante entre 5,0 m y 8,0 m, mientras que en el corto plazo varía entre 4,60 m y 8,90 m, ver figura 33.



Figura 31. Análisis extremal de la serie Histórica. Periodo [1985-2005]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia.



Figura 32. Análisis extremal RCP 4.5. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia.



Figura 33. Análisis extremal del RCP 8.5. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Punto [28,4395] [-16,5605]. Fuente: Elaboración propia.

5. DOWNSCALING HÍBRIDO

5.1. Selección MAXDISS

Debido a la inviabilidad de propagar tantos estados de mar numéricamente para obtener resultados de olas en aguas poco profundas, deben reducirse las bases de datos de reanálisis oceánicas para aumentar la resolución espacial y simular el proceso de transformación de olas. El primer paso de la reducción de escala híbrida consiste en aplicar el algoritmo de máxima disimilitud (MAXDISS) para identificar una muestra representativa de la variabilidad climática en el punto de profundidades indefinidas. Dicho algoritmo inicia seleccionando un evento en la base de datos origen. Seguidamente, los eventos restantes son tomados secuencialmente con la condición de mayor disimilitud en la base de datos de partida respecto al subconjunto ya seleccionado (condición de máxima distancia en el espacio muestral formado por las variables [Hs, Tm, Dir., NM]) (Camus, Mendez, & Medina, 2011). El reducido número de casos seleccionados abarca la variabilidad del clima marino, garantizando que todos los posibles estados del mar estén incorporados y capturando incluso los eventos extremos. Debido al volumen de datos, se propone aplicar dicho algoritmo de forma recursiva y secuencial, lo que se ha denominado MAXDISS de MAXDISSes. Esto permite concatenar subconjuntos representativos de unas condiciones climáticas dadas, de forma que al aplicar el algoritmo sobre dichos subconjuntos se consiga una selección eficiente y fiable, ya que son representativas de la totalidad de periodos de referencia, escenarios y modelos climáticos (Lucio Fernández, Tomás Sampedro, & Losada Rodríguez, 2020).

El periodo de pico, aunque no se considera en la selección, se identifica en consonancia con los estados de mar seleccionados. En cuanto al tamaño del número de casos en este trabajo (dado que el nivel del mar se trata como una variable más de la selección) se propone utilizar n=1000. En cuanto al método en el periodo de referencia histórico, el nivel del mar es la combinación de la MM y MA, mientras que en los escenarios futuros se añade el ANMM.

Al subconjunto anterior se le aplica nuevamente el algoritmo MAXDISS, lo que da lugar a una muestra de tamaño n=100, ver figura 34, siendo esta la que se ejecuta numéricamente.



Figura 34. Estados de mar del periodo actual y proyecciones (color negro) y muestra seleccionada de tamaño n=100. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Propagación numérica del oleaje desde aguas profundas hasta la costa con el modelo SWAN

El segundo paso en el procedimiento consiste en propagar el subconjunto final (n=100) hasta la zona de estudio. El oleaje que se aproxima y propaga desde aguas indefinidas hacia la costa, tiende a experimentar efectos de transformación energética costera por la influencia de la batimetría, que se traducen en fenómenos de: refracción, difracción, asomeramiento, disipación de energía debida a la fricción con el fondo. En la zona cercana a la costa, donde el oleaje se encuentra con estructuras naturales y obras artificiales de protección, dichos procesos de trasformación se complementan con procesos de rotura de oleaje sobre playas y estructuras en talud, subsecuentes reflexiones parciales, y un mayor protagonismo de los efectos disipativos asociados a la fricción con el fondo costero (Tomás, y otros, 2017).

El litoral norte de Puerto de la Cruz alberga todos los procesos anteriormente mencionados, debido a las estructuras naturales y portuarias con tipologías variadas, que salpican el perímetro costero.

Para la propagación del oleaje se emplea el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore) usando la herramienta GUIH-SWAN (Díaz Hernández & Rodríguez Fernández, 2017). Este, es un modelo numérico de tercera generación que obtiene estimaciones realistas de los parámetros de olas (alturas, periodos y direcciones) en áreas costeras, lagos y estuarios para una configuración batimétrica específica y condiciones dadas de viento y corrientes. Es espectral y

soluciona la ecuación de balance de energía de olas considerando todas las fuentes y sumideros. Resuelve la difracción de forma aproximada y adecuadamente los procesos de refracción, asomeramiento, interacción oleacorriente, interacción no lineal ola-ola, y disipación por *whitecapping* sobre batimetrías reales (disipación por rotura o descrestamiento de la onda debido a la inestabilidad geométrica *(peralte) que presenta)* (Delft University of Technology, 2007) (Booij, Ris, & Holthuijsen, 1999).

Se alimenta al modelo con una topo-batimetría de 2,5 m x 2,5 m de resolución y establecen ocho puntos como forzamientos con datos horarios de oleaje (Hs, Tp y Dir.). Mediante dos mallas numéricas anidadas estructuradas (una general y otra de detalle) se propagan espectralmente los n=100 estados de mar seleccionados con el algoritmo MAXDISS. Para esto, es necesario definir dominios de ejecución con una resolución espacial acorde con los detalles batimétrico, contornos costeros a evaluar y la variabilidad de los procesos de transformación del oleaje. Dado que los gradientes espaciales de la altura de ola difieren en magnitud desde aguas profundas hasta la costa, parece adecuado utilizar diferentes tamaños de celdas en las mallas de cálculo. Se justifican 25 m en la general y 6,25 m en la de detalles, basándonos en pruebas llevadas a cabo para la calibración del modelo y optimización de los recursos computacionales, ver figura 35. El modelo ha ejecutado en el sistema de coordenadas universal en modo estacionario, considerando el fenómeno de whitecapping, la disipación por rotura del oleaje por fricción y por profundidad. En la figura 36 se muestra un esquema del montaje en SWAN.



Figura 35. Malla general (izquierda) y de detalle (derecha) numéricas estructuradas para la propagación del oleaje en el modelo SWAN en Puerto de la cruz. Fuente: Resultado de la herramienta GUIH-SWAN.



Figura 36. Esquema del montaje numérico para la propagación del oleaje en la herramienta GUIH-SWAN. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de los n=100 estados de mar ejecutados aportan mapas de Hs (m), Tp (s) y θ (°), siendo posible visualizar en ellos el comportamiento del oleaje a medida que se propaga a la costa, contando también con información espectral en distintas localizaciones de control, dispuesta en 10 puntos sobre la batimétrica -10 m y espaciados horizontalmente cada 100 m para captar la representatividad de la zona.

5.3. Reconstrucción del oleaje en los puntos objetivo: RBF

El último paso de la metodología de downscaling híbrido consiste en la reconstrucción de la totalidad del periodo de referencia y las proyecciones dinámicas en el litoral de Puerto de la Cruz, caracterizada por los 10 puntos de control, anteriormente mencionados. Tomando los resultados de la propagación de los casos n=100, se ajustan las funciones matemático-estadísticas para la transferencia analítica de todos los estados de mar desde aguas abiertas hasta la zona de estudio. Para ello se emplea la técnica de interpolación no lineal basada en las funciones de base radial (RBF), esquema muy conveniente para datos dispersos, multivariados donde las diferencias entre las series temporales propagadas y las reconstruidas con RBF son relativamente pequeñas. Este método RBF consiste en una suma ponderada de funciones básicas radialmente simétricas ubicadas en los puntos de datos (Camus, Mendez, & Medina, 2011). Permite obtener una función continua a partir de una serie de puntos y posteriormente inferir el valor de la función multivariante del espacio considerado (Hastie, Tibshirani, & Friedman).

En total se calcularán tantas funciones de aproximación RBF como parámetros de oleaje se hayan usado, para poder calcular dichas variables en cualquier otro punto del espacio. En este estudio se ha reconstruido mediante esta técnica los parámetros del oleaje, Hs y Dir. en cada uno de los 10 puntos costeros objetivo. La figura 37 contiene una comparación de la serie de oleaje series temporales propagadas y reconstruida en el punto de control cuatro.



Figura 37. Comparación de la serie de oleaje series temporales propagadas y reconstruida.

6. MODELADO DE LA INUNDACIÓN

6.2. Caracterización del clima marítimo en la costa. Régimen medio y extremal

De los 10 puntos de control en los que se obtienen los resultados de la propagación del oleaje en SWAN, se toma el punto 2 como ejemplo de caracterización climática en costa, mostrándose los resultados del régimen medio en el periodo de referencia y en el régimen extremal una comparación de los cinco casos de estudio.

En los histogramas la media (μ) del periodo es de 11,45 s con una varianza (σ) de 2,58 s, mientras que para el caso de la Hs a la media le corresponde 1,12 m con una varianza 0,48 m. La zona de estudio presenta un comportamiento multimodal (un *sea* y un *swell*). El régimen habitual se define por el predominio de olas del norte (N) generados por los alisios con un Tp que oscila entre 5,0 s y 19 s y una Hs entre 0 a 6,0 m ver figura 38, figura 39, figura 40 y figura 41.



Figura 38. Función de distribución acumulada de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Tp (s) y (derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 39. Histograma de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Dir. (°), (centro) Tp (s) y (Derecha) Hs (m).



Figura 40. Histograma de densidad de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Hs (m) y Dir. (°), (centro) Tp (s) y Dir. (°) y (Derecha) Hs (m) y Tp (s). Fuente: Resultado de AMEVA.



Figura 41. Rosa de oleaje de la serie histórica del punto 2 (izquierda) Tp (s) y (Derecha) Hs (m). Fuente: Resultado de AMEVA.

Para la caracterización del régimen extemal se hace una comparativa multianual las 5 series climáticas como se muestra en la figura 42. La tendencia en todos los casos de estudios es creciente. Los escenarios más pesimistas para periodos de Tr<10 años, en orden descendiente son: el histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo, donde destacan valores de Hs mayores a 3,5 m y menores a 4,5 m. Para Tr>10 años los escenarios con mayores Hs son: el RCP 4.5 a mitad de siglo, periodo histórico y RCP 8.5 a final de siglo, dichos valores oscilan entre 5,0 m y 7,0 m aproximadamente.



Figura 42. Análisis extremal de la serie Histórica del punto 2. Periodo [1985-2005]. Punto [28.4191] [-16.5481]. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Cálculo de la sobreelevación

Los principales elementos impulsores de la inundación costera son la MM, MA, el oleaje en forma de remonte (R_u) y el aumento del nivel medio del mar ANMM para los escenarios de CC. Estas variables se combinan dando lugar al nivel total de agua o por sus siglas en inglés *TWL*, este es el nivel que alcanza el mar cuando se produce un evento de inundación (Toimil, Losada, & Camus, 2016), ver Ecuación 1:

$$TWL = MM + MA + R_u + ANMM$$
 Ecuación 1

De las series climáticas comentadas en los apartados anteriores se tiene la MM, MA y el ANMM. En este caso, la contribución del oleaje al *TWL* se calcula como el *run-up* (Ru) del 2% para pendientes relativamente suaves, definido como la diferencia vertical entre el punto más alto de ascenso de las olas y el nivel de agua tranquila. Debido a la naturaleza estocástica de las olas entrantes cada ola dará un nivel de Ru diferente. Sus componentes se muestran en la ecuación 2. El enfoque de esta formulación incluye cierta seguridad (una desviación estándar) y puede utilizarse directamente para el diseño y la evaluación de estructuras costeras (van der Meer, y otros, 2018).

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0}$$
 Ecuación 2

donde

R_{u2%}: es la altura de escorrentía superada por el 2% de las olas entrantes (m) H_{m0}: es la altura de ola espectral (m)

- 1.65: es la variable estocástica
- γ_b : es la altura de escorrentía superada por el 2% de las olas entrantes (m)

 γ_f : es el factor de influencia para elementos de rugosidad en un talud (adimensional)

 γ_{β} : es el factor de influencia para ataque de olas oblicuas

 $\xi_{m-1,0}$: es el parámetro de ruptura

El parámetro de ruptura, similitud de oleaje o número de Iribarren se define como $tan\alpha/(H_{m0}/L_{m-1,0})^{\frac{1}{2}}$, donde $L_{m-1,0}$ es la longitud de onda del agua profunda $gT^{2}_{m-1,0}/(2\pi)$ y α es la pendiente de la cara frontal de la estructura y (van der Meer, y otros, 2018).

Para un mejor análisis de la zona de estudio se divide en 10 tramos en función de las estructuras de protección y actividad urbana e identifican de la siguiente manera:

- Tramo 1 (T1): Plaza de Europa
- Tramo 2 (T2): Policía y Ayuntamiento
- Tramo 3 (T3): oeste de la playa San Telmo
- Tramo 4 (T4): este de la Playa San Telmo y la Ermita San Telmo
- Tramo 5 (T5): Casino de Taoro y oeste del Lago Martiánez

- Tramo 6 (T6): Norte del Lago Martiánez
- Tramo 7 (T7): Isla del Lago Martiánez
- Tramo 8 (T8): este del Lago Martiánez y norte de la playa Martiánez
- Tramo 9 (T9): inicio del dique de escollera y sur de la playa Martiánez
- Tramo 10 (T10): final del dique de escollera

Los valores de pendiente se determinan como el desnivel de un perfil central según la división adoptada en la costa se muestra en la figura 43.



Figura 43. (Izquierda) Zona de estudio tramificada y secciones para determinar la pendiente. (Derecha) Perfiles longitudinales de las secciones para determinar la pendiente de la cara frontal de la estructura.

Con el objetivo de analizar la inundación costera asociada a eventos extremos de alta, media y baja probabilidad de ocurrencia, se ha obtenido el *TWL* de 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno para cada tramo (para mayor detalle ver los anexos). Los máximos anuales de cada una de las series de *TWL* presentes y futuras reconstruidas a lo largo de la costa se han ajustado a una función de extremos generalizada (GEV, por sus siglas en inglés) como se muestra en la Figura 44.

De los cinco casos de estudios el periodo de referencia es que presenta mayores niveles de *TWL* y el T2 (Policía y Ayuntamiento) es el más desfavorable, sus valores oscilan entre 5,92 m y 13,90 m. El periodo histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5, ambos a final de siglo, tienen tendencias y magnitudes similares, lo mismo sucede con los RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo. En general, los tramos con extremos de inundación en costa más bajos son: el T4 (este de la Playa San Telmo y la Ermita San Telmo), T5 (Casino de Taoro y oeste del Lago Martiánez), T9 (inicio del dique de escollera y sur de la playa Martiánez) y T10 (final del dique de escollera).



Figura 44. Análisis extremal del TWL de la serie Histórica del tramo 2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 45. Análisis extremal del TWL del RCP 4.5 del tramo 2. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Fuente: Elaboración propia.



Figura 46. Figura 47. Análisis extremal del TWL del RCP 8.5 del tramo 2. (Izquiera) Periodo [2026-2045]. (Derecha) Periodo [2081-2100]. Fuente: Elaboración propia.

6.4. Método de inundación

Las técnicas de los SIG con cierta resolución espacial se utilizan ampliamente para comprender los procesos de inundación de las costas en investigaciones científicas y la planificación espacial. Para simular la inundación costera se ha empleado el modelo de bañera mejorado (eBTM). Este se desarrolló en el software ESRI ArcGis 10.3.1. Es un modelo hidráulico bidimensional basado en el método de almacenamiento de celdas que proporciona mapas de inundación y profundidades de agua especifica de la ubicación relativa a la elevación de la superficie.

Su algoritmo permite tener en cuenta rasgos característicos de la topografía, como crestas y puntos bajos, derivados de un MDT de alta resolución. Este método es capaz de aproximar la extensión y la gravedad de las inundaciones relacionadas con las tormentas. Tiene incorporado una conectividad hidrológica, pendiente de la playa y considera la rugosidad de la superficie a partir de un rango, el cual desempeña un papel fundamental a la hora de influir en el movimiento del agua. Define como 0 a las superficies hidráulicamente muy rugosas y 1 a las muy lisas. Su objetivo es identifica las áreas que se encuentran por debajo de los niveles de inundación definidos a partir de una línea.

Requiere como dato de entrada la información topográfica de alta resolución. En este caso se emplea la misma topografía de la propagación del oleaje en SWAN discretizada cada 2,5 m x 2,5 m. La fuente de agua empleada como punto de partida para la modelización es el máximo *TWL* de cada periodo de retorno según el caso de estudio. Este nivel tiene origen en una línea tramificada definida en la costa como se muestra en la figura 48. Se toma como coeficiente de rugosidad o suavidad de la superficie un valor representativo de 0,5.



Figura 48. Zona de estudio con la línea de inundación que alimenta el modelo de bañera mejorado.

7. RESULTADOS

Comparación de mapas, áreas y profundidades de inundación, por escenario climático y periodos de retorno

Los resultados sugieren inundaciones características de una costa acantilada, donde las zonas bajas del litoral y la playa de Martiánez son las que sufren mayor impacto. Estas combinan oleaje, MM, MA y ANMM. A pesar de haberse modelado la inundación para ocho periodos de retorno (Tr= 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años) sólo se exponen los mapas de los Tr= 2, 5, y 10 años para los cinco escenarios climáticos, siendo estos considerados suficientes para apoyar las bases de medidas blandas de adaptación en la planificación territorial.

De la figura 49 a la figura 57 se muestra un catálogo de mapas de inundación de los cinco escenarios para el Tr=2, 5 y 10 años (para más detalles ver los anexos). Se puede observar para los distintos casos cómo evoluciona la pérdida de terrenos en zonas bajas. El periodo RCP 4.5 a final de siglo es el que mayor área de inundación y profundidad muestra. En este, el agua alcanza una parte importante turística de la ciudad por lo que, si no se actúa al respecto, será necesaria la protección de personas y activos con consecuencias significativas

sobre la economía de la región. Otros casos muy parecidos se dan en los escenarios histórico y RCP 4.8 a final de siglo pudiendo considerarse como el segundo y tercero más pesimista, respectivamente.

En el resto de los casos las zonas afectadas disminuyen. Esta condición se debe al descenso del oleaje en *off shore* y por consecuente del Ru por ser la componente de nivel asociada. Dicho descenso es mucho mayor que el aumento del ANMM, lo que se descompensa el *TWL* a una tendencia favorable y la inundación costera no se ve intensificada. También se identifican tres tramos que en ninguna de combinaciones reportan rebase, siendo estos los T1 (Plaza de Europa), T3 (oeste de la Playa de San Telmo) y T4 (este de la playa de San Telmo y la Ermita de San Telmo).



Figura 49. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el periodo histórico [1985-2005] con Tr=2 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 50. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 4.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo [2081-2100] con Tr=2 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 51. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 8.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo [2081-2100] con Tr=2 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 52. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el periodo histórico [1985-2005] con Tr=5 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 53. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 4.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo [2081-2100] con Tr= 5 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 54. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 8.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo [2081-2100] con Tr=5 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 55. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el periodo histórico [1985-2005] con Tr=10 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 56. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 4.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo [2081-2100] con Tr=10 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 57. Mapa de profundidad y área inundada en Puerto de la Cruz para el RCP 8.5 (derecha) a mitad de siglo [2026-2045] e (izquierda) a final de siglo [2081-2100] con Tr=10 años. Fuente: Elaboración propia.

La figura 58 muestra una comparación de las áreas de inundación entre casos climáticos de estudio y Tr (para más detalles consultar los anexos). La más extensa se da en el Tr=500 años, varía entre 417x10³ m² y 611x10³ m². La tendencia entre escenarios para los Tr=1 año y Tr=2 años es creciente siendo el RCP 4.5 a final de siglo el que alcanza un máximo de 271x10³ m² y 295x10³ m². A partir del Tr=5 años el comportamiento de los resultados es decreciente y el escenario más pesimista pasa a ser el periodo histórico y oscilan en el mismo

rango de valores los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a final de siglo. Igual sucede entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo. Para Tr bajos en el RCP 4.8 a final de siglo, el ANMM si es importante. Sin embargo, para Tr altos (como depende mucho del oleaje y este desciende), al compararse con el periodo histórico se elimina el efecto.

Respecto al escenario histórico, en los Tr=2 años, Tr=5 años y Tr=10 años, se encuentra el mayor porcentaje de disminución. El RCP 4.5 a mitad de siglo desciende entre 23% y 68%, el RCP 8.5 a mitad de siglo entre 30% y 70% y el RCP 8.5 a final de siglo entre 6% y 58%. Hay que destacar que el RCP 4.5 a final de siglo es el único que presenta un incremento del 99% en el Tr=1 año y 4% en el Tr=2 años, para el resto de los Tr disminuye entre 1% y 6%.

En las áreas totales por escenario climático, se espera una disminución del valor medio de 423x103 m² del clima histórico a valores medios de 415x103 m² y 388 x103 m² en los RCP 4.5 y RPC 8.5 respectivamente, ambos a final de siglo. En el caso de los RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo la media desciende a 233x103 m² y 208x103 m².







Figura 58. Área de inundación por Tr y escenario climático. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 59 muestra una comparación de la profundidad máxima alcanzada por Tr y casos climáticos de estudio (para más detalles ver los anexos). La tendencia entre escenarios para los Tr=1 año y Tr=2 años es creciente siendo el RCP 4.5 a mitad de siglo el que alcanza un máximo de 5,43 m y 5,73. A partir del Tr= 5 años el comportamiento de los resultados es decreciente y el escenario más pesimista pasa a ser el periodo histórico y oscilan en el mismo rango de valores los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a final de siglo. Igual sucede entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo.

Respecto al escenario histórico, en los Tr=1 años, Tr=2 años y Tr=5 años, se encuentra el mayor porcentaje de disminución. El RCP 4.5 a mitad de siglo desciende entre 22% y 38%, el RCP 8.5 a inicios es constante, un 32% y el RCP 8.5 a final de siglo entre 6% y 13%. Hay que destacar que el RCP 4.5 a final de

siglo es el único que presenta un incremento del 4% en el Tr=1 año y 2% en el Tr=2 años, para el resto de los Tr disminuye entre 1% y 7%.

En la profundidad por escenario climático, se espera una disminución del valor medio de 7,93 m del clima histórico a valores medios de 7,68 m y 7,21 m en los RCP 4.5 y RPC 8.5 respectivamente, ambos a final de siglo. En el caso de los RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo la media desciende a 5,77 m y 5,41 m.



Profundidad máxima por escenario climático para los Tr = 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 años 11 E 10 Profundidad máxima 9 8 7 6 5 4 3 RCR 8520822001 808 4.5 (2015-2015) 1,51208121001 11985-20051 851201520451 Escenarios (Años)

Figura 59. Profundidad máxima alcanzada por Tr y escenario climático. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 60 se muestra una comparación de las áreas de inundación por tramos y escenarios climáticos para periodos de corto plazo: Tr=2 años, Tr=5 años y Tr=10 años (para más detalles consultar los anexos). A medida que aumenta el Tr es mayor el área inundada. Para el escenario histórico y el RCP 4.5 a final de siglo los tramos más afectados son el T6 (norte del Lago Martiánez),

T7 (Isla del Lago Martiánez) y T8 (este del Lago Martiánez y norte de la playa Martiánez) y el área de inundación varía entre 2240 m² y 15307m². Los tramos que no presentan rebase son el T3 (oeste de la playa San Telmo) y T4 (este de la playa San Telmo y Ermita de San Telmo) en Tr=2 años, para el Tr= 5 años los T1 (Plaza de Europa), T3 y T4 y en el Tr=10 años solo el T3.

Todos los tramos inundados presentan un porcentaje de disminución del área respecto al escenario histórico, excepto los tramos del 5 (casino de Taoro y oeste de playa del) al 10 en los RCP 4.5 inicio y final de siglo, ver figura 61. Los tramos T1, T2 (Policía y Ayuntamiento) y T7 son lo que mayor porcentaje de disminución reportan, entre un 10% y 90% para el Tr=2 años. En el Tr= 5 años oscila entre 8% y 100% y para el caso de Tr=10 años un 3% y 100%.

Comparación de áreas y profundidades de inundación, por tramos según el escenario climático y los periodos de retorno 2, 5 y 10 años.



Figura 60. Área de inundación por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5 y 10 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 61. Porcentaje de variación del área de inundación respecto al periodo histórico por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5 y 10 años. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 62figura 60 se muestra una comparación de las profundidades medias de inundación por tramos y escenarios climáticos para periodos de corto plazo: Tr=2 años, Tr=5 años y Tr=10 años (para más detalles consultar los anexos). A medida que aumenta el Tr es mayor los niveles de inundación. Para el escenario histórico y el RCP 4.5 a final de siglo los tramos más afectados son el T5 (casino de Taoro y oeste del Lago Martiánez), T9 (inicio de la escollera y sur de la playa Martiánez) y T10 (final de la escollera) y la profundidad varía entre 4 m y 6 m. Los tramos T3 (oeste de la playa San Telmo) y T4 (este de la playa San Telmo y Ermita de San Telmo) como no se inundan no reportan calado, en el caso de Tr=10 años, es sólo el T4. Hay que destacar que los T1, T2 y T7 no siempre se ven afectados por los RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo.

En figura 63 se observa como los tramos 1, 2 (Policía y Ayuntamiento) y 7 son lo que mayor porcentaje de disminución reportan respecto al caso histórico, 100% para el Tr=2 años y Tr= 5 años. Para el Tr=10 años entre un 6,84% y 100% en los escenarios climáticos RCP 4.5 a inicio y final de siglo y RCP 8.5 a final de siglo. El T8 (este del Lago Martiánez y norte de la playa Martiánez) para el Tr=2 años es el único que en todos los escenarios climáticos incrementa su porcentaje, entre 2,68% y 8,83%. En el caso del Tr=5 años en todos los tramos hay incrementos significativos de la profundidad, siendo los T6, T9 y T10 los más afectados con un 198% y 422% de aumento. En el Tr=10 años sólo el tramo 1 reporta un aumento de nivel respecto al histórico y es para el escenario RCP 8.5 a final de siglo.



Figura 62. Profundidad media de inundación por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5 y 10 años. Fuente: Elaboración propia.



Figura 63. Porcentaje de variación de la profundidad media de inundación respecto al periodo histórico por tramo y escenario climático para los Tr=2, 5 y 10 años. Fuente: Elaboración propia.

8. MEDIDAS BLANDAS DE GESTIÓN LOCAL

En base a los resultados del trabajo se proponen estrategias de adaptación mediante medidas blandas. Es necesario establecer un sistema de alerta temprana sobre el oleaje y el nivel del mar que permitan pronosticar inundaciones en un lapso de 72 horas para salvaguardar y desalojar a las personas, bienes y actividades de la comunidad costera a tiempo. Prever la adecuación de las medidas urbanísticas del municipio y la elaboración e implementación de protocolos de acceso y evacuación en las zonas de los T2 y del T5 al T10, así como medidas de concienciación a residentes y visitantes a zonas menos afectadas como los T1 y T3. Vincular a la población y turistas con acciones de educación social mediante sesiones participativas. Incluir en el nuevo plan de reordenación del municipio los perímetros donde no se debe construir edificaciones susceptibles a la inundación costera, además del desplazamiento de la población más expuesta a zonas del interior. Revisar el sistema y drenaje pluvial para que no presente atascos y pueda evacuar todo el volumen de agua de la zona ante un momento crítico de inundación.

9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo se desarrolla una metodología dinámica estadística híbrida multiescenario a escala local para proyectar el impacto de inundación costera. Dicha metodología, integra el mejor conocimiento científico en materia de CC en costa, permitiendo una evaluación fiable de los impactos de CC y planteamiento de medidas de adaptación.

Se propone una valoración del clima a partir de 5 casos de estudios: un periodo de referencia histórico y dos proyecciones climáticas; RCP 4.5 y el RCP 8.5 a medio y final de siglo. Debido a la inviabilidad de propagar tantos estados de mar numéricamente para obtener resultados de olas en aguas poco profundas se reduce la escala mediante enfoque híbrido y la modelización a largo plazo del modelo CNRM-CM5 y escenarios, permitiendo captar la variabilidad del clima en el tiempo. Para caracterizar los procesos locales del oleaje en la costa se modelan las condiciones medias y extremales de las series climáticas en el litoral incluyendo la marea meteorológica, astronómica y el ANMM. Donde resulta que los escenarios más pesimistas para periodos de Tr<10 años, en orden descendiente son: el histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo con valores de Hs mayores a 3,5 m y menores a 4,5 m. Para Tr>10 años los escenarios con mayores Hs son: el RCP 4.5 a mitad de siglo, periodo histórico y RCP 8.5 a final de siglo con Hs entre 5,0 m y 7,0 m. Para definir la inundación la costa se determina el nivel del mar o TWL generado por eventos extremos siguiendo la metodología propuesta en (van der Meer, y otros, 2018). De los cinco casos de estudios, el periodo de referencia es que presenta mayores niveles de TWL y el T2 es el más desfavorable, sus valores oscilan entre 5,92 m y 13,90 m. El periodo histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5, ambos a final de siglo, tienen tendencias y magnitudes similares, lo mismo sucede con los RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo. En general, los tramos con extremos de inundación en costa más bajos son: el T4, T5, T9 y T10. Estos resultados junto al MDT de alta resolución y la rugosidad del terreno sirven de input al modelo bidimensional hidrodinámico de la bañera mejorado basado en SIG para obtener mapas de inundación para un conjunto de periodos de retorno y plantear las medidas blandas de adaptación en base a los resultados, los cuales se comentan a continuación.

El periodo RCP 4.5 a final de siglo es el que mayor área de inundación, seguido de los escenarios histórico y RCP 8.5 a final de siglo. En el resto de los casos (RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo) las zonas afectadas disminuyen. Esta condición se debe al descenso del oleaje y por consecuente del Ru, lo que no compensa el ANMM y la inundación costera no se ve intensificada. Se espera una disminución del valor medio del área inundada de 423x10³ m² del clima histórico a valores medios de 415x10³ m² y 388 x10³ m² en los RCP 4.5 y RPC 8.5 respectivamente, ambos a final de siglo. En el caso de los RCP 4.5 y RCP 8.5 a mitad de siglo la media desciende a 233x10³ m² y 208x10³ m². La tendencia entre escenarios para los Tr=1 año y Tr=2 años es creciente siendo el RCP 4.5 a final de siglo el que alcanza un máximo de 271x10³ m² y 295x10³ m². Para Tr bajos En el RCP 4.8 a final de siglo, el ANMM si es importante. Sin embargo, para Tr altos (como depende mucho del oleaje y este desciende), al compararse con el periodo histórico se elimina el efecto. La mayor extensión de inundación ocurre en el Tr=500 años y el área varía entre 417x10³ m² y 611x10³ m². Respecto al escenario histórico, en los Tr=2 años, Tr=5 años y Tr=10 años, se encuentra el mayor porcentaje de disminución. El RCP 4.5 a mitad de siglo desciende entre 23% y 68%, el RCP 8.5 a mitad de siglo entre 30% y 70% y el RCP 8.5 a final de siglo entre 6% y 58%. Hay que destacar que el RCP 4.5 a final de siglo es el único que presenta un incremento entre 1% y 99%.

Para el escenario histórico y el RCP 4.5 a final de siglo los tramos más afectados son el T5 (casino de Taoro y oeste del Lago Martiánez), T9 (inicio de la escollera y sur de la playa Martiánez) y T10 (final de la escollera) y la profundidad varía entre 4 m y 6 m. Los tramos T3 (oeste de la playa San Telmo) y T4 (este de la playa San Telmo y Ermita de San Telmo) como no se inundan no reportan calado, en el caso de Tr=10 años, es sólo el T4. Los tramos 1, 2 (Policía y Ayuntamiento) y 7 son lo que mayor porcentaje de disminución reportan respecto al caso Histórico, 100% para el Tr=2 años y Tr=5 años. Para el Tr=10 años entre

un 6,84% y 100% en los escenarios climáticos RCP 4.5 a inicio y final de siglo y RCP 8.5 a final de siglo. El T8 (este del Lago Martiánez y norte de la playa Martiánez) para el Tr=2 años es el único que en todos los escenarios climáticos incrementa su porcentaje, entre 2,68% y 8,83%. En el caso del Tr=5 años en todos los tramos hay incrementos significativos de la profundidad, siendo los T6, T9 y T10 los más afectados con un 198% y 422% de aumento. En el Tr=10 años sólo el tramo 1 reporta un aumento de nivel respecto al histórico y es para el escenario RCP 8.5 a final de siglo.

Los resultados anteriores se obtuvieron bajo hipótesis que pueden inferir incertidumbre. Ejemplo de estas es el empleo del máximo *TWL* por periodo de retorno y la mínima cota del frente marítimo para inundar la zona de estudio. También el uso de una rugosidad constante para todo el terreno. Incluir, que el modelo de bañera mejorado utilizado desprecia procesos físicos complejos como el ascenso y descenso del rebase, proyectando el área de inundación y calado para un instante de tiempo, donde ambas alcanzan valores máximos. Otra desventaja es que no tiene en cuenta los sistemas de drenaje ni la permeabilidad del suelo por lo que puede sobreestimar los resultados. Conociendo estas limitaciones se propone hacer futuros trabajos siguiendo la misma metodología e incluyendo las líneas de investigación que se comentan a continuación.

Como futuras líneas de investigación se propone emplear un modelo de propagación de olaje que caracterice a escala de detalle todos los procesos de transformación de las olas y calibrar los resultados. Estimar por varias ecuaciones el Ru y emplear la de menor porcentaje de error. Inundar con un modelo hidrodinámico 3D que tenga en cuenta los fenómenos tridimensionales y que resuelva la verticalidad. También sería necesario incluir la variabilidad espacial de la rugosidad y las diferentes cotas de inundación de la línea de costa. Además, de evaluar la velocidad de inundación y el tiempo de permanecía. Para resultados más realistas podría incluirse la evapotranspiración, lluvia, el sistema de drenaje pluvial y la infiltración del terreno.

68

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: Part I,. *Journal of Geophysical Research: Oceans,*, *C4*, 104. doi:10.1029/98JC02622
- Burton, I., Kates, R., & White, G. (1978). The Environment as Hazard. Oxford.
- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal. *Coastal Engineering*, *58 (9)*, 851-862. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.05.007
- Delft University of Technology. (2007). SWAN USER MANUAL. The Netherlands.
- Díaz Hernández, G., & Rodríguez Fernández, B. (2017). *Manual para el uso de la herramienta GUIH-SWAN.* Santander.
- García Herrera, L. M. (1981). Santa Cruz de Tenerife: la formación de la ciudad marginal. Santa Cruz de Tenerife.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (s.f.). *The Elements of Statiscal Learning. 2nd edition.*
- Instituto de Hidráulica Ambiental Universiad de Cantabria (IH Cantabria). (2021). Elaboracion de la evaluacion de impactos de inundación y erosion debidos al cambio climático en la costa Canaria y la asesoría en el estudio del riesgo asociado. Santander.
- IPCC. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lucio Fernández, D., Tomás Sampedro, A., & Losada Rodríguez, I. J. (2020). Desarrollo de una metodología para evaluar la proyección de los impactos del cambio climático sobre las obras de protección.
- Lucio, D., Tomás, A., L. Lara, J., & J. Losada, I. (2022). Projecting compound wave events in coastal areas under climate change.

- Luque, A. Y. (2017). Desastres naturales en Canarias. SÉMATA, Ciencias Sociales e Humanidades, 29, 67-89.
- Puertos Canarios . (s.f.). *Puertos Canarios*. Obtenido de https://puertoscanarios.es/project/puerto-de-la-cruz/

Puertos del Estado . (2011). Niveles de referencia de nivel del mar.

- Ramírez Pérez, M., Menéndez García, M., Camus Braña, P., & Losada Rodríguez, I. J. (2019). Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española. Santander, España.
- Toimil, A., Losada, I. J., & Camus, P. (2016). Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias. *RIBAGUA Revista Iberoamericana del Agua, 3*, 56-65. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.07.004
- Tomás, A., Díaz-Hernández, G., Rodríguez1, B., L. Lara, J., Molina2, R., Mans,
 C., . . J. Losada, I. (2017). Avances en la resolución conjunta de los procesos costeros y portuarios para la predicción de la agitación en la bahía de Algeciras. Santander. Obtenido de http://hdl.handle.net/10902/18793
- van der Meer, J. W., Allsop, N. W., Bruce, T., Bruce, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., . . . Zanuttigh, B. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures (EurOtop Manual).*

11.ANEXOS

Niveles de *TWL* para los 5 escenarios de estudio

TWL (m)	Histórico												
Tramo/Tr	1	2	5	10	20	25	50	75	100	200	300	400	500
1	7.50	7.84	8.91	9.62	10.29	10.51	11.17	11.56	11.83	12.48	12.87	13.14	13.35
2	7.83	8.18	9.29	10.02	10.73	10.95	11.64	12.04	12.32	13.00	13.40	13.68	13.90
3	4.14	4.33	4.91	5.29	5.65	5.77	6.13	6.34	6.48	6.84	7.04	7.19	7.30
4	2.85	2.98	3.36	3.61	3.86	3.93	4.17	4.31	4.41	4.64	4.78	4.88	4.95
5	3.16	3.32	3.80	4.12	4.42	4.52	4.82	4.99	5.12	5.41	5.59	5.71	5.81
6	4.22	4.37	4.84	5.15	5.45	5.55	5.84	6.01	6.13	6.42	6.59	6.71	6.81
7	4.77	4.99	5.65	6.09	6.51	6.64	7.06	7.30	7.47	7.87	8.11	8.28	8.41
8	4.44	4.62	5.19	5.57	5.93	6.04	6.39	6.60	6.74	7.09	7.29	7.44	7.55
9	3.43	3.57	3.99	4.26	4.53	4.61	4.87	5.03	5.13	5.39	5.54	5.65	5.73
10	3.55	3.68	4.09	4.36	4.61	4.69	4.95	5.09	5.19	5.44	5.59	5.69	5.77

TWL (m)	4.5 mitad de siglo												
Tramo/Tr	1	2	5	10	20	25	50	75	100	200	300	400	500
1	5.38	5.64	6.45	6.99	7.50	7.67	8.17	8.46	8.67	9.17	9.46	9.66	9.82
2	5.92	6.25	7.26	7.93	8.57	8.77	9.40	9.76	10.02	10.64	11.00	11.25	11.45
3	3.44	3.61	4.15	4.50	4.84	4.95	5.28	5.47	5.61	5.93	6.12	6.26	6.36
4	2.74	2.86	3.23	3.47	3.71	3.78	4.01	4.14	4.24	4.46	4.59	4.69	4.76
5	2.73	2.84	3.19	3.42	3.64	3.71	3.93	4.05	4.14	4.36	4.48	4.57	4.64
6	3.78	3.94	4.41	4.72	5.02	5.12	5.41	5.58	5.70	5.99	6.16	6.28	6.37
7	3.74	3.91	4.44	4.79	5.12	5.23	5.56	5.75	5.88	6.21	6.40	6.53	6.63
8	3.41	3.55	3.97	4.25	4.52	4.61	4.87	5.03	5.14	5.40	5.55	5.66	5.74
9	2.89	3.01	3.39	3.63	3.87	3.94	4.17	4.31	4.40	4.63	4.77	4.86	4.93
10	2.88	2.99	3.32	3.55	3.76	3.83	4.04	4.16	4.24	4.45	4.57	4.66	4.72

TWL (m)	4.5 final de siglo												
Tramo/Tr	1	2	5	10	20	25	50	75	100	200	300	400	500
1	7.57	7.86	8.74	9.33	9.89	10.06	10.61	10.93	11.15	11.70	12.01	12.24	12.41
2	7.99	8.29	9.23	9.85	10.44	10.63	11.21	11.55	11.79	12.36	12.70	12.94	13.12
3	4.57	4.74	5.26	5.61	5.94	6.04	6.37	6.56	6.69	7.01	7.20	7.33	7.44
4	3.48	3.60	3.98	4.24	4.48	4.56	4.79	4.93	5.03	5.27	5.40	5.50	5.58
5	3.68	3.80	4.18	4.44	4.68	4.76	5.00	5.14	5.24	5.47	5.61	5.71	5.79
6	4.93	5.07	5.52	5.81	6.09	6.18	6.46	6.62	6.74	7.01	7.17	7.28	7.37
7	5.13	5.29	5.81	6.15	6.48	6.58	6.90	7.09	7.22	7.53	7.72	7.85	7.95
8	4.76	4.92	5.41	5.73	6.04	6.14	6.44	6.62	6.74	7.04	7.21	7.34	7.43
9	3.93	4.05	4.43	4.68	4.92	4.99	5.23	5.36	5.46	5.69	5.83	5.92	6.00
10	4.03	4.15	4.52	4.77	5.01	5.09	5.32	5.46	5.55	5.78	5.92	6.01	6.09
TWL (m)		8.5 mitad de siglo											
----------	------	--------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------
Tramo/Tr	1	2	5	10	20	25	50	75	100	200	300	400	500
1	5.32	5.50	6.04	6.39	6.73	6.84	7.18	7.37	7.51	7.84	8.03	8.17	8.28
2	6.17	6.41	7.17	7.67	8.15	8.31	8.78	9.05	9.24	9.71	9.98	10.17	10.32
3	3.92	4.07	4.53	4.84	5.14	5.23	5.52	5.69	5.81	6.09	6.26	6.38	6.47
4	2.89	3.00	3.31	3.52	3.72	3.79	3.98	4.10	4.18	4.37	4.49	4.57	4.63
5	3.10	3.20	3.53	3.75	3.96	4.03	4.23	4.35	4.44	4.64	4.76	4.84	4.91
6	3.67	3.77	4.08	4.29	4.49	4.55	4.75	4.86	4.94	5.13	5.24	5.32	5.38
7	3.92	4.06	4.48	4.76	5.02	5.11	5.36	5.52	5.62	5.88	6.03	6.14	6.22
8	3.42	3.53	3.84	4.04	4.24	4.30	4.50	4.61	4.69	4.88	4.99	5.07	5.13
9	3.00	3.09	3.35	3.52	3.69	3.74	3.90	3.99	4.06	4.22	4.31	4.38	4.43
10	3.00	3.09	3.35	3.53	3.69	3.75	3.91	4.01	4.07	4.23	4.33	4.40	4.45

TWL (m)		8.5 final de siglo											
Tramo/Tr	1	2	5	10	20	25	50	75	100	200	300	400	500
1	6.26	6.52	7.30	7.83	8.32	8.48	8.97	9.25	9.46	9.94	10.22	10.42	10.58
2	7.12	7.48	8.58	9.31	10.01	10.23	10.91	11.31	11.59	12.27	12.66	12.94	13.16
3	4.52	4.74	5.41	5.86	6.29	6.42	6.84	7.09	7.26	7.67	7.91	8.09	8.22
4	3.67	3.81	4.25	4.54	4.82	4.90	5.17	5.33	5.44	5.71	5.87	5.98	6.07
5	3.76	3.92	4.41	4.73	5.05	5.14	5.45	5.63	5.75	6.05	6.23	6.35	6.45
6	4.90	5.04	5.47	5.76	6.04	6.12	6.39	6.55	6.66	6.92	7.08	7.19	7.27
7	4.99	5.17	5.73	6.09	6.44	6.56	6.90	7.10	7.24	7.58	7.78	7.92	8.03
8	4.39	4.55	5.03	5.35	5.66	5.76	6.06	6.24	6.36	6.66	6.83	6.96	7.05
9	3.99	4.12	4.35	4.43	4.48	4.49	4.51	4.52	4.53	4.54	4.54	4.54	4.54
10	3.92	4.04	4.28	4.38	4.44	4.46	4.49	4.51	4.52	4.54	4.55	4.55	4.56

Cota de la línea de inundación por tramos

	Respecto al			
	NM	Respec	to al cero hidı	rográfico
Tramo/Elevación	Z_mín. (m)	Z_mín. (m)	Z_máx.	Z_media
1	10.20	8.84	12.27	10.49
2	4.01	2.64	15.25	8.21
3	7.39	6.02	12.03	9.28
4	8.08	6.71	14.05	11.64
5	4.18	2.81	12.02	5.32
6	4.33	2.96	7.17	5.66
7	7.29	5.93	6.72	6.26
8	4.95	3.58	6.36	5.19
9	5.38	4.01	6.28	4.66
10	2.45	1.09	5.04	3.84



Mapas de inundación del escenario histórico y los Tr 1, 25, 50, 100 y 500







Mapa de inundación del escenario RCP 4.5 a mitad de siglo y los Tr 1, 25, 50, 100 y 500











Mapa de inundación del escenario RCP 4.5 a final de siglo y los Tr 1, 25, 50, 100 y 500











Mapa de inundación del escenario RCP 8.5 a mitad de siglo y los Tr 1, 25, 50, 100 y 500











Mapa de inundación del escenario RCP 8.5 a final de siglo y los Tr 1, 25, 50, 100 y 500











Área total de inundación para cada escenario climático por periodo de retorno

		Área total de inundación (x10 ³ m ²)												
Periodo/Tr	1	2	5	10	25	50	100	500						
Histórico [1985-2005]	136,2	284,5	362,6	404,1	442,9	482,9	527,9	611,7						
RCP 4.5 [2026-2045]	79,5	97,2	116,3	141,6	325,2	367,9	404,1	472,9						
RCP 4.5 [2081-2100]	271,5	295,3	359,9	402,4	429,3	456,2	496,0	573,3						
RCP 8.5 [2026-2045]	95,6	101,6	115,2	120,9	296,2	325,8	360,3	417,4						
RCP 8.5 [2081-2100]	114,4	118,5	314,5	363,6	413,6	441,3	480,1	575,4						

Profundidad máxima y mínima de inundación para cada escenario climático por periodo de retorno

		Profundidad mínima y máxima de inundación (m)														
Periodo/Tr		1	~ 4	2	5		10		25		50		1(00	500	
Histórico																
[1985-2005]	0,50	5,24	0,51	5,63	0,51	6,74	0,51	7,47	0,51	8,40	0,50	9,08	0,50	9,76	0,50	11,34
RCP 4.5																
[2026-2045]	0,51	3,23	0,50	3,66	0,52	4,67	0,50	5,34	0,50	6,21	0,50	6,84	0,50	7,46	0,51	8,90
RCP 4.5																
[2081-2100]	0,51	5,44	0,51	5,74	0,50	6,67	0,50	7,29	0,51	8,08	0,51	8,66	0,50	9,23	0,51	10,57
RCP 8.5																
[2026-2045]	0,50	3,58	0,51	3,83	0,50	4,58	0,51	5,09	0,50	5,75	0,50	6,22	0,51	6,69	0,51	7,77
RCP 8.5																
[2081-2100]	0,50	4,53	0,50	4,89	0,50	6,02	0,50	6,75	0,50	7,67	0,51	8,36	0,51	9,04	0,50	10,60

	Histórico [1985-2005]												
Tr			2			Ę	5		10				
	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área	
	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.	
Tramo	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	
1	1,36	1,12	0,89	216	2,47	0,81	0,81	111	3,20	0,98	0,53	2446	
2	1,89	0,79	0,52	1852	3,00	0,68	0,68	2458	3,73	2,45	0,82	2675	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1,37	0,99	0,61	900	
5	4,58	2,48	0,51	7482	5,69	0,95	0,95	7643	6,42	4,25	1,41	7757	
6	4,17	1,76	0,53	10026	5,28	0,52	0,52	12364	6,01	2,97	0,54	15057	
7	3,55	1,04	0,51	12222	5,07	0,56	0,56	24216	5,80	2,27	0,51	28683	
8	4,64	1,69	0,51	14788	5,75	0,52	0,52	23193	6,48	2,65	0,52	28957	
9	5,07	3,00	0,63	7917	6,18	0,76	0,76	8426	6,91	4,60	0,64	8688	
10	5,07	3,24	1,38	2327	6,18	0,78	0,78	2580	6,91	4,59	1,00	2849	

Resultados por tramos para cada escenario climático y los Tr= 2, 5, 10 años

	RCP 4.5 [2026-2045]													
Tr			2			Ę	5		10					
	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área		
	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.		
Tramo	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m)	(m ²)		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1,63	0,66	0,50	802		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	2,64	1,75	0,50	2443	3,65	1,93	0,59	5997	4,32	2,49	0,50	6420		
6	2,23	0,99	0,50	1649	3,24	1,62	0,61	4788	3,91	1,64	0,50	8714		
7	0	0	0	0	0	0	0	0	2,81	0,86	0,50	9040		
8	2,70	1,73	0,81	1720	3,71	1,73	0,52	5089	4,38	1,55	0,50	13101		
9	3,13	1,98	0,65	4117	4,14	2,45	0,52	6326	4,81	2,78	0,51	7754		
10	3,13	2,04	0,52	1139	4,14	2,37	0,52	2198	4,81	3,01	1,19	2296		

	RCP 4,5 [2081-2100]													
Tr			2				5		10					
	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.			
	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	Área inund.		
Tramo	(m)	(m)	(m)	(m²)	(m)	(m)	(m)	(m²)	(m)	(m)	(m)	(m²)		
1	1,47	1,15	0,87	25	2,40	1,51	0,754	101	3,02	0,92	0,53	1767		
2	2,00	0,88	0,52	204	2,93	1,75	0,734	2429	3,55	2,31	0,80	2593		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1,19	0,89	0,57	709		
5	4,69	2,58	0,62	7494	5,62	3,49	0,894	7643	6,24	4,08	1,23	7739		
6	4,28	1,86	0,60	10200	5,21	2,55	0,524	12150	5,83	2,84	0,51	14700		
7	3,66	1,13	0,51	12691	5,00	1,67	0,554	23939	5,62	2,11	0,50	28292		
8	4,75	1,77	0,53	15307	5,68	2,18	0,504	2287	6,30	2,58	0,51	27449		
9	5,18	3,09	0,51	7964	6,11	3,90	0,694	8419	6,73	4,45	0,80	8641		
10	5,18	3,34	1,48	2346	6,11	4,09	0,724	2562	6,73	4,46	0,92	2805		

				R	CP 8.5	5 [2026	-2045]					
Tr		2	2			:	5				10	
	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área
	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.
Tramo	(m)	(m)	(m)	(m²)	(m)	(m)	(m)	(m²)	(m)	(m)	(m)	(m²)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.53	0.53	0.53	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.81	1.58	0.51	345	3.56	1.86	0.50	5922	4.07	2.33	0.85	6103
6	2.40	0.96	0.51	2953	3.15	1.54	0.52	4742	3.66	1.92	0.59	5545
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2.87	1.81	0.61	1932	3.62	1.69	0.51	4877	4.13	1.90	0.51	6452
9	3.30	2.10	0.66	4315	4.05	2.44	0.54	6026	4.56	2.60	0.51	7400
10	3.30	2.02	0.56	1362	4.05	2.32	0.65	2132	4.56	2.76	0.94	2271

	RCP 8.5 [2081-2100]													
Tr			2				5		10					
	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área	Prof.	Prof.	Prof.	Área		
	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.	máx.	med.	mín.	inund.		
Tramo	(m)	(m)	(m)	(m²)	(m)	(m)	(m)	(m2)	(m)	(m)	(m)	(m ²)		
1	0	0	0	0	1.75	1.25	0,841	48	2.48	1.59	0,83	111		
2	0	0	0	0	2.28	1.13	0,641	2254	3,01	1.81	0,58	2479		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,63	0.60	0,56	21		
5	3.87	2.14	0.65	6062	4.97	2.85	0,891	7550	5,7	3.56	0,97	7647		
6	3.46	1.79	0.52	5119	4.56	2.07	0,552	10778	5.29	2.59	0,5	12427		
7	0	0	0	0	4.35	1.25	0,501	17454	5.08	1.73	0,51	24366		
8	3.93	1.88	0.57	5509	5.03	1.91	0,501	17205	5,76	2.22	0,51	23295		
9	4.36	2.52	0.50	6927	5.46	3.35	0,791	8064	6.19	3.97	0,77	8438		
10	4.36	2.58	0.74	2240	5.46	3.60	1.47	2395	6.19	4.15	0,8	2580		