

Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil

Metodologías basadas en modelado numérico para el análisis del efecto de la subida del nivel medio del mar en la hidrodinámica y la distribución de salinidad de estuarios

Autor: M^a Antonia Gutiérrez Alvear

Tutor: Alejandro López Ruiz

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

**Metodologías basadas en modelado numérico
para el análisis del efecto de la subida del nivel
medio del mar en la hidrodinámica y la
distribución de salinidad de estuarios**

Autor:

M^a Antonia Gutiérrez Alvear

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Titular

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Metodologías basadas en modelado numérico para el análisis del efecto de la subida del nivel medio del mar en la hidrodinámica y la distribución de salinidad de estuarios

Autor: M^a Antonia Gutiérrez Alvear
Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Con este trabajo se termina una etapa, y no quería dejar de agradecer a todos aquellos que lo han hecho posible.

Agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional, sin los que nada de esto hubiera sido posible.

Agradecer a mis amigos, especialmente a los que me ha dado la carrera, esta etapa no hubiese sido igual sin ellos.

Y agradecer también a mis profesores, que me han ayudado en mi desarrollo académico. Especialmente quería agradecer a Alejandro y a Guille, por su apoyo y su continua disposición a ayudarme y a guiarme en el proyecto.

Resumen

Los estuarios aluviales se definen como la transición entre el río y el mar. Pero el interés de los estuarios no reside en su definición, sino en todo de lo que de él depende. La variabilidad temporal de la salinidad que presenta les confiere unas condiciones ambientales únicas. Sus características y los hábitats únicos que desarrolla favorecen que la flora y la fauna de los estuarios sean extremadamente ricas. Además suelen ser zonas con suelos muy fértiles, llanas y con agua dulce, por lo que constituyen escenarios propicios para la agricultura. Además, si son navegables, pueden constituir un importante medio de comunicación del mar con la tierra.

Sin embargo, la gran riqueza que estos sistemas poseen lo hacen a su vez frágiles frente a cambios en su hidrodinámica. En efecto, actividades humanas (construcción de presas, dragado del lecho...) o naturales (sequías, subida del nivel medio del mar...) alteran su equilibrio y pueden tener consecuencias negativas para todo lo que se desarrolla a su alrededor .

En este sentido, el cambio climático supone un riesgo tanto a escala global como a escala reducida. Particularmente, los estuarios pueden verse afectados por los cambios que se están produciendo en el clima, tales como el aumento de las precipitaciones, las sequías, la acidificación del mar, la subida del nivel medio del mar, etc. En concreto, la subida del nivel medio del mar es lo que interesa principalmente en este proyecto. Y en consecuencia, la influencia que este parámetro puede tener en el desarrollo de la hidrodinámica y en la distribución de salinidad del estuario .

En esta línea, uno de los objetivos principales del trabajo consiste en el ajuste de un modelo numérico de estuario aluvial, construido bajo las hipótesis de estuario ideal. Se necesita hacerlo eficiente desde el punto de vista computacional, capaz de simular escenarios con horizontes temporales de decenas de años. Y hacerlo eficaz desde el punto de vista de resultados, capaz de generarlos acordes al comportamiento típico de los estuarios sobre los que se basa. Una vez logrado este objetivo, la herramienta se empleará para el estudio del comportamiento de los estuarios frente a una serie de escenarios futuros. Estos escenarios están caracterizados por un incremento del nivel medio del mar diferente para cada uno de ellos.

Con el propósito de alcanzar dichos objetivos, se procederá, en primer lugar, a describir el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) y sus previsiones. El IPCC es el órgano principal en materia de cambio climático a nivel global. Está compuesto por un grupo internacional de científicos, expertos en materia de cambio climático, que elaboran evaluaciones del cambio climático, sus causas, previsiones, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. Dada la autoridad que se le reconoce a nivel internacional, en el trabajo se emplearán proyecciones de subida del nivel medio del mar del IPCC. Para justificar su empleo se describirá igualmente su método de trabajo.

El modelo final debe predecir un comportamiento del estuario acorde a unos patrones teóricos. Con esta finalidad, se definirá la hidrodinámica típica de los estuarios aluviales y las características típicas de los estuarios ideales, sobre cuyas bases descansa el modelo original que se adaptará.

Para lograr el primer objetivo se adaptará un modelo ya construido ([Martín-Llanes and López-Ruiz, 2024]) para optimizar su eficiencia desde el punto de vista computacional, de manera que permita realizar simulaciones de gran periodo de cálculo en menos tiempo. Se describirán las técnicas diseñadas y empleadas para reducir las necesidades de cálculo y el tiempo de simulación, manteniendo la precisión de los resultados.

Finalmente, se empleará la herramienta para predecir los efectos que distintos valores de subida del nivel medio del mar pueden ocasionar en la hidrodinámica y en la distribución de salinidad de los estuarios.

Los resultados y las conclusiones que se derivan del trabajo permiten comprobar la eficacia del modelo y la mejora en la eficiencia computacional. Además, permiten concluir que un aumento del nivel medio del

mar podría alterar la hidrodinámica de los estuarios y su distribución de salinidad, aumentando el alcance de la intrusión salina y aumentando el nivel medio del agua en el mismo, lo cuál puede tener un impacto significativo en estos sistemas ambientales y sociales.

Abstract

Alluvial estuaries are defined as the transition between the river and the sea. But the interest of estuaries lies not in their definition, but in everything that depends on it. The temporal variability of salinity gives them unique environmental conditions. Their characteristics and the unique habitats they develop make the flora and fauna of estuaries extremely rich. In addition, they are usually areas with very fertile soils, flat and fresh water, making them suitable for agriculture. Moreover, if they are navigable, they can be an important means of communication between the sea and the land.

However, the great richness of these systems also makes them fragile to changes in their hydrodynamics. Indeed, human activities (construction of dams, dredging of the bed, etc.) or natural activities (droughts, rise in the average sea level, etc.) alter their equilibrium and can have negative consequences for everything that develops around them.

In this sense, climate change poses a risk at both the global and the small scale. Estuaries may be affected by changes in the climate, such as increased precipitation, droughts, sea acidification, rising mean sea level, etc. In particular, sea level rise is the main focus of interest in this project. And consequently, the influence that this parameter may have on the development of the hydrodynamics and the distribution of salinity in the estuary.

Accordingly, one of the main objectives of this work consists in the adjustment of a numerical model of an alluvial estuary, built under the hypothesis of an ideal estuary. It is necessary to make it computationally efficient, capable of simulating scenarios with time horizons of decades of years. And to make it effective from the point of view of results, capable of generating them in accordance with the typical behaviour of the estuaries on which it is based. Once this objective has been achieved, the tool will be used to study the behaviour of estuaries under a series of future scenarios. These scenarios are characterised by a different increase in mean sea level for each of them.

In order to achieve these objectives, we will first describe the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) and its projections. The IPCC is the world's leading body on climate change. It is composed of an international group of scientists, experts on climate change, who produce assessments of climate change, its causes, projections, potential impacts and response strategies. Given its authority at the international level, this work will use projections of mean sea level rise from the IPCC. Their method of work will also be described to justify their use.

The final model should predict the behaviour of the estuary according to theoretical patterns. To this end, the typical hydrodynamics of alluvial estuaries and the typical characteristics of ideal estuaries will be defined, upon which the original model to be adapted is based.

To achieve the first objective, an already developed model ([Martín-Llanes and López-Ruiz, 2024]) will be adapted to optimise its computational efficiency, to allow simulations with long computational times to be carried out in a shorter period of time. The techniques designed and employed to reduce computational requirements and simulation time while maintaining the accuracy of the results will be described.

Finally, this tool will be used to predict the effects that different values of the rise in mean sea level may have on the hydrodynamics and salinity distribution of estuaries.

The results and conclusions derived from the work allow to validate the effectiveness of the model and the improvement in computational efficiency. Furthermore, they also allow concluding that a rise in mean sea level could alter the hydrodynamics of estuaries and their distribution of salinity, increasing the extent of salt intrusion and increasing the mean water level in the estuary, which can have a significant impact on these environmental and social systems.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
1 Introducción	1
1.1 Cambio climático y su impacto en los estuarios	1
1.2 Objetivos generales	2
1.3 Objetivos específicos	3
2 Cambio climático y proyecciones de subida del nivel de mar	5
2.1 <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	5
2.1.1 IPCC	5
2.1.2 Grupos de Trabajo del IPCC	5
2.2 Cambio climático	6
2.3 Proyecciones de subida del nivel del mar	7
2.3.1 Escenarios socioeconómicos (SSP)	7
2.3.2 <i>Global Earth systems models</i>	8
2.3.3 Incertidumbre y probabilidad de los datos	8
2.4 Resultados de las proyecciones de subida del nivel del mar	10
3 Hidrodinámica de estuarios aluviales	13
3.1 Introducción a los estuarios aluviales	13
3.2 Geometría de los estuarios aluviales	13
3.3 Salinidad en estuarios aluviales	15
3.3.1 Procesos de mezcla	15
3.3.2 Intrusión salina	15
3.3.3 Parámetros característicos de estuarios	15
3.4 Estuarios ideales	16
4 Metodología	19
4.1 Escenarios de estudio	19
4.2 Modelo numérico	20
4.2.1 Programa Delft 3D	20
4.2.2 Geometría en planta y batimetría	21
4.2.3 Mallado y resolución	22
<i>DDBoundaries</i>	23
Discretización vertical	23
Análisis de comprobación	25
4.2.4 Parámetros físicos y numéricos	25
4.3 Condiciones de contorno e iniciales	26
4.3.1 Condiciones de contorno	26
4.3.2 Condiciones iniciales	27

4.4	Diseño experimental	28
4.4.1	Alternativas para la reducción del coste computacional	28
4.4.2	Puntos de observación	32
4.4.3	Diseño experimental	32
5	Resultados	35
5.1	Hidrodinámica	35
5.1.1	Nivel del mar	35
5.1.2	Velocidad	38
5.1.3	Armónicos de marea	39
5.1.4	Diferencia de fases y asimetría	41
5.2	Salinidad	44
5.2.1	Intrusión salina	44
5.2.2	Distribución de salinidad	47
5.2.3	Estratificación y mecanismos de mezcla	51
6	Conclusiones	53
	<i>Índice de Figuras</i>	55
	<i>Índice de Tablas</i>	57
	<i>Bibliografía</i>	59

1 Introducción

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos [Organización de las Naciones Unidas,]

Actualmente existe una preocupación cada vez mayor relacionada con el cambio climático, que afecta o, afectará, inevitablemente, la forma en la que la sociedad se desarrolla. Si bien el cambio climático ha existido desde el inicio, y hay evidencias que así lo demuestran, la realidad es que el calentamiento actual está ocurriendo a un ritmo no visto en los últimos 10.000 años [R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), 2014] y se ha consensuado que gran causa de ello es la actividad humana que se ha ido desarrollando desde mediados del siglo XIX.

Sequías intensas, escasez de agua, incendios graves, aumento del nivel del mar, inundaciones, deshielo de los polos, tormentas catastróficas y disminución de la biodiversidad [Organización de las Naciones Unidas,] son algunas de las consecuencias que trae consigo el cambio climático actual y a las que se deberá hacer frente con los conocimientos y la tecnología de los que se dispone. Particularmente, el aumento del nivel medio del mar supone un riesgo importante no solo a nivel global, sino también a escala local. Ejemplo de ello son los estuarios, que conforman ecosistemas únicos, de gran importancia tanto para la vida acuática como para los seres humanos. La afección de dichos fenómenos a los estuarios podría, (y ya está empezando a) propiciar consecuencias negativas para todas las especies y actividades que en ellos se desarrollan.

Por todo ello, es necesario ampliar los conocimientos sobre el comportamiento de los estuarios y la manera en que el cambio climático afectará a su desarrollo, para poder trabajar en soluciones que le hagan frente y lo gestionen. Y en ese sentido, el propósito de este proyecto es aportar conocimiento a este tema y ayudar a mejorar las herramientas que se disponen para seguir trabajando en ello.

1.1 Cambio climático y su impacto en los estuarios

Se define clima como las condiciones habituales de un lugar, en una escala temporal correspondiente a varias décadas, distinguiéndose del tiempo en la escala temporal en la que se mide: son condiciones meteorológicas que cambian en pocos minutos, horas, días o semanas. El cambio climático ocurre cuando las condiciones que definen el clima varían, por causas naturales o por la actividad humana.

El cambio climático ha existido desde siempre. Fluctuaciones en las temperaturas medias provocadas por los periodos de hielos y deshielo, por las glaciaciones y los periodos más cálidos, han ido variando la temperatura global de la Tierra o el contenido de CO_2 atmosférico. Y así lo demuestra la paleoclimatología, que obtiene información sobre el clima pasado, gracias al estudio de los registros climatológicos de hace cientos o millones de años. Por ejemplo, tomar muestras de anillos de árboles, corales, sedimentos y hielo. Midiendo la anchura, la composición química y la estructura física de cada capa, los científicos pueden deducir las condiciones existentes cuando se formaron cada una de ellas [Climate.gov,].

Sin embargo, la comunidad científica ha llegado al consenso de que el cambio climático actual es fruto principalmente de las actividades humanas, que provocan los gases de efecto invernadero que incrementan la capacidad de la atmósfera terrestre para retener calor, dando lugar al fenómeno del calentamiento global [Sarah Connors (WGI TSU) and Co-Chair), 2021]. En efecto, el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, ver apartado 2.2) llegó a la conclusión y evidenció que las actividades de los seres humanos han modificado el clima. Actualmente se tiene una mayor cantidad de datos, de modelos climáticos y conocimiento más detallado de los cambios que se sucedieron en el pasado y

de las proyecciones a futuro, algo que ha permitido al IPCC confirmar y reforzar dichas conclusiones en su último informe.

No obstante, la importancia de todo esto radica en los grandes, rápidos e intensos cambios que se están produciendo en la Tierra como consecuencia de este calentamiento global. El aumento de la temperatura media de la superficie terrestre, el aumento de las lluvias sobre la superficie terrestre, la migración de especies, el derretimiento de partes congeladas de la Tierra, la disminución de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, el aumento del nivel del mar o la acidificación de los océanos son algunos de los cambios que se están observando. Y este calentamiento continuará en los años futuros hasta que las temperaturas puedan estabilizarse, siempre y cuando se tomen medidas para pararlo [Sarah Connors (WGI TSU) and Co-Chair], 2021]. Mientras, se hace necesario estudiar las consecuencias que estos grandes cambios provocan en un periodo de tiempo tan corto y estudiar posibles soluciones para gestionarlos.

El presente trabajo intenta aportar información sobre las consecuencias que el cambio climático tiene en un área específica de la ciencia, en la hidrodinámica de los estuarios.

Según Savenije [Savenije, 2005], el estuario es la transición entre el río y el mar, es la confluencia de dos cuerpos de agua totalmente diferentes: un agua salada y un agua dulce. Esta interferencia provoca una zona con variaciones temporales de salinidad influenciada tanto por las mareas como por las descargas fluviales, lo que les confiere condiciones ambientales únicas y diversas. Los estuarios y los humedales que los rodean se encuentran entre los ecosistemas más productivos del mundo y entre los más poblados, ya que más de la mitad de la humanidad habita en sus costas. Al ser la interacción entre dos sistemas adopta una hidráulica, morfología y características biológicas que lo hacen únicos. Constituye un lugar crucial de alimentación y reproducción para muchas formas de vida. Debido a estas características típicas y a sus hábitats únicos, el estuario desempeña un papel importante en el ciclo vital de numerosas especies. La flora y la fauna de los estuarios son extremadamente ricas y la zona de influencia a través de la migración de especies es amplia.

Por otro lado, para el hombre, los estuarios siempre han sido importantes, tanto como fuente de alimentos como de enlace de transporte entre el río y el mar. Además, las tierras que bordean los estuarios suelen tener un excelente potencial para la agricultura: los suelos son fértiles, la tierra es llana y, en principio, se dispone de agua dulce. De ahí que las zonas más densamente pobladas del mundo estén situadas en zonas costeras cercanas a los estuarios.

La gran riqueza animal y biológica que estos sistemas poseen lo hacen a su vez frágiles frente a cambios en su hidrodinámica. Actividades humanas como la construcción de presas, que disminuyan la descarga fluvial, dragados del lecho, que aumente el calado del agua, construcción de infraestructuras con riesgo de contaminación, que contaminen el agua; o causas naturales como el aumento de las precipitaciones, que aumente la descarga fluvial, el aumento del nivel medio del mar, que incremente el prisma marino, el aumento del dióxido de carbono que provoque la acidificación del agua; pueden alterar el equilibrio en la hidrodinámica de los estuarios, y en consecuencia, en las especies y actividades que en él se desarrollan. Por ello, es necesario tener toda la información posible acerca de la física que se desarrolla en ellos antes de cualquier actuación, y es necesario desarrollar herramientas que permitan avanzar en la investigación de los efectos que estas causas puedan tener, de cara a buscar posibles soluciones y gestionar el problema.

1.2 Objetivos generales

Con tal propósito, los objetivos principales de este trabajo son: ajustar un modelo numérico que permita predecir los efectos que se producen en los estuarios resultado de la subida del nivel medio del mar, y emplear dicha herramienta para analizar el efecto de la subida del nivel medio del mar en la hidrodinámica y particularmente en la distribución de salinidad de estuarios.

La primera parte del proyecto pretende ajustar el modelo numérico de estuario iluvial implementado por [Martín-Llanes and López-Ruiz, 2024] para hacerlo óptimo computacionalmente de manera que pueda simular proyecciones de subida del nivel del mar en periodos de duración del orden de decenas de años. En este sentido se pretende, en un primer intento, conseguir un modelo numérico que sea, por un lado, computacionalmente eficiente para simular escenarios de años de duración, y por otro lado, capaz de proyectar correctamente la subida del nivel medio del mar y de predecir sus efectos. En resumen, se pretende continuar en el desarrollo de una herramienta numérica de predicción capaz de reproducir el comportamiento de los estuarios y que sea extrapolable a distintos campos de aplicación.

La segunda parte del modelo pretende emplear dicha herramienta para analizar los efectos que esta consecuencia del cambio climático provoca en la hidrodinámica y en la distribución de salinidad del estuario.

1.3 Objetivos específicos

Para conseguir alcanzar los propósitos mencionados con anterioridad, el documento se va a estructurar de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se describirá el principal organismo internacional en materia de cambio climático, el IPCC. Se analizarán las conclusiones derivadas del cambio climático junto con la metodología de trabajo empleada para obtener las conclusiones de sus informes y las predicciones futuras que plantea. Todo ello con la finalidad de justificar el empleo de sus predicciones del nivel medio del mar en este trabajo.
2. En segundo lugar, se describirá el conocimiento acerca de la hidrodinámica de los estuarios para contemplar los resultados que se pretenden obtener de las simulaciones.
3. En tercer lugar, se narran las bases del modelo numérico de partida y se plantearán las diferentes metodologías empleadas para ajustarlo a un modelo más eficaz desde el punto de vista computacional. En este punto se pretende conseguir elaborar un modelo definitivo ajustado que permita el cálculo de las grandes simulaciones que debe reproducir.
4. Finalmente, se planteará el diseño experimental, cuyo objetivo es proporcionar las simulaciones que se emplearán para el cálculo del efecto de la subida del nivel medio del mar en la hidrodinámica de los estuarios a través del modelo numérico ajustado. Tras su lanzamiento, se estudiarán sus efectos y se sacarán las conclusiones obtenidas del estudio.

2 Cambio climático y proyecciones de subida del nivel de mar

Como bien se ha explicado en la introducción, el cambio climático es uno de los principales retos a los que se enfrenta la sociedad actualmente. Particularmente, es la subida del nivel medio del mar provocada por distintos factores lo que interesa especialmente en este proyecto, pues su impacto puede traer consigo grandes impactos en el dominio costero. El principal organismo encargado del estudio del cambio climático y sus efectos es el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Dada su autoridad reconocida internacionalmente, las predicciones de la subida del nivel del mar que se emplearán para el estudio de sus efectos se seleccionarán de sus estudios.

Es necesario aportar información sobre los datos que se van a utilizar para su desarrollo, particularmente de las proyecciones futuras de la subida del nivel medio del mar, entender de donde provienen dichos datos y la confianza que se puede depositar en ellos, pues de ellos dependerá la confianza de los resultados que se obtengan de este proyecto.

Por eso, en este apartado se definirá el IPCC junto con la metodología empleada para la elaboración de sus informes, además de una breve descripción de las características del cambio climático pasado, presente y futuro que ponen el punto de inicio a este estudio.

2.1 Intergovernmental Panel on Climate Change

2.1.1 IPCC

El IPCC es un grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático creado para facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta [IPCC, 2024].

Actualmente, el IPCC trabaja en el sexto ciclo de evaluación (*AR6 – 6th Assessment Report*) : Cambio Climático 2023 (*Climate Change 2023*). El informe está basado en el contenido de tres grupos de trabajo : GTI (Grupo de Trabajo I) (*WGI (Working Group I)*) – Las bases de la ciencia física (*The physical Science Basis*) , GTII (Grupo de Trabajo II) (*WGII (Working Group II)*) – Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad (*Impacts, Adaptation and Vulnerability*) , GTIII (Grupo de Trabajo III) (*WGIII (Working Group III)*) – Mitigación del Cambio Climático (*Mitigation of Climate Change*).

2.1.2 Grupos de Trabajo del IPCC

- Grupo de Trabajo I: El objetivo principal del GTI del IPCC es proporcionar la información científica relevante para afrontar el cambio climático. Examina la ciencia física que sustenta el cambio climático pasado, presente y futuro y combina observaciones, paleoclima, estudios de procesos, teoría y modelización para dar una imagen completa del sistema climático y de cómo está cambiando, junto con las causas del cambio. [IPCC, 2024c].
- Grupo de Trabajo II: El GTII del IPCC evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, las consecuencias negativas y positivas del cambio climático y las opciones para adaptarse a él. Considera sus vulnerabilidades y las capacidades y límites de estos

sistemas naturales y humanos para adaptarse al cambio climático y reducir así los riesgos asociados al clima, junto con las opciones para crear un futuro sostenible. [IPCC, 2024d].

- **Grupo de Trabajo III:** El GTIII del IPCC se centra en la mitigación del cambio climático, en la evaluación de métodos para reducir y eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero de la atmósfera. Adopta tanto una perspectiva a corto plazo, relevante para los responsables de la toma de decisiones en el gobierno y el sector privado, como una perspectiva a largo plazo que ayuda a identificar cómo podrían alcanzarse los objetivos de alto nivel de la política climática. [IPCC, 2024e].

2.2 Cambio climático

Si bien el cambio climático ha existido desde siempre, tal y como se mencionó en la introducción, en sus últimos informes el IPCC concluye que en un periodo relativamente reciente la influencia humana en el sistema climático es clara, y que las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado, establece el IPCC en su informe de síntesis del Cambio Climático 2014 [R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), 2014].

Entre las observaciones que indican este cambio destacan la de los gráficos representados en las figuras 2.1a, 2.1b y 2.1c, del promedio global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, del promedio global del cambio del nivel del mar, y del promedio global de concentraciones de gases de efecto invernadero. Estas observaciones presentan una relación con las emisiones antropógenas globales de CO₂, representadas en el gráfico 2.1d y 2.1e.

Así, más específicamente, se han observado algunos cambios significativos a nivel global:

- Cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850.
- En promedio, sobre las zonas continentales de latitudes medias del hemisferio norte, las precipitaciones han aumentado desde 1901.
- Cambios en la salinidad de la superficie del océano. Es muy probable que las regiones con alta salinidad, donde predomina la evaporación, se hayan vuelto más salinas, y que las regiones con baja salinidad, donde predominan las precipitaciones, se hayan desalinizado desde la década de 1950.
- Desde el comienzo de la era industrial, la incorporación de CO₂ en el océano ha dado lugar a su acidificación; el pH del agua del océano superficial ha disminuido en 0,1, lo que corresponde a un 26 % de aumento de la acidez.
- En el período comprendido entre 1992 y 2011, los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida han ido perdiendo masa. Los glaciares han continuado menguando en casi todo el mundo.
- Durante el período 1901-2010, el nivel medio global del mar se elevó 0,19 [0,17 a 0,21] m

Y entre las causas particulares de estos cambios, se encuentran principalmente las emisiones antropógenas acumuladas de gases de efecto invernadero (GEI). Entre 1750 y 2011 las emisiones antropógenas de CO₂ a la atmósfera acumuladas fueron de $2\,040 \pm 310$ GtCO₂. Alrededor del 40% de esas emisiones han permanecido en la atmósfera (880 ± 35 GtCO₂) y el resto fueron removidas de la atmósfera y almacenadas en la tierra (en plantas y suelos) y en el océano. Los océanos han absorbido alrededor del 30% del CO₂ antropógeno emitido, provocando su acidificación.

El IPCC establece que desde el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) ha aumentado la evidencia de la influencia humana en el sistema climático. Según sus estimaciones, la contribución de la actividad humana al calentamiento es similar al calentamiento observado durante el mencionado período.

El cambio climático ha causado impactos significativos en los sistemas naturales y humanos mundiales. En relación a esto, el IPCC resalta que la evidencia más sólida y completa de los impactos observados del cambio climático corresponde a los sistemas naturales. En muchas regiones, las cambiantes precipitaciones o el derretimiento de nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos, lo que afecta a los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad. Muchas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático en curso. Esto pone en evidencia la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima [R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), 2014].

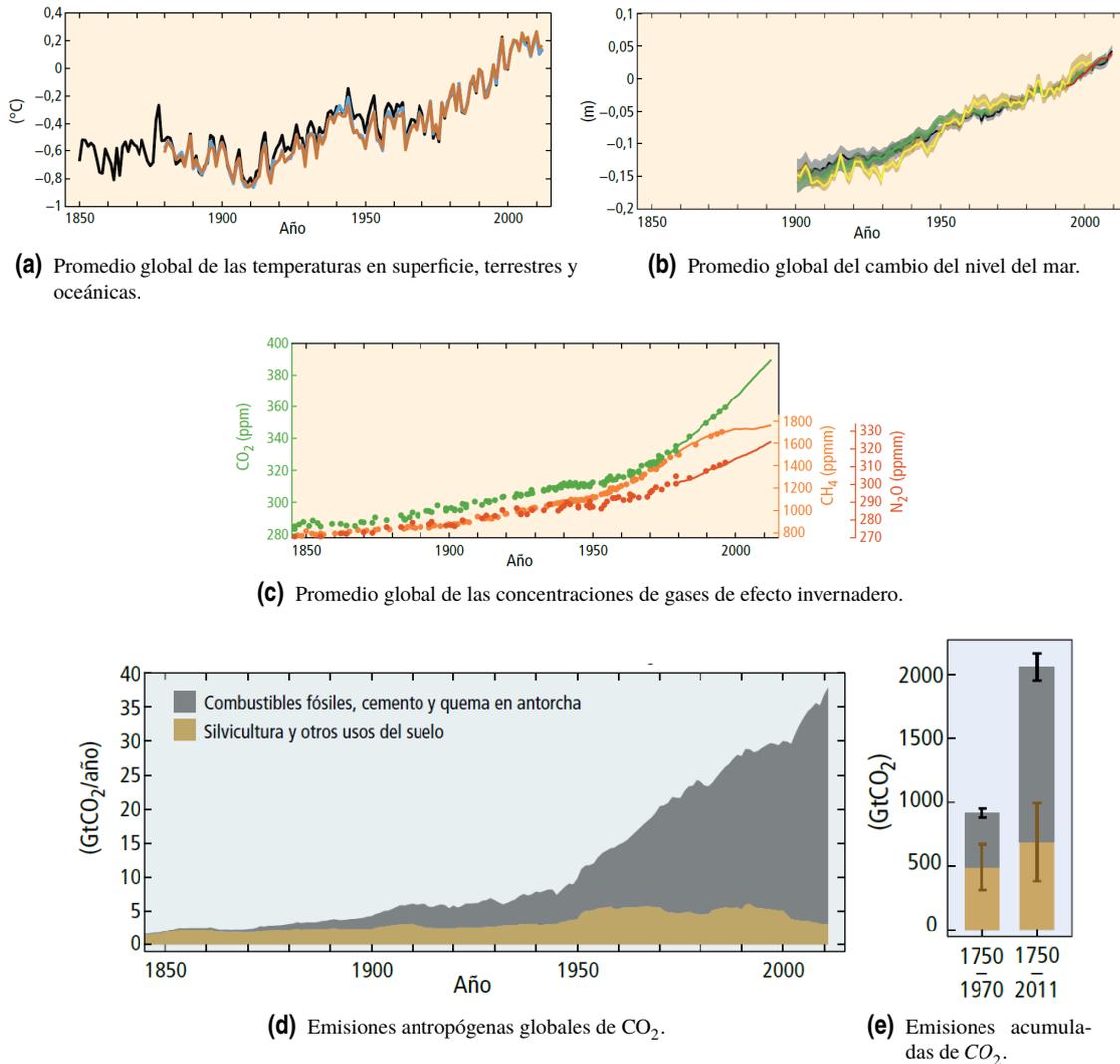


Figura 2.1 Observaciones y otros indicadores de un sistema climático global cambiante (R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), 2014) .

2.3 Proyecciones de subida del nivel del mar

Dentro de las misiones del GTI se encuentra la de aportar información futura sobre los efectos del cambio climático. Así, junto con toda la información pasada y presente recogida, a través de unos modelos numéricos aportan información sobre la evolución futura de las variables del cambio climático, entre las que se encuentra la subida del nivel medio del mar, que es lo que concierne especialmente a este trabajo.

Estas proyecciones las facilitan para varios escenarios de desarrollo de la sociedad y de las políticas ambientales, abarcando de esta manera la incertidumbre que supone predecir el futuro de dichas variables.

Se explica en este apartado los diferentes escenarios socioeconómicos sobre los que se trabajan, la evaluación futura del cambio climático, además de los modelos empleados para las predicciones y la metodología que siguen para emitir los datos.

2.3.1 Escenarios socioeconómicos (SSP)

Los escenarios en los que se basan las predicciones y efectos del cambio climático del IPCC provienen de las llamadas Trayectorias socioeconómicas compartidas (*Shared socio economic pathways (SSP)*). Abarcaban cinco escenarios para examinar los posibles futuros, del SSP1 al SSP5 y describen una serie de tendencias plausibles en la evolución de la sociedad a lo largo del siglo XXI. Cada vía es una descripción de un futuro socioeconómico, pero estos futuros socioeconómicos no tienen en cuenta los efectos del cambio climático y no

se asumen nuevas políticas climáticas. Las proyecciones cuantitativas de los impulsores socioeconómicos de los SSP incluyen la población, el producto interior bruto (PIB) y la urbanización. A grandes rasgos, los cinco SSP representan la "sostenibilidad" (SSP1), un camino "intermedio" (SSP2), la "rivalidad regional" (SSP3), la "desigualdad" (SSP4) y el "desarrollo intensivo en combustibles fósiles" (SSP5)[Chen et al., 2021].

Sin embargo, surge un nuevo conjunto básico de escenarios utilizados por el GTI [Chen et al., 2021], derivados de los SSP que abarcan las posibles evoluciones futuras de los factores antropogénicos del cambio climático: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Abarca una amplia gama de trayectorias de emisiones, comenzando en 2015, incluidas las nuevas trayectorias de bajas emisiones:

- SSP3-7.0 y SSP5-8.5, escenarios con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) altas y muy altas y emisiones de CO₂ que aproximadamente se duplican con respecto a los niveles actuales en 2100 y 2050, respectivamente.
- SSP2-4.5, escenario con emisiones de GEI intermedias y emisiones de CO₂ que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo.
- SSP1-1.9 y SSP1-2.6, escenarios con emisiones de GEI muy bajas y bajas y emisiones de CO₂ que descienden a cero neto en torno a 2050 o después de esa fecha, seguidas de niveles variables de emisiones netas negativas de CO₂.

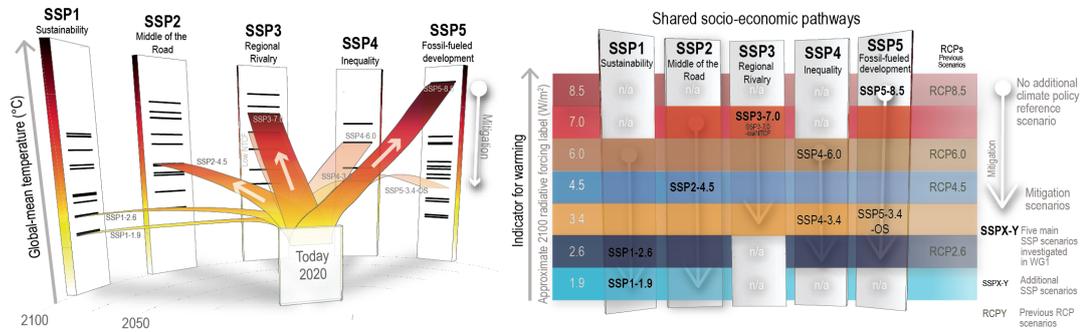


Figura 2.2 Representación gráfica de los escenarios SSP y sus características [Chen et al., 2021].

2.3.2 Global Earth systems models

Para la elaboración de sus predicciones pasadas y futuras bajo una serie de escenarios, el IPCC utiliza los ESM (*Global Earth systems models*) que son los modelos más complejos que contribuyen al AR6. El núcleo de cada ESM es un modelo de circulación general (*GCM - general circulation model*) que representa la dinámica de la atmósfera y los océanos. Los ESMs se complementan con los modelos regionales y con una jerarquía de modelos de menor complejidad ([Chen et al., 2021]).

Los principales datos de entrada utilizados por los ESMs para los experimentos de escenarios históricos y futuros del SSP son: emisiones de CO₂, concentraciones históricas y futuras de GEI, cambio de uso del suelo y pautas de gestión, emisiones de la quema de biomasa, ozono estratosférico y troposférico, emisiones de gases reactivos, forzamiento solar y forzamiento volcánico.

2.3.3 Incertidumbre y probabilidad de los datos

En los tres grupos de trabajo, los autores evalúan los conocimientos científicos y utilizan dos métricas para comunicar el grado de certidumbre de las principales conclusiones. Estas métricas son [Chen et al., 2021]:

1. **Confianza:** una medida cualitativa de la validez de una conclusión, basada en el tipo, la cantidad, la calidad y la coherencia de las evidencias y el grado de acuerdo.
2. **Probabilidad:** medida cuantitativa de la incertidumbre de un hallazgo, expresada de forma probabilística (por ejemplo, basada en el análisis estadístico de observaciones o resultados de modelos, o ambos, y en la opinión de expertos).

La figura 2.2 muestra el proceso idealizado, paso a paso, mediante el cual los autores del IPCC evalúan el conocimiento científico y las incertidumbres. Comienza con la evaluación de las evidencias disponibles y el

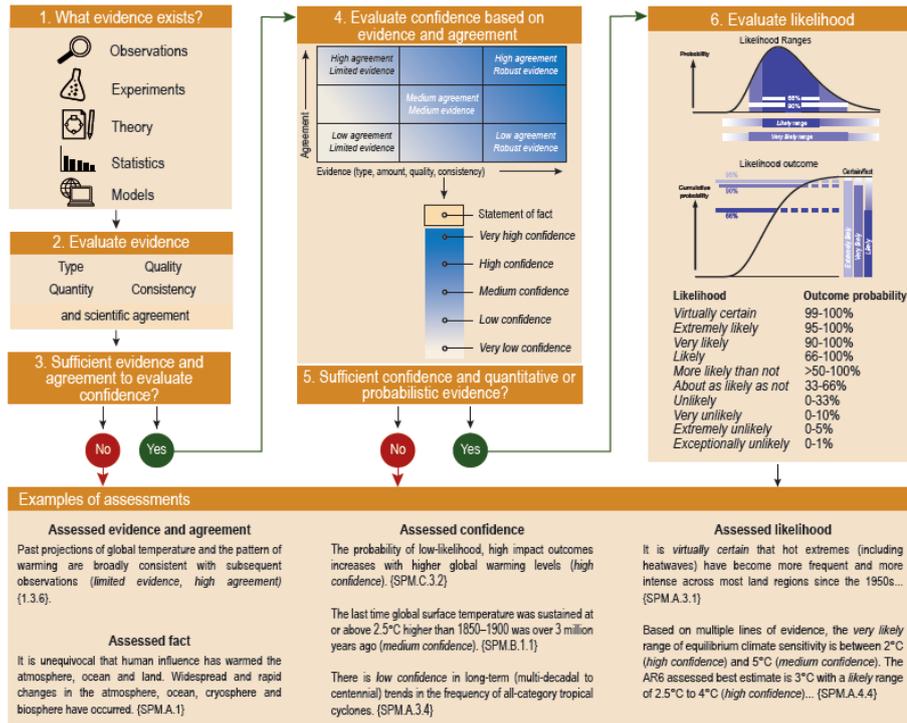


Figura 2.3 El enfoque del AR6 del IPCC para caracterizar la comprensión y la incertidumbre en las conclusiones de la evaluación ([Chen et al., 2021]).

grado de acuerdo (pasos 1-2). Se utilizan los siguientes términos para describir las evidencias disponibles: limitadas, medias o robustas (*limited, medium, or robust*); y el grado de acuerdo: bajo, medio o alto (*low, medium, or high*).

Si el equipo de autores llega a la conclusión de que hay suficientes evidencias y grado de acuerdo, puede evaluarse el nivel de confianza (pasos 3-5). El nivel de confianza evaluado se expresa mediante cinco calificadores: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. El paso 4 (que se puede observar con más detalle en la figura 2.3) muestra cómo se relacionan las evidencias y los grados de acuerdo con los niveles de confianza. Para una determinada declaración de evidencia y grado de acuerdo, pueden asignarse distintos niveles de confianza en función del contexto, pero el aumento de los niveles de evidencia y grado de acuerdo se correlaciona con el aumento de la confianza ([Chen et al., 2021]).

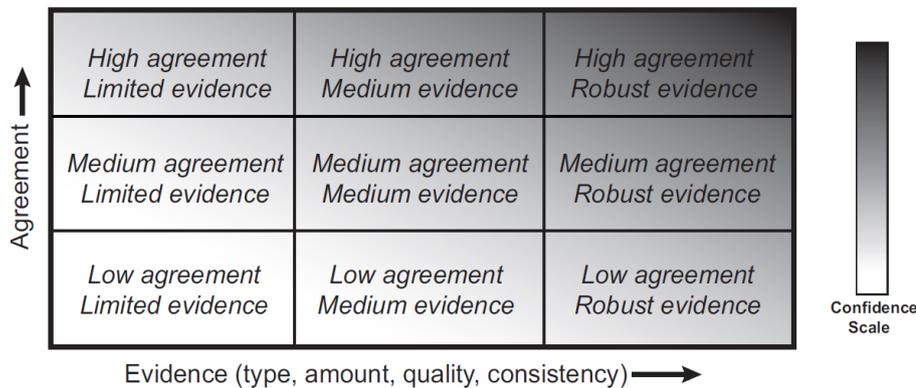


Figura 2.4 Representación de las declaraciones de acuerdo y evidencia y su relación con la confianza ([Mastrandrea and Zwiers, 2010]).

Si el juicio experto del equipo de autores concluye que hay suficiente confianza (alta o muy alta) y pruebas cuantitativas/probabilísticas, las conclusiones de la evaluación pueden expresarse con declaraciones de

probabilidad (pasos 5-6). Los términos utilizados para indicar la probabilidad evaluada de un resultado incluyen: prácticamente seguro: 99-100 % de probabilidad, muy probable: 90-100 %, probable: 66-100 %, más o menos probable: 33-66 %, improbable: 0-33 %, muy improbable: 0-10 %, excepcionalmente improbable: 0-1 %. También pueden utilizarse términos adicionales (extremadamente probable: 95-100 %, más probable que no 50-100 %, y extremadamente improbable 0-5 %).

2.4 Resultados de las proyecciones de subida del nivel del mar

El AR6 presenta los resultados de las proyecciones de la subida del nivel del mar. Los factores forzadores de este efecto, son principalmente: la expansión térmica, la capa de hielo de Groenlandia, la capa de hielo del Antártico, los glaciares, el almacenamiento de agua terrestre, el nivel dinámico del mar y los efectos gravitacionales, rotacionales y de deformación.

[Fox-Kemper and Yu, 2021] presentan proyecciones del nivel del mar que tienen en cuenta únicamente los procesos para los que pueden hacerse proyecciones con un nivel de confianza al menos medio, en relación con el período 1995-2014, para cinco escenarios de Senda Socioeconómica Compartida (SSP) y cinco temperaturas medias globales de superficie futuras diferentes (de 2080 a 2100).

Para conseguirlas, el IPCC ofrece una herramienta (*NASA Sea Level Projection Tool*) que permite acceder de manera fácil y rápida a los datos las proyecciones de la subida del nivel del mar obtenidos del AR6. Permite seleccionar la localización del punto deseada y aporta los valores de las proyecciones de la subida del nivel del mar para cada uno de los escenarios (SSP) para los que se calcularon, ofreciendo tanto los datos tabulados como su representación gráfica.

La herramienta permite a los usuarios ver las proyecciones de la subida del nivel del mar tanto globales como regionales desde 2020 hasta 2150, junto con cómo estas proyecciones difieren dependiendo del escenario futuro o del nivel de calentamiento. También ofrece las contribuciones de los diferentes procesos físicos a la subida del nivel de mar, indicando cuáles de ellos serán los dominantes en el nivel del mar futuro para cada una de las localizaciones [IPCC, 2024a].

Como se indicará más adelante, el escenario espacial de referencia que se escogerá para el desarrollo del modelo será el estuario del Guadalquivir. Por ello, el punto que se seleccionará para la extracción de datos será el de la boya de Bonanza. Para esta localización, los datos que se extraen de la *NASA Sea Level Projection Tool* se pueden observar en las figuras 2.5 y 2.6 y en la tabla 2.1.

La figura 2.5 representa las proyecciones de la subida del nivel medio del mar para los distintos escenarios definidos por el IPCC para evaluar los efectos del cambio climático. En la gráfica se observan los valores medios de las distribuciones de probabilidad en las que el IPCC ofrece sus resultados (tal y como se describió en el apartado 2.3.3), correspondiendo las zonas de sombras de cada uno de los escenarios a los rangos de los percentiles 17 y 83 de la distribución. Las proyecciones son relativas a la línea base del nivel del mar en 1995-2014.

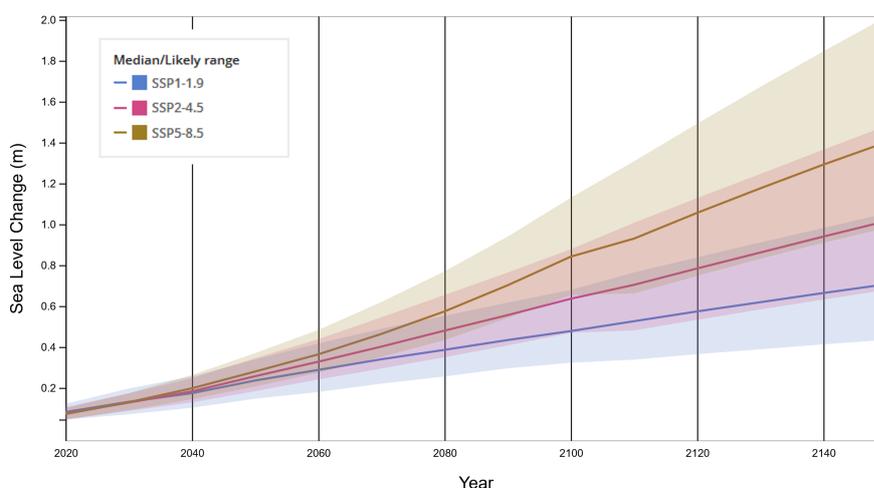


Figura 2.5 Representación de la subida del nivel del mar para los SSP según el IPCC en Bonanza, estuario del Guadalquivir ([IPCC, 2024b]).

Por otro lado, la figura 2.6 muestra las contribuciones individuales de cada uno de los factores forzadores de la subida del nivel medio del mar a las proyecciones. Se muestran los valores medios (rangos probables) expresados en mm anuales-1, junto con la columna SSP5-8.5 de baja confianza. En concreto, esta columna muestra el rango de percentiles 17-83.

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6 Low Confidence	SSP5-8.5 Low Confidence
Sterodynamic Sea Level	0.14 (0.06-0.23)	0.14 (0.08-0.21)	0.16 (0.10-0.22)	0.16 (0.09-0.23)	0.18 (0.11-0.24)	0.14 (0.08-0.21)	0.18 (0.11-0.24)
Glaciers	0.04 (0.03-0.05)	0.04 (0.03-0.05)	0.06 (0.04-0.07)	0.06 (0.05-0.07)	0.07 (0.06-0.08)	0.05 (0.03-0.06)	0.07 (0.04-0.08)
Greenland	0.02 (0.01-0.02)	0.02 (0.01-0.03)	0.02 (0.01-0.03)	0.02 (0.01-0.03)	0.02 (0.02-0.03)	0.03 (0.01-0.07)	0.04 (0.02-0.11)
Antarctica	0.04 (0.02-0.12)	0.04 (0.02-0.12)	0.04 (0.02-0.12)	0.04 (0.02-0.12)	0.04 (0.02-0.13)	0.04 (-0.00-0.12)	0.05 (-0.00-0.20)
Land Water Storage	0.01 (0.00-0.01)	0.01 (0.00-0.01)	0.01 (0.00-0.02)	0.01 (0.01-0.02)	0.01 (0.00-0.01)	0.01 (0.00-0.01)	0.01 (0.00-0.01)
Vertical Land Motion	0.03 (0.00-0.06)	0.03 (0.00-0.06)	0.03 (0.00-0.06)	0.03 (0.00-0.06)	0.03 (0.00-0.06)	0.03 (0.00-0.06)	0.03 (0.00-0.06)
Total (2060)	0.29 (0.18-0.42)	0.30 (0.21-0.41)	0.33 (0.24-0.44)	0.34 (0.24-0.46)	0.36 (0.27-0.48)	0.30 (0.21-0.45)	0.37 (0.27-0.58)

Figura 2.6 Contribuciones individuales de los factores forzadores de la subida del nivel medio del mar para el año 2060 (IPCC, 2024b).

A continuación, en la tabla 2.1 se muestran los valores tabulados descargados de la herramienta para todos los escenarios sobre los que el IPCC ha calculado las proyecciones. En dicha tabla se distinguen las predicciones del nivel del mar para el horizonte temporal definido en la primera fila y para los diferentes percentiles de la distribución de probabilidad en la que el IPCC aporta sus resultados.

Tabla 2.1 Proyecciones de la subida del nivel del mar en la boya de Bonanza, del IPCC ([IPCC, 2024b]).

Confidence	Scenario	Quantile	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120	2130	2140	2150
medium	ssp119	17	0.045	0.071	0.103	0.147	0.18	0.221	0.256	0.296	0.323	0.338	0.365	0.389	0.413	0.435
medium	ssp119	50	0.082	0.132	0.174	0.236	0.288	0.34	0.386	0.434	0.478	0.526	0.574	0.619	0.664	0.707
medium	ssp119	83	0.122	0.197	0.256	0.339	0.417	0.489	0.552	0.617	0.679	0.764	0.838	0.911	0.982	1.054
medium	ssp245	17	0.046	0.088	0.129	0.184	0.241	0.295	0.35	0.408	0.469	0.481	0.533	0.584	0.632	0.68
medium	ssp245	50	0.075	0.128	0.183	0.257	0.328	0.402	0.48	0.556	0.636	0.704	0.784	0.862	0.94	1.016
medium	ssp245	83	0.106	0.173	0.247	0.345	0.438	0.545	0.654	0.764	0.878	1.007	1.128	1.246	1.365	1.482
medium	ssp585	17	0.045	0.091	0.145	0.207	0.274	0.352	0.434	0.542	0.654	0.662	0.748	0.832	0.91	0.983
medium	ssp585	50	0.072	0.13	0.198	0.28	0.364	0.464	0.574	0.702	0.842	0.93	1.056	1.176	1.292	1.402
medium	ssp585	83	0.101	0.174	0.263	0.37	0.483	0.62	0.77	0.94	1.13	1.308	1.492	1.672	1.846	2.016

3 Hidrodinámica de estuarios aluviales

3.1 Introducción a los estuarios aluviales

El estuario, tal y como lo describe [Savenije, 2005], es la transición entre dos cuerpos de agua distintos: un río y un mar. No es igual a ninguno de ellos pero presenta características propias de cada uno de ellos. Propias del río como la presencia de orillas, flujo de agua, transporte de sedimento, inundaciones ocasionales, agua dulce, etc.; y propias del mar como la presencia de mareas, almacenamiento de sedimentos y agua salada. Ello lo hace un sistema diferente y único, con su propia hidráulica, morfología y características biológicas, que depende de los parámetros forzadores propios de cada uno de los sistemas de los que se alimenta:

- La marea, que produce el mayor aporte de energía y de agua salada, y es la responsable de los movimientos oscilatorios del agua hacia dentro y hacia fuera del estuario.
- El oleaje, de naturaleza estocástica, que tiene una gran influencia en la forma de la boca del estuario.
- El transporte longitudinal de sedimentos paralelo a la costa, responsable de la formación de flechas litorales y barras en la desembocadura.
- La descarga fluvial, que aporta agua dulce y sedimentos al estuario.
- La diferencia de densidades, responsable de unas corrientes residuales aguas adentro del estuario a lo largo del lecho, transportando sedimentos marinos al estuario.

La influencia de estos fenómenos junto con otros parámetros dan lugar a diferentes tipos de estuarios. Particularmente, si se sigue la clasificación de estuarios según la geología del terreno sobre el que descansan, [Savenije, 2005] distingue entre los estuarios de lecho fijo, estuarios aluviales sobre llanura costera y estuarios aluviales sobre llanura costera corta. Son los estuarios aluviales los que interesan particularmente en el desarrollo de este trabajo, por su cercanía a los estuarios típicos de la Andalucía Atlántica, tales como los del Guadalquivir y el Guadiana y por su facilidad para ser tratados como estuarios ideales, lo que supone una ventaja a la hora de realizar modelos numéricos.

Los estuarios aluviales están compuestos de sedimentos que han sido depositados por los dos cuerpos de agua que lo forman: el mar y el río. A través de ellos, el estuario ha formado su propio lecho de un modo que la energía disponible para la erosión y la sedimentación se extiende por igual a lo largo del estuario. Es un equilibrio dinámico entre deposición y erosión, donde en un momento en el tiempo, la erosión es predominante y en otro momento, la deposición. De esta manera, la forma de un estuario aluvial está directamente relacionada con su hidráulica.

3.2 Geometría de los estuarios aluviales

La forma de los estuarios aluviales viene caracterizada por orillas convergentes aguas arriba que puede ser descrita mediante una función exponencial. El eje longitudinal que lo representa sigue la línea del thalweg y tiene su origen en la boca del estuario.

Se distinguen dos longitudes horizontales características: el ancho B , que es función de x (distancia longitudinal desde el origen de coordenadas), y la carrera de marea E , que en estuarios aluviales se mantiene

constante a lo largo de su longitud. La carrera de marea es la distancia que viaja una partícula de agua durante un periodo de marea, moviéndose aguas arriba durante la pleamar y aguas abajo durante la bajamar. El ratio entre estas dos magnitudes (E/B) suele ser pequeño en la zona más ancha del estuario, mientras que la parte superior, más estrecha, el ratio es generalmente grande.

De la misma forma, verticalmente, visto desde una sección longitudinal del estuario, se observan distintas características o magnitudes. La pendiente del estuario es horizontal, apareciendo únicamente cuando el estuario gradualmente cambia a río y la descarga fluvial empieza a ser dominante sobre las corrientes mareales. Las dos longitudes verticales características son la amplitud de marea H y la profundidad del flujo h . Además, los niveles del agua se mantienen entre dos límites: *high water* (HW) y *low water* (LW).

En la figura 3.1 se puede observar de manera gráfica todas estas características.

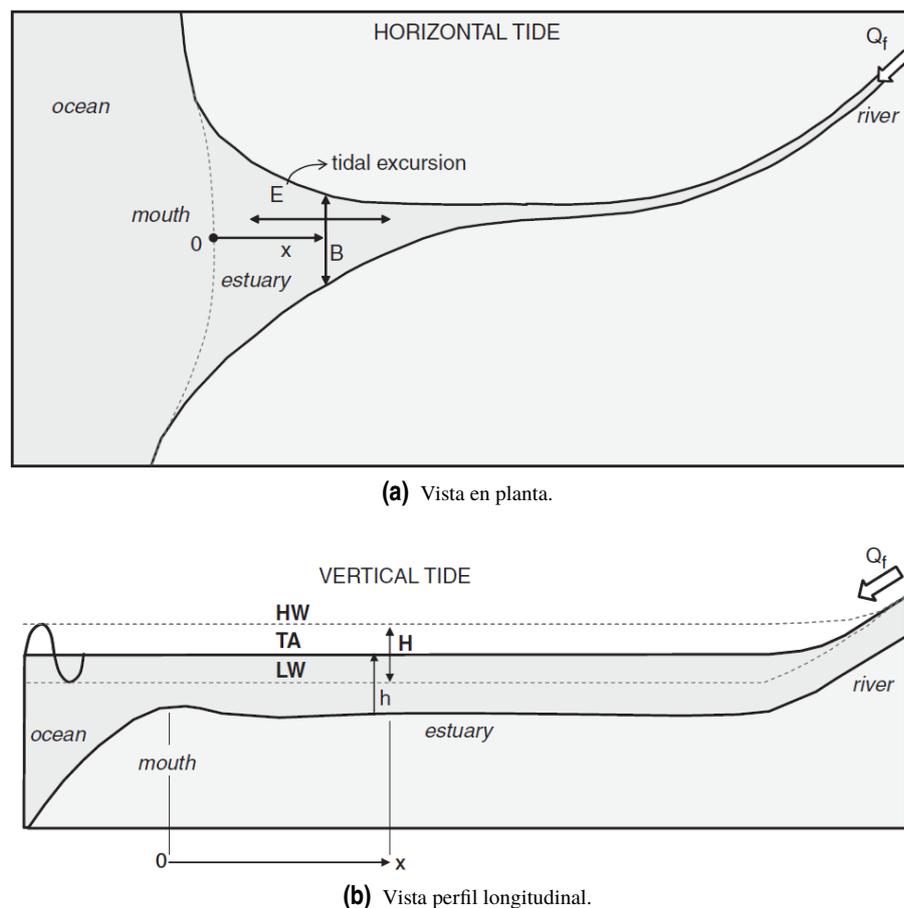


Figura 3.1 Geometría de los estuarios aluviales [Savenije, 2005].

El valor de estas magnitudes y la forma del estuario vendrán determinadas por la influencia de diferentes factores: el movimiento de la marea, la descarga fluvial, la acción del oleaje y las tormentas, de los cuales, es la amplitud de marea la variable más fácil de determinar. Así, siguiendo con la clasificación de Davies [Davies, 1964], los estuarios pueden ser:

- Micro-mareales, que presentan una amplitud de marea menor de dos metros, donde los procesos que se desarrollan están dominados tanto por la descarga fluvial como por la acción del oleaje y de las tormentas desde el mar.
- Meso-mareal, que presentan una amplitud de marea comprendida entre los dos y los cuatro metros, donde predomina la acción de la marea.
- Macro-mareal, que presentan una amplitud de marea mayor de cuatro metros, están claramente dominados por la acción de la marea, produciendo fuertes corrientes mareales que se extienden cientos de kilómetros tierra adentro.

3.3 Salinidad en estuarios aluviales

3.3.1 Procesos de mezcla

Según [Savenije, 2005], los mecanismos de mezcla de los dos tipos de agua en el estuario están principalmente generados por dos fuerzas motoras: la marea y la diferencia de densidades. Estos mecanismos de mezcla son la mezcla turbulenta, la mezcla gravitacional, el fenómeno de mezcla llamado *Trapping*, y la mezcla debida a circulación residual, en particular el *Tidal pumping*,

La mezcla turbulenta es producida principalmente por la fricción que se produce a lo largo de lecho y las orillas del estuario. Esta fuerza se transporta al resto de partículas a través de una tensión de cizalladura que es transferida por turbulencia, que causa la mezcla. Es el mecanismo menos eficiente en comparación con el resto.

La mezcla gravitacional es debida a la diferencia de densidades que existe entre los dos tipos de agua (salada y dulce) que provoca un desequilibrio en la presión hidrostática entre el lado costero y en el lado fluvial. La presión en el lado oceánico será mayor que la del lado fluvial a igual profundidad. Como resultado, el nivel del agua en el límite de la intrusión salina es ligeramente mayor que en el mar, y la presión resultante cerca de la superficie está orientada hacia el mar, mientras que cerca del lecho está orientada aguas arriba. Consecuentemente, hay una circulación residual que transporta agua relativamente salina aguas arriba a lo largo del lecho y agua relativamente dulce aguas abajo a lo largo de la superficie. Este gradiente de salinidad vertical que surge de este fenómeno es una causa importante de la mezcla de aguas.

El fenómeno de mezcla *Trapping* es el resultado de las irregularidades de las orillas del estuario, donde el agua queda "atrapada" en ciertas zonas produciéndose un desfase entre el llenado y vaciado de dichas aguas y del flujo principal. Se genera entonces una descarga de agua dulce en el flujo principal antes de la estoa de vaciante en este último. Es típico de estuarios con una topografía irregular, por lo que no será el mecanismo dominante en este trabajo.

Finalmente, el *Tidal pumping*, que es un tipo de mezcla por circulación residual que suele darse en zonas con topografía irregular donde existen distintos canales para la llenante y la vaciante.

3.3.2 Intrusión salina

La distribución de la salinidad a lo largo del estuario y el alcance de la intrusión salina puede ser principalmente de tres tipos: estratificado o de cuña salina, parcialmente mezclado o bien mezclado.

Un estuario estratificado ocurre cuando la descarga de agua dulce es grande en comparación al flujo de marea, surgiendo un incremento grande de la salinidad a lo largo de la profundidad. El fenómeno más extremos es la formación de una cuña salina, que en los estuarios aluviales solo ocurre cerca de la boca del estuario y durante los periodos de gran descarga fluvial. La intrusión salina se encuentra muy cercana a la desembocadura. En la formación de una cuña salina, debido al gran gradiente de densidad el nivel del mar aumenta ligeramente aguas arriba. En estas distribuciones el mecanismo de mezcla que se suele dar es el de la circulación gravitacional, como resultado del gradiente de densidades.

Un estuario bien mezclado ocurre cuando la descarga de agua dulce es pequeña en comparación al flujo de marea, con ausencia de gradiente de salinidad; y con un gradiente suave en el caso del estuario parcialmente mezclado. Ocurren durante los periodos de tiempo de pequeña descarga fluvial, dando lugar a una intrusión salina mucho más avanzada en el estuario. La diferencia entre ambos es difícil de determinar, siendo el parámetro de estratificación un buen parámetro para cuantificarla. Se define como la diferencia de salinidad cerca de la superficie libre y cerca del lecho, dividida por su media. Si este porcentaje es pequeño, se puede considerar bien mezclado (inferior a un 30%).

3.3.3 Parámetros característicos de estuarios

Para cuantificar los distintos mecanismos de intrusión o mezcla que se pueden dar en los estuarios, se definen algunos números adimensionales que sirven para tener una buena referencia de lo que en ellos se está desarrollando.

El número de *Canter-Cremers* que relaciona la cantidad de agua dulce con la cantidad de agua salada que entra en el estuario en un periodo de marea. Así, la primera variable se define como el producto de la descarga fluvial (Q_f) por el periodo de marea T , y la segunda variable representa el prisma de marea, el volumen de agua salada que entra en el estuario durante un periodo de marea. Matemáticamente se representa mediante la expresión 3.1

$$N = \frac{Q_f T}{P_t} \quad (3.1)$$

Si este número es grande, indica que la descarga fluvial es dominante en el estuario, y por lo tanto se darán condiciones estratificadas de salinidad. Si por otro lado el número es pequeño, la descarga fluvial no tiene influencia en relación a la marea y por lo tanto el proceso estará dominado por la marea, dando lugar a estuarios mejor mezclados.

Otro número importante en este sentido es el número de estuario de *Richardson*, que permite establecer una relación entre la energía potencial aportada al estuario por el río, a través de la descarga fluvial, y la energía cinética aportada por la marea durante el periodo mareal. Matemáticamente se define con la expresión 3.2.

$$N_R = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{gh}{v^2} \frac{Q_f T}{P_t} \quad (3.2)$$

Este número tiene más alcance que el número de *Canter-Cremers*, porque introduce el efecto de la diferencia de densidades y el número de Froud, que relaciona la velocidad de marea con la celeridad de onda. Si este número es alto, hay energía potencial suficiente para que el río mantenga esa estratificación, mientras que si es pequeño, la energía cinética disponible en las corrientes de marea es suficiente para mezclar los dos tipos de aguas dando lugar a un estuario bien mezclado.

Otro parámetro importante que se ha introducido sobre estas líneas es el parámetro de estratificación que cuantifica el gradiente de salinidad vertical que se produce en la columna de agua y que por lo tanto mide el nivel de estratificación en el estuario. Se definió con la expresión 3.3

$$S_p = \frac{|S_b - S_t|}{\bar{S}} 100 \quad (3.3)$$

Mientras mayor sea el valor de este parámetro, mayor será el gradiente vertical de salinidad y más estratificado se encontrará el estuario, y viceversa.

3.4 Estuarios ideales

Un estuario ideal se define como aquel donde, a medida que la onda de marea viaja aguas arriba, la cantidad de energía por ancho unitario perdida por fricción es exactamente igual a la cantidad de energía ganada por la convergencia de las orillas. La convergencia de las orillas del estuario es suficiente para equilibrar el amortiguamiento de la amplitud de marea debido a la fricción.

En términos energéticos este tipo de estuarios se denomina sincrónico, donde la onda de marea permanece inalterable a lo largo del estuario debido a este equilibrio. Se diferencia de los estuario hiposíncronos e hipersíncronos en que los primeros desarrollan una atenuación de la onda de marea, resultado del dominio de la fricción frente a la convergencia, y los segundo por el contrario desarrollan una amplificación de la onda de marea como consecuencia de una mayor influencia de la convergencia frente a la fricción.

(Savenije) formuló las hipótesis básicas de equilibrio en planta y perfil sobre las que descansan los estuarios ideales.

La primera de ellas es que la profundidad media de los estuarios no cambiaba significativamente aguas arriba de la boca del estuario, indicando que la pendiente del flujo h es más o menos constante con la distancia.

En segundo lugar, que la amplitud de la velocidad del flujo de marea cerca de la boca del estuario era del mismo orden de magnitud que la velocidad máxima de flujo observada cerca del límite de la intrusión salina. La ausencia de un gradiente en la amplitud de la velocidad implica una excursión de marea E constante a lo largo del eje longitudinal del estuario.

Adicionalmente, a pesar de que la mayoría de los estuarios experimentan algún grado de amortiguamiento o amplificación de marea, se observó que el gradiente de la amplitud de marea H se mantiene constante, al menos en la parte del estuario dominada por la marea.

Por otro lado, la forma geométrica de equilibrio en planta es tal que las orillas siguen una tendencia convergente aguas arriba del estuario, resultando en una variación exponencial del ancho del estuario. En consecuencia el área transversal del estuario sigue también una variación exponencial.

El modelo de estuario ideal se resume en el siguiente conjuntos de formulaciones matemáticas:

$$h(x) = h_0 \quad (3.4)$$

$$B(x) = B_0 \exp\left(-\frac{x}{b}\right) \quad (3.5)$$

$$A(x) = A_0 \exp\left(-\frac{x}{a}\right) \quad (3.6)$$

$$H(x) = H_0 \quad (3.7)$$

$$E(x) = E_0 \quad (3.8)$$

Siendo h_0 la pendiente media en el estuario, B_0 el ancho en la boca del estuario, b la distancia al origen desde el punto de intersección entre la tangente al margen por el punto $(0, B_0/2)$ y el eje longitudinal, A_0 es el área de la sección transversal en la boca del estuario, a la distancia al origen desde el punto de intersección entre la tangente al margen por el punto $(0, A_0/2)$ y el eje longitudinal, H_0 el rango de marea en la boca del estuario y E_0 la carrera de marea en la boca del estuario.

Estas hipótesis son la base sobre la que se construyó el modelo que se empleará en este trabajo, y que por tanto resulta importante destacar.

4 Metodología

En este capítulo se pretende abordar la metodología empleada para llevar a cabo el objetivo del proyecto. Así, se definirán a lo largo de este apartado, en primer lugar, las características del escenario físico sobre el que se van a crear las simulaciones (según los datos del IPCC mencionados anteriormente), el emplazamiento para la toma de datos y el horizonte temporal.

En segundo lugar, se definirá el modelo numérico sobre el que se lanzarán las simulaciones, describiendo tanto el programa numérico empleado para el cálculo, como la geometría, la batimetría y las condiciones del dominio. En este punto se desarrollará la metodología empleada para formalizar un modelo numérico ajustado al caso particular de estudio, eficiente computacionalmente.

Finalmente, se describirá el diseño experimental, definido por las simulaciones finales completas que se lanzarán a calcular y de las que se obtendrán los resultados y conclusiones finales del estudio.

4.1 Escenarios de estudio

La variabilidad de escenarios futuros definidos por el IPCC para el estudio de los efectos del cambio climático, junto con la variabilidad de horizontes temporales y emplazamientos para la toma de datos, y los valores para los distintos percentiles de la distribución de probabilidad disponible para cada escenario futuro, exige la definición de los escenarios sobre los que se va a trabajar en este proyecto. Supondrán un total de 3 escenarios, definidos cada uno de ellos por un emplazamiento, un horizonte temporal y un escenario futuro (según los establecidos por el IPCC).

El modelo del estuario ideal empleado está basado en un estuario aluvial como los que forman los estuarios del Guadalquivir y del Guadiana, localizados en la costa Atlántica Andaluza. La herramienta *NASA Sea Level Projection Tool*, tal y como se indicó en el apartado 2.4, permite obtener las proyecciones de la subida del nivel del mar predichas por el IPCC para cualquier localización a nivel global. Además, en la costa Atlántica Andaluza estas proyecciones están particularmente calculadas en la boya de Bonanza, algo que facilita enormemente el trabajo pues, como se verá posteriormente, estas proyecciones se superpondrán a la señal del nivel del mar que se predecirá a partir de los datos históricos del mareógrafo en la boya de Bonanza, por lo que los datos estarán perfectamente referenciados al mismo emplazamiento. El emplazamiento para el que se definirán los datos de entrada será la boya de Bonanza.

Por otro lado, el horizonte temporal que se alcanzará en el análisis del modelo se escoge en 50 años, para reducir no solo los rangos de error asociados a la incertidumbre de la predicción de datos del IPCC, que van aumentando con el tiempo, sino también los que se produzcan al acelerar el proceso, tal y como se explica en el diseño experimental (apartado 4.4).

Finalmente, los valores de las proyecciones para el emplazamiento y para el horizonte temporal, corresponderán a los tres más representativos de entre los escenarios propuestos, es decir, el más favorable desde el punto de vista del impacto de la subida del nivel del mar o SSP1-1.9, el menos favorable o SSP5-8.5, y aquel que se mantenga en valores medios o SSP2-4.5. Para cada uno de ellos se escogerá el valor de la proyección correspondiente al percentil de la distribución de probabilidad que más se ajuste al objetivo de la elección, es decir, al del percentil 17 en el caso del SSP1-1.9, al percentil 83 en el caso del SSP5-8.5 y al valor medio o percentil 50 en el caso del SSP2-4.5. De esa manera, se tiene una casuística que abarca todo el rango de posibilidades de desarrollo futuro.

La tabla 4.1 resume los 3 escenarios que se van a analizar.

Tabla 4.1 Escenarios de estudio.

Escenario	Emplazamiento	Horizonte temporal	Escenario futuro
1	Bonanza	50 años	SSP1-1.9
2	Bonanza	50 años	SSP2-4.5
3	Bonanza	50 años	SSP5-8.5

4.2 Modelo numérico

4.2.1 Programa Delft 3D

Para el análisis de la hidrodinámica del estuario se va a emplear el programa de modelización *Delft3D*, un paquete integrado de modelización que simula el flujo bidimensional (en el plano horizontal o vertical) y tridimensional, el transporte de sedimentos y la morfología, el oleaje, la calidad del agua y la ecología, y es capaz de gestionar las interacciones entre estos procesos [Deltares,]

El programa esta compuesto de tres módulos principales:

- *Flow*: es el módulo que concierne a este proyecto, que constituye el corazón del programa. Es un programa de simulación de la hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) que calcula el flujo no estacionario y los fenómenos de transporte resultantes del forzamiento mareal y meteorológico. Incluye en él el módulo de *Morphology*, que calcula el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos [Deltares, 2024b].
- *Waves*: calcula la propagación no estacionaria de olas de cresta corta sobre un fondo irregular, teniendo en cuenta la acción del viento, la disipación de energía debida a la fricción del fondo, la rotura de las olas, la refracción, el asomeramiento ... [Deltares, 2024c].
- *Water quality*: modela la calidad de las aguas superficiales y simula escenarios futuros. Abarca una serie de sustancias y procesos en los sistemas acuáticos, como el oxígeno, los nutrientes, el crecimiento de algas, la materia en suspensión, los metales pesados, los microcontaminantes orgánicos y las bacterias [Deltares, 2024a].

Además de los tres módulos descritos, Delft3D Flow incluye un campo *GRID*, que permite definir la malla y la batimetría del modelo de estudio, incluyendo las herramientas para su generación y para la interpolación de datos en dicha malla (*RGFGRID* Y *QUICKIN*, respectivamente)

El módulo que interesa en este proyecto es el *Delft3D Flow* que como se ha indicado sobre estas líneas, es un modelo que simula flujos, transporte de sedimentos, ondas largas, calidad de aguas, evolución morfológica y variables ecológicas bajo forzamientos mareales o atmosféricos en 2D o 3D [Deltares, 2024b]. Se puede utilizar para simular una gran cantidad de fenómenos, tales como flujos generados por el oleaje o la marea astronómica, hidrodinámica de ríos, hidrodinámica de estuarios, hidrodinámica de lagos y embalses, intrusión salina o descargas fluviales en la costa.

De entre los procesos que tiene en cuenta en el cálculo se encuentran el efecto barotrópico (forzamientos asociados a gradientes en la superficie libre), el efecto de Coriolis (efecto asociado a la rotación de la Tierra), el efecto baroclino (gradientes de presión horizontal asociado a diferencias de densidad), turbulencia, el transporte de sal, calor y otras sustancias conservativas, como sedimentos, el forzamiento mareal (astronómica y meteorológica), el forzamiento asociado al viento, variable tanto en el espacio como en el tiempo, las tensiones de fondo, etc ([Llanes, 2022]).

Delft3D Flow, como el resto de modelos numéricos hidráulicos, utiliza los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía a través de ecuaciones diferenciales que permiten caracterizar la evolución de las propiedades del flujo en el espacio y el tiempo. De esta manera, resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para fluidos incompresibles bajo la hipótesis de aguas someras (Ecuaciones de Shallow Waters) y las hipótesis de Boussinesq.

Las ecuaciones de gobierno del modelo son las siguientes ([Llanes, 2022]):

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial |h\bar{u}|}{\partial x} + \frac{\partial |h\bar{v}|}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 h} - \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4.3)$$

La ecuación 4.1 representa la ecuación de continuidad, sin tener en cuenta las entradas y salidas por precipitación o evaporación, respectivamente, donde \bar{u} y \bar{v} son las velocidades promediadas en las direcciones x e y (m/s), respectivamente; h la profundidad (m) y ξ el nivel de la superficie libre (m).

Las ecuaciones 4.2 y 4.3 representan las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento horizontal promediadas también en la vertical, asumiendo una ley de fricción cuadrática, velocidad nula y condiciones de contorno de deslizamiento libre (esfuerzo tangencial nulo) en el terreno; despreciando el efecto de Coriolis y del viento, donde g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), v la velocidad por turbulencia (m^2/s) y C el coeficiente de Chézy ($m^{1/2}/s$), que se define como:

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right) \quad (4.4)$$

Siendo k_s la rugosidad de la escala longitudinal Nikuradse.

Para el transporte de sustancias conservativas, como la sal, el modelo emplea la ecuación de advección-difusión en tres direcciones, que incluye términos asociados a sumideros y fuentes, con el fin de simular descargas y desagües. Se define de la siguiente forma:

$$\frac{\partial (d + \zeta)c}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \zeta)uc]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \zeta)vc]}{\partial y} + \frac{\partial \omega c}{\partial z} = \quad (4.5)$$

$$= (d + \zeta) \left(\frac{\partial}{\partial x} (D_H \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_H \frac{\partial c}{\partial y}) \right) + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial z} (D_V \frac{\partial c}{\partial z}) - \lambda_d (d + \zeta)c + S \quad (4.6)$$

Donde d representa la profundidad, ξ la elevación de la lámina de agua sobre el nivel medio, u la velocidad en dirección x , v la velocidad en dirección y , ω la velocidad en dirección z , c la concentración de la sustancia, D_H y D_V los coeficientes de difusividad horizontal y vertical, λ_d las soluciones numéricas de decrecimiento exponencial y S los términos fuente y sumidero ([Llanes, 2022]).

4.2.2 Geometría en planta y batimetría

Como se comentó en los objetivos del trabajo (apartados 1.2 y 1.3, el modelo sobre el que se va a realizar el análisis está basado en un modelo ya definido previamente [Llanes, 2022].

Las características geométricas del estuario son las siguientes:

- La longitud del canal se establece en 80 km .
- La carrera de marea es de 2 metros en la desembocadura.
- El ancho del canal en la desembocadura se establece en 1 km. En dirección ascendente las márgenes del río evolucionan reduciendo su anchura siguiendo una función exponencial cuya forma viene dada por la formulación de estuario idealizado:

$$B(x) = B_0 \exp \left(-\frac{x}{b} \right) \quad (4.7)$$

Siendo B_0 el ancho en la boca del estuario (500 metros a cada lado del eje) y b el parámetro que define la velocidad de estrechamiento (tomando 156.609,2). x representa la distancia medida sobre el eje del estuario.

- La pendiente longitudinal del canal se establece en $S = 10^{-5}$ y es la responsable de la variación longitudinal de la sección transversal. Concretamente, el thalweg evoluciona desde los 10 metros en la desembocadura hasta los 9.2 metros en la sección de descarga, teniendo en cuenta la longitud total del estuario.
- La sección transversal del estuario tiene forma gaussiana, de forma que la profundidad transversal del cuace viene dada por la siguiente expresión:

$$y(x) = -H_0 \exp \left(-\frac{(x - y_0)^2}{2c^2} \right) \quad (4.8)$$

Donde H_0 es la profundidad máxima (variable longitudinalmente entre 10 y 9.2 metros, desde la desembocadura hasta la sección de descarga), x es la distancia medida transversalmente, y_0 determina la localización del thalweg (en este caso, en el centro de la sección) y c es la desviación estándar, a la que se le asigna un valor de 152, calculado a partir del valor del talud transversal asignado ($y_s=0,04$ km)

- Consideración de bordes verticales que emergen hasta una altura de 5 metros sobre el nivel de referencia (N.M.M.).
- Consideración de un talud de playa plano con una pendiente de 0,0025.

En la imagen 4.1 se puede observar la batimetría y geometría del modelo original, generadas a través de la plataforma de programación Matlab.

Como se explicará en el próximo apartado, la división de la malla original en varias mallas de menor resolución, para la eficiencia computacional, implica que la batimetría del modelo final se crea asociándole a cada una de las celdas de la malla definida en el apartado 4.2.3 el valor de la profundidad interpolando los valores originales en la nueva malla de estudio. Esta interpolación se realiza a través del módulo de *Delft3D Quickin*, que permite realizar la interpolación de unos datos espaciales sobre una malla determinada.

De esta manera, se generó a través de Matlab un archivo de puntos .xyz compatible con el módulo *Quickin*, correspondiente a los puntos de la batimetría original, permitiendo la interpolación de dichos puntos sobre las tres mallas definidas, generando para cada mallado el correspondiente archivo .dep con la información batimétrica.

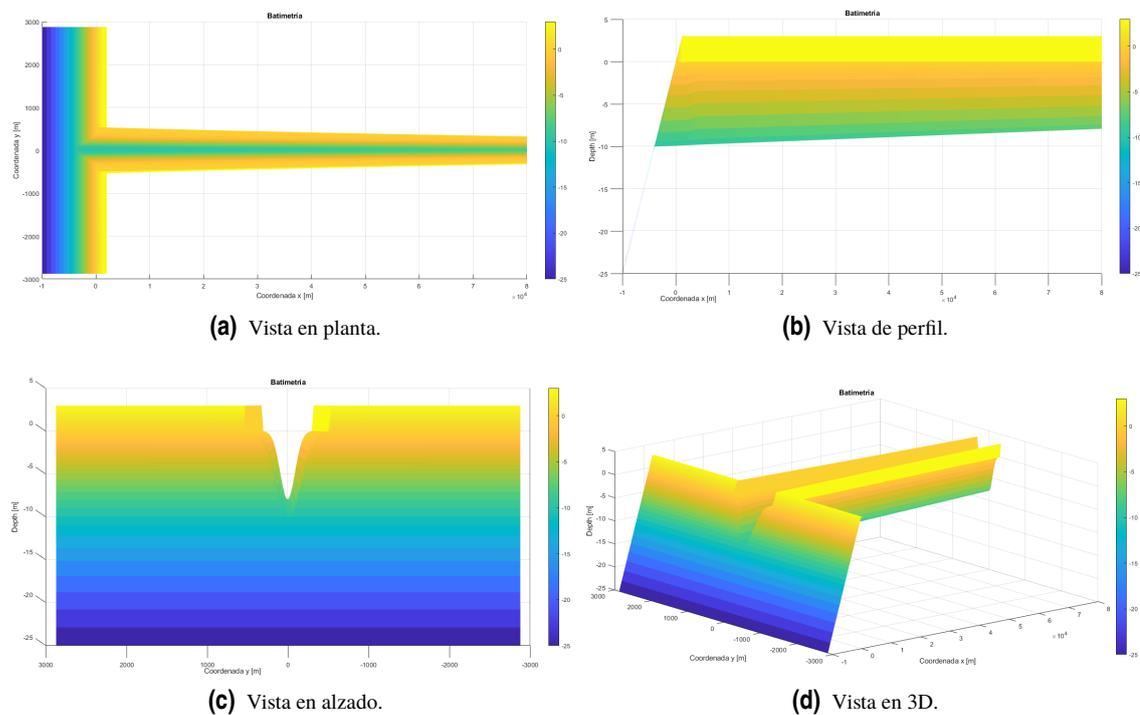


Figura 4.1 Geometría y batimetría del estuario.

4.2.3 Mallado y resolución

El mallado y la resolución de este modelo juegan un papel importante en la modelización del problema. En un modelo donde el periodo de simulación es tan excesivamente largo, es necesario establecer un balance entre la precisión en los resultados y el coste computacional. En simulaciones cuyo periodo de cálculo puede alcanzar valores del orden de decenas de días o semanas, se hace indispensable definir estrategias para reducir el tiempo de cálculo. Una de las estrategias seguidas en esta línea es el correcto aprovechamiento del mallado del modelo, reduciendo el número de celdas y, por tanto, el número de puntos de cálculo.

Los procesos hidrodinámicos que se van a estudiar, como por ejemplo la intrusión salina, se desarrollan principalmente en la zona central del estuario, es decir, entre la desembocadura y la zona aguas arriba donde

la influencia marina deja de ser relevante. Esto favorece que la definición del modelo en las zonas adyacentes a la descrita no requieran tanta precisión en el cálculo, y se pueda reducir la resolución del mallado que lo definen.

Se parte del mallado original, cuya construcción se basa en la subdivisión interna de una serie de regiones limitadas por *splines*, y consta de las siguientes características ([Llanes, 2022]):

- Una zona principalmente costera, de 7 kilómetros de largo (medidos longitudinalmente) y 12 kilómetros de ancho (medidos transversalmente).
- Una longitud de canal de 80 kilómetros, medidos desde el origen del sistema de referencia, situado en el centro de la sección de la boca del estuario, hasta la sección de descarga. El eje del canal viene dado por la recta $y=0$, de forma que quedan 500 metros a cada lado del eje en la desembocadura.
- Los contornos litorales que determinan la línea de costa están retraídos de forma que el agua pueda ascender y descender por el talud durante los periodos de llenante y vaciante, respectivamente. Para un talud de playa de 0.0025 el retranqueo planteado es de 2000 metros, de forma que desde el nivel cero (en $x=0$) se alcance el contorno a la cota +5.00, asignada a las paredes verticales del canal.

Además de los contornos litorales y los márgenes paralelos que constituyen el borde exterior del canal, se ubican rectas verticales cada 2 kilómetros a lo largo de todo el eje del estuario. Por otra parte, en el área litoral se ubica un *spline* vertical en 2000 metros, que permite mejorar la resolución en la desembocadura, y dos horizontales definidos por la recta $y=\pm 1500$ metros.

DDBoundaries

Para la optimización computacional del modelo se decide aplicar un *DDBoundary* (*Domain Decomposition Boundary*) un proceso de edición implementado por *Delft 3D* que permite, en un mismo modelo, definir tramos o intervalos con distintas características. Se decide dividir el modelo en tres zonas diferenciadas. El tramo 1 estará compuesto por la zona del modelo únicamente influenciada por el mar. El tramo 3 estará compuesto por la zona del modelo influenciada en su totalidad por el río. Y el tramo 2 será la zona con influencia tanto marina como fluvial, donde se desarrollarán los principales procesos hidrodinámicos que se quieren estudiar.

El contorno aguas abajo del tramo 2 se ha escogido adentrándose en la zona marina, no partiendo de la boca del estuario, para abarcar la pluma del estuario. El contorno aguas arriba se escogió de manera que se asegurase que la intrusión salina no sobrepasara dicha longitud. Para la definición de ambos contornos se lanzó una simulación del modelo completo en la que se preveía una subida del nivel del mar de 1 metro (se garantizaba así que ninguno de los escenarios finales alcanzaría dicho valor). Se seleccionó la coordenada x para la cuál la salinidad no superase en la capa más profunda el valor de 1 psu, definiendo así el contorno aguas arriba. La definición del contorno aguas abajo se escogió según un criterio subjetivo, pues la salinidad máxima se alcanzaba únicamente en el contorno exterior costero del modelo global inicial. Ante esto, se seleccionó un tramo en el que se podía considerar que la influencia del agua dulce no tenía relevancia, cuyos límites lo definen rectas paralelas a los *splines* que marcaban el inicio de aumento de resolución en la desembocadura, relativamente cercanos a ellos.

El mallado en el tramo 2 será aquel que fue definido inicialmente por [Llanes, 2022], que se asume suficiente para obtener un nivel de precisión adecuado en los resultados. El mallado en los tramos 1 y 3 se reduce, aumentando el tamaño de las celdas.

En la imagen 4.2 se observa la definición de cada uno de los tramos.

La ventaja en la definición de *DDBoundaries* no queda limitado al modelo 2D, sino que se amplía al modelo 3D, pues se pueden definir en cada uno de ellos distintos números de capas en la profundidad, de manera que el coste computacional se reduce también en una tercera dimensión. El tramo 2 se mantiene con 10 capas de profundidad como el modelo original, mientras que en los tramos 1 y 3 se reduce el número de capas a la mitad (5 capas).

Discretización vertical

En la discretización vertical, para realizar simulaciones de procesos oceánicos (desde problemas de dinámica costera a pequeña escala hasta problemas de cambio climático global) se emplean diferentes sistemas de coordenadas verticales. Entre los más destacados se encuentran el *isopycnal coordinates*, *sigma* (σ)-*coordinates* o *z-coordinates*. *Delft 3D*, en la dirección vertical permite dos tipos de mallado o discretización, el *z-coordinates* o el (*sigma* σ)-*coordinates* ([Ezer and Mellor, 2004]).

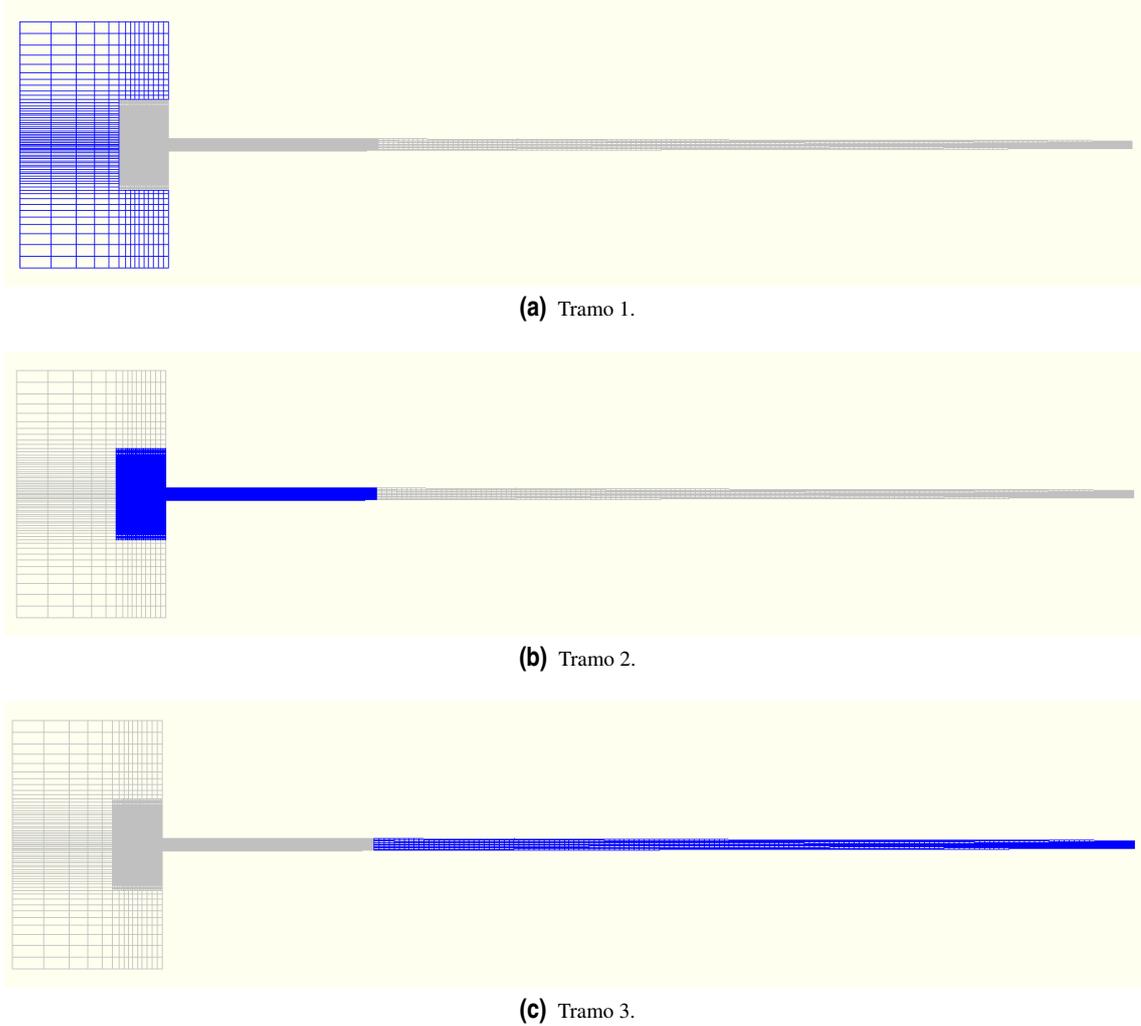


Figura 4.2 Definición de los *DDBoundaries*.

El primer tipo de coordenadas presenta líneas de coordenadas horizontales, prácticamente paralelas, con interfaces densas en regiones con pendientes del lecho escarpadas. La coordenada vertical es la profundidad ([Deltares, 2024b]).

El segundo tipo de coordenadas establece un número de capas constante a lo largo de la zona horizontal de cálculo, independientemente de la profundidad local del agua. La coordenada vertical sigue la batimetría. En consecuencia, el espesor relativo de las capas normalmente no es uniforme, pudiéndose definir matemáticamente el espesor de cada celda según la expresión 4.9 ([Llanes, 2022]). Este sistema permite una mayor resolución en las zonas de interés tales como la superficie libre o el fondo o lecho ([Deltares, 2024b]).

$$\Delta z_k(x,y,t) = \min[\zeta(x,y,t), z_k] - \max[-d(x,y), z_{k-1}] \quad (4.9)$$

Siendo ζ la superficie libre y d la profundidad del fondo.

La figura 4.3 ilustra gráficamente la técnica de cada uno de los sistemas descritos.

En este caso se usa el sistema *sigma-coordinates* dejando para el tramo 2 el mismo número de capas que se utilizó para el modelo original (10 capas con una relación de espesores de 11,25 % para las 8 capas intermedias, y de 5 % para las capas de la superficie y del fondo).

Los tramos 1 y 3, a los que se le redujo la resolución en las direcciones longitudinal y transversal, también se les reduce la resolución vertical, limitando el número de capas a 5, con una relación de espesores constante e igual a 20 % para todas las capas, pues en estos tramos no se requiere tanta precisión en los resultados.

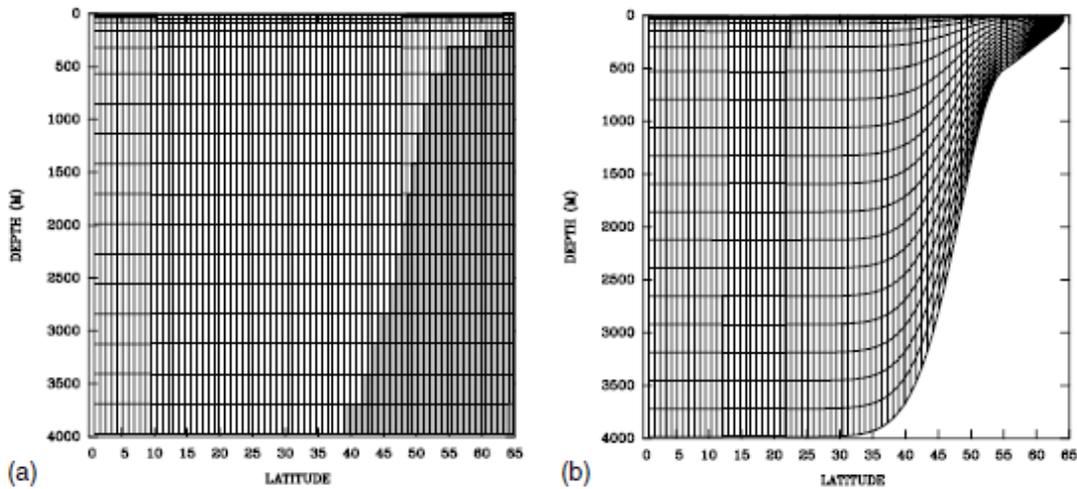


Figura 4.3 Ilustración gráfica de los dos sistemas de coordenadas verticales que emplea *Delft3D* ([Ezer and Mellor, 2004]).

Análisis de comprobación

Finalmente, se realiza un análisis de comprobación para confirmar la eficiencia del mallado, lanzando tres simulaciones con las mismas características, dos de ellas en 2D y una tercera en 3D, para un periodo de simulación de 2 días.

- 1ª simulación: se emplea el mallado del modelo original, pero se define el modelo en 2D, es decir, se eliminan las capas de profundidad, resultando en una única celda en vertical donde se promedian los valores de las variables.
- 2ª simulación: es similar a la primera simulación, en 2D, pero con la elección del nuevo mallado formado por los tres tramos de distinta resolución.
- 3ª simulación: se emplea el nuevo mallado completo, es decir, aquel definido por los tres tramos con su correspondiente resolución horizontal, y con su correspondiente resolución vertical.

Comparando los tiempos de cálculo para cada una de ellas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En dos dimensiones, el tiempo de cálculo se reduce en un 90% aplicando *DDBoundaries*.
- En tres dimensiones, el tiempo de cálculo se reduce en un 84% aplicando *DDBoundaries*.
- El tiempo de cálculo de un modelo 2D frente al modelo 3D es un 87% inferior.

Se concluye que aplicar *DDBoundaries* es una buena técnica para reducir el coste computacional de las simulaciones, y será una de las empleadas para mejorar la eficiencia computacional del modelo.

4.2.4 Parámetros físicos y numéricos

Definir los parámetros físicos de un modelo es un paso importante, pues de sus valores dependerá la veracidad del modelo, en tanto que debe reproducir correctamente el comportamiento que se espera (comprobando a través de datos de mediciones reales). Así, el primer paso a la hora de calibrar y validar un modelo es realizar un análisis de sensibilidad que permita detectar aquellos parámetros que tengan mayor influencia en el comportamiento del modelo y que por tanto deben establecerse con mayor precisión.

En la elaboración del modelo [Martín-Llanes and López-Ruiz, 2024] distingue, por un lado, los parámetros constantes, de menor impacto en el modelo, cuyos valores se encuentran mayormente aceptados y generalizados; y por otro lado, la rugosidad y la difusividad y viscosidad, tanto vertical como horizontal.

Dentro de los parámetros del primer grupo se encuentran la aceleración de la gravedad, la densidad del agua y la temperatura del agua, adoptando los valores de $9,81 \text{ m/s}^2$, 1000 kg/m^3 y 15°C , respectivamente.

En cuanto a los del segundo grupo, tras el análisis de sensibilidad, y calibración del modelo, optó por lo siguiente:

- El valor de la rugosidad se asume constante, introducido en el modelo a través del coeficiente de Chézy de valor $75 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- Los parámetros de viscosidad y difusividad vertical resultaron prácticamente invariables tras el análisis de sensibilidad, por lo que se asumieron valores constantes e iguales a $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente.
- Como consecuencia de ser el parámetro de mayor relevancia en el comportamiento del modelo, el coeficiente de difusividad y viscosidad horizontal se asume variable linealmente a lo largo del estuario, dependiente del ancho del estuario, de la profundidad y de la amplitud de la corriente de marea, variando de 0 a $30 \text{ m}^2/\text{s}$ y siendo igual para ambos. Para la plataforma continental se consideran constante e iguales al valor en la boca del estuario.

Todos ellos serán los utilizados en este modelo.

Los valores variables de la difusividad y viscosidad horizontal se introducen en este modelo mediante una interpolación de los datos originales en las mallas particulares de este proyecto, definidas en el apartado 4.2.3. *Delft 3D* permite introducir valores variables de difusividad y viscosidad a través de archivos .edy, que resultan de copiar y pegar los datos de los archivos .dep generados mediante la interpolación sobre cada uno de los tramos de los datos del archivo original. Esta acción se realiza dos veces, por representar tanto el valor de difusividad como el de viscosidad, y todo ello tantas veces como capas de profundidad haya. Se genera así un archivo .edy para cada tramo que permitirá definir en ellos los valores de dichos parámetros.

En cuanto a los parámetros numéricos es necesario destacar el llamado *Time step*, que es el intervalo de tiempo establecido para el cálculo de las sucesivas soluciones. Este parámetro es muy importante, pues de él depende la estabilidad del sistema. El intervalo temporal debe ser tal que permita la convergencia de la solución de un punto a otro. Esta condición se llama condición de Courant, y establece una relación entre la discretización espacial y la temporal que debe cumplirse en todo momento. Viene determinada por la expresión 4.10.

$$\delta t \leq \frac{\delta x}{|V \pm c|} \quad (4.10)$$

Siendo V la velocidad de la onda, c la celeridad de la onda, y δt y δx los valores de los intervalos temporal y espacial de la discretización, respectivamente.

La experiencia demuestra que valores del número de Courant por debajo de 10 mantienen la estabilidad en la resolución de las ecuaciones. *Delft 3D* en el módulo *Quickin* dentro de *Flow* permite visualizar, para un determinado *Time step*, el valor del número de Courant para cada celda.

Por otro lado, debido al diferente tamaño de celda que existe en cada tramo como consecuencia de la diferente resolución, y dentro del propio tramo 2 debido a la resolución variable, es necesario comprobar para cada tramo el valor del *Time step* que da lugar a números de Courant inferiores a 10 y seleccionar de entre ellos el mayor, de manera que se garantice que en los tres tramos se cumple la condición de Courant.

El valor del *Time step* finalmente seleccionado es 0,25 minutos.

4.3 Condiciones de contorno e iniciales

Al tratarse de un problema transitorio, para que el mismo esté bien planteado, es necesario definir las condiciones de contorno e iniciales.

4.3.1 Condiciones de contorno

El dominio queda definido por cuatro contornos, aquellos en los que será necesario imponer ciertas condiciones hidrodinámicas. Tres de ellos definen los límites del dominio en la zona litoral o aguas abajo del estuario, y uno de ellos define el límite del sistema aguas arriba del estuario o en la zona fluvial. Los tres primeros se conocen con los nombres de *Offshore*, *Neu-Top* y *Neu-Bottom*, y al último *Descarga*, tal y como se aprecia en la figura 4.4

- Contorno *Descarga*: definirá el límite superior del dominio del estuario, siendo perpendicular al flujo del río. En él se impondrá una descarga constante en el tiempo de valor $150 \text{ m}^3/\text{s}$ simulando la corriente fluvial del río en el estuario. Además, la distribución de salinidad a lo largo del contorno se considerará de cero *psu* durante el tiempo de simulación, pues representa la zona del estuario ya prácticamente convertida en río, sin influencia marina.

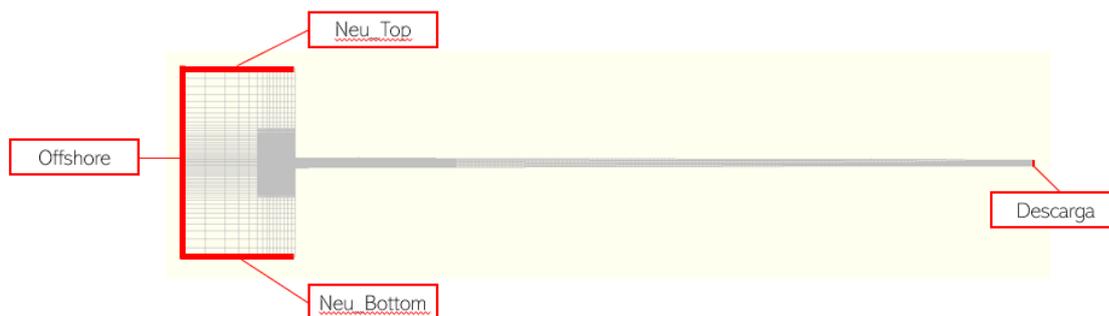


Figura 4.4 Definición de los contornos del dominio.

- Contornos *Neumann*: definen los límites laterales del estuario en la zona litoral, perpendiculares a la costa. En ellos se impondrá una condición de contorno tipo *Neumann*, como su propio nombre indica, de manera que la derivada de la superficie libre del mar con respecto a la dirección normal del contorno sea nula, es decir, en líneas perpendiculares a los contornos, la superficie libre del mar permanece constante, se anulan los gradientes. La salinidad en estos contornos se considerará máxima e igual a 36psu , pues se encuentran definiendo la zona litoral del estuario, y por lo tanto, el agua es completamente salada.
- Contorno *Offshore*: define el límite aguas abajo del estuario, paralelo a la línea de costa. En él se impondrán las condiciones de oleaje. Esta condición de contorno corresponde a una de las partes más importantes del modelado del problema, pues uno de los objetivos principales del presente trabajo es el análisis de la hidrodinámica del estuario bajo la influencia de la subida del nivel medio del mar.

Para cada caso de estudio, se aplicará una condición de contorno *Offshore* definida por una serie temporal formada por pares de puntos *tiempo - nivel del mar*.

El vector de tiempo comprende el conjunto de datos temporales (expresados en segundos) separados por un intervalo de tiempo de 3 horas, cuya longitud corresponde al periodo completo de la simulación.

El vector de nivel del mar es una superposición de los valores del nivel del mar predichos para las fechas de la simulación y de los valores de la subida del nivel medio del mar predichos por el IPCC.

Para obtener los primeros datos mencionados se descargaron los datos históricos de nivel del mar de la boya de Bonanza de la plataforma Puertos del Estado y se realizó un análisis armónico de los datos obteniéndose la composición de los armónicos de marea con sus correspondientes características (amplitud, fase, frecuencia...). Este análisis se llevó a cabo con la herramienta *ttide* de Matlab, que permite obtener las características de los principales armónicos que componen la señal aportada. De la predicción se toman las características de los principales armónicos de marea (M_2 , S_2), característicos de la marea que se da en la Andalucía Atlántica, y se predice la señal en el horizonte temporal escogido (50 años). Esta predicción se realiza con la herramienta *tpredic* de Matlab que a partir de las características de los armónicos aportadas devuelve una señal de marea en forma de serie temporal.

Para obtener los segundos valores mencionados (subida del nivel medio del mar predicha por el IPCC) se obtuvieron del IPCC (como se ha explicado en el apartado 2.4) las predicciones de los valores del nivel medio del mar para un horizonte temporal extenso (150 años). Se tienen datos cada 10 años, por lo que suponiendo un crecimiento lineal en este periodo, se realiza una interpolación lineal de estos datos sobre el vector de tiempo sobre el que se predice la marea.

Se superponen los dos arreglos obteniendo en el periodo de cálculo la predicción de la señal de marea con la subida de nivel del mar esperada. En el apartado 4.4.2, en las gráficas de la imagen 4.11 se representan para los 3 casos de estudio la condición de contorno aplicada en el contorno *Offshore*.

4.3.2 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales pueden ser de dos tipos:

- *Cold-Start* o fluido en reposo. Se considera que los valores iniciales están en reposo, y por lo tanto, las primeras horas de la simulación no serán válidas, pues correspondería al periodo de adaptación del programa hasta alcanzar las condiciones deseadas para el inicio del cálculo del modelo.

- *Hot-Start* o fluido con un campo de velocidad y unos niveles no nulos. Se proporciona mediante un archivo o mediante una simulación previa al modelo que permite comenzar el cálculo con las condiciones deseadas.

En el caso de este estudio, las condiciones iniciales que se aportarán al sistema serán unas de tipo *Hot-Start*, correspondientes a una simulación previa donde se alcanza el régimen estacionario. Permite iniciar las simulaciones del sistema en un régimen real y compatible con las condiciones de contorno impuestas.

La simulación previa se realizó en el mismo modelo dotándole de una condición de contorno *Offshore* definida por una serie temporal similar a las especificadas para las simulaciones finales, de manera que al final del cálculo se alcance un régimen estacionario, con el nivel del mar correspondiente al predicho para la fecha de inicio de las simulaciones finales. Las características hidrodinámicas del modelo para esta fecha final serán las características de inicio de cada una de las simulaciones del proyecto.

Con esta condición se consigue reducir el coste computacional de la simulación, pues utilizar una condición *Cold-Start* implicaría añadir tiempo de cálculo adicional, que dada la magnitud de las simulaciones no conviene añadir.

4.4 Diseño experimental

4.4.1 Alternativas para la reducción del coste computacional

Con intención de continuar en la optimización del coste computacional, es necesario estudiar técnicas alternativas que permitan reducir el tiempo de cálculo sin perder precisión en los resultados. Una solución ya empleada fue la reducción de la resolución del mallado del modelo con el objetivo de reducir los puntos de cálculo, obteniéndose buenas conclusiones y una reducción significativa del tiempo de cálculo. No obstante, no resulta suficiente a la hora de plantear escenarios con un periodo de simulación de cerca de 50 años, pues los periodos de cálculo siguen alcanzando valores poco rentables, demasiado excesivos.

En un primer intento de buscar una posible alternativa, se estudió reducir el tiempo de simulación a la mitad introduciendo una marea astronómica con armónicos de marea $M4$ y $S4$. Estos armónicos de marea presentan un periodo que resulta la mitad exacta del periodo de los armónicos $M2$ y $S2$, de manera que el mismo número de ciclos de marea que se producirían en el modelo inicial, se producen en este caso en la mitad de tiempo. Con el mismo objetivo, se estudió definir a mano los armónicos mediante un tipo de forzamiento armónico, indicando las amplitudes, fases y frecuencias. A priori ninguno del resto de los parámetros se vería afectado, simplemente se aceleraría el proceso. Para comprobar este método se crearon tres modelos similares, diferenciándose en el tiempo de simulación y en la condición de contorno *Offshore*.

- El primero de ellos presenta un tiempo de simulación de 8 días al que se le impone como condición de contorno *Offshore* una marea astronómica cuyos armónicos de marea sean $M2$ y $S2$, con las amplitudes y fases propias del lugar de emplazamiento (1 m de amplitud y 180° de fase para el armónico $M2$, y 0,25 m de amplitud y 90° de fase para el armónico $S2$)
- El segundo presenta un tiempo de simulación de 4 días al que se le imponen los armónicos de marea $M4$ y $S4$, con las mismas amplitudes y fases que el modelo anterior.
- El tercero presenta un tiempo de simulación de 4 días al que se le impone un forzamiento armónico con las mismas amplitudes y fases el segundo modelo, y la frecuencia correspondiente a la mitad del periodo.

El resto de características del modelo no se modifican, quedando iguales que las definidas a lo largo de esta sección. El objetivo es comparar que los resultados no difieren mucho dentro de un cierto margen de error. Para ello se adimensionalizaron los vectores de tiempo de manera que los distintos valores de la variable hidrodinámica evaluada en cada momento se superpusieran y se pudieran comparar sobre el mismo intervalo de tiempo.

Tras lanzar el cálculo de los tres modelos y analizar los resultados se obtuvieron dos conclusiones principales:

- En primer lugar, reducir el periodo de simulación a la mitad disminuye el tiempo de cálculo en un 33 % según el segundo modelo y en un 60 % según el tercer modelo, que ya supone una ventaja importante a la hora de optimizar el tiempo de cálculo, pues aunque a escalas del orden de horas de cálculo la diferencia no sea tan significativa (una hora de diferencia), a grandes escalas, del orden de días o semanas de cálculo, la diferencia resulta bastante importante.

- Por otro lado, tras el análisis de las variables hidrodinámicas más importante se observó un desfase importante entre los resultados de ambas simulaciones. Particularmente, al comparar los resultados del nivel del mar, se observa un doble desfase: entre pleamares y bajamares, y entre mareas vivas y muertas. Esto ocurre porque no se están teniendo en cuenta los periodos quincenales que dan lugar a esa variación en las amplitudes del nivel del mar, de manera que mientras que en el modelo de 8 días se ha alcanzado la mitad del periodo quincenal, y por lo tanto se ha abarcado la marea viva completa (por ejemplo), el modelo de 4 días ha alcanzado únicamente un cuarto del periodo quincenal, es decir, ha abarcado la mitad de la marea viva (siguiendo con el ejemplo). Como consecuencia, no son resultados comparables, no se encuentran en la misma escala temporal y por lo tanto comparar dichos resultados carecería de sentido.

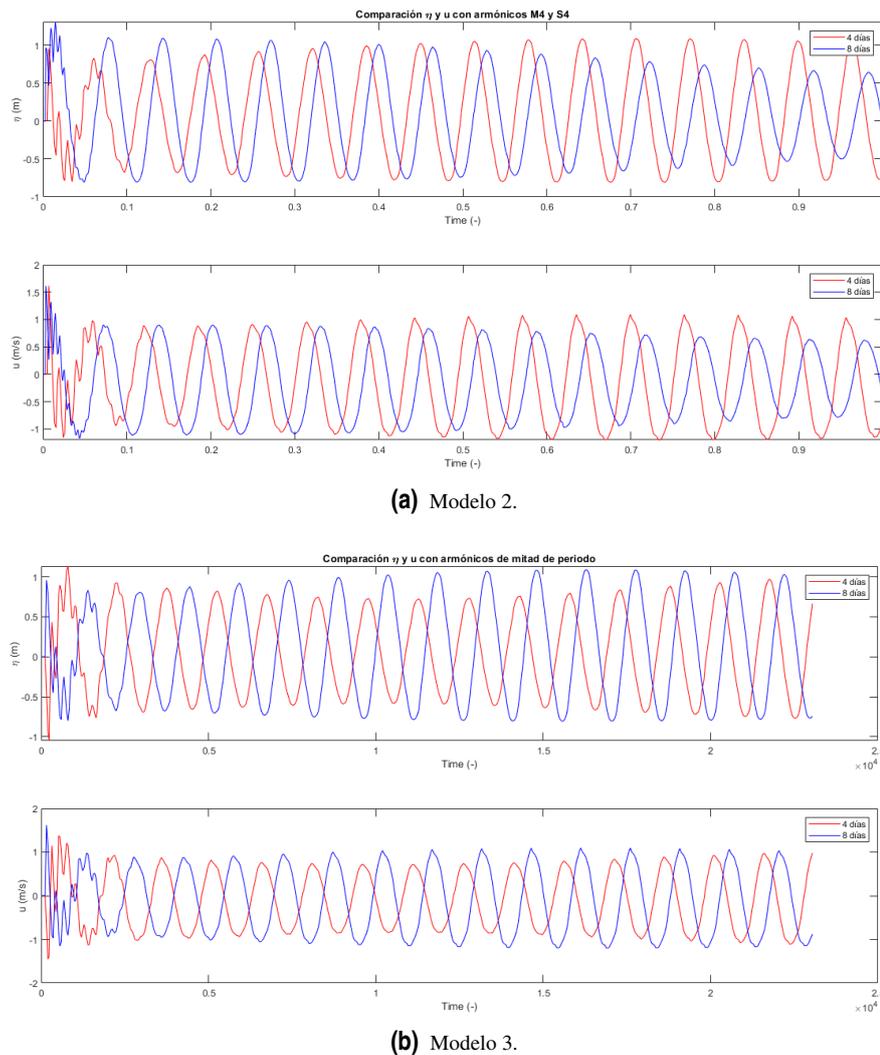


Figura 4.5 Comparación de las principales variables hidrodinámicas de los dos modelos de aceleración con respecto al de referencia.

Una posible solución requeriría realizar una simulación de cada modelo con un periodo de simulación lo suficientemente grande como para poder seleccionar dentro de los resultados un periodo concreto que permita compararlos. Un ejemplo sería identificar para cada uno de los modelos el valor de la máxima pleamar y seleccionar un periodo de igual longitud alrededor de este valor. Sin embargo, esta solución presenta un cierto grado de subjetividad y sería necesario analizar su veracidad y por lo tanto la de la comparación de sus resultados. En el limitado intervalo de tiempo en el que se desarrolla este trabajo resulta necesario buscar otras alternativas.

La segunda alternativa que se estudió fue la aceleración del proceso, es decir, alcanzar el nivel medio del mar esperado para el horizonte temporal en un intervalo de tiempo inferior. De esta manera se podría reducir

el tiempo de cálculo que requerirían 50 años de simulación a un tiempo razonable, asumible, que produzca los mismos resultados que se darían tras el transcurso real del tiempo. Este es el método de aceleración que se empleará en el presente trabajo y que se describe a continuación.

Se decide escoger como tiempo de simulación un año, un periodo que abarca todas las variaciones posibles (todas las estaciones y los cambios a menor escala que en ellas se produce). Se pretende alcanzar en el periodo de tiempo de 1 año el incremento de nivel medio del mar que se alcanza en el horizonte temporal, predicho por el IPCC. Para ello se realiza el mismo proceso que se explicó en el apartado 4.3.1, de manera que la condición de contorno *Offshore* se define como una serie temporal de datos del nivel del mar formados por la superposición de dos tipos de datos. El primer tipo es la predicción de marea para el año de simulación indicado, y el segundo tipo es la interpolación de los datos de nivel del mar predichos por el IPCC en el intervalo de tiempo descrito (un año). De esta manera se obtiene una serie temporal como condición de contorno que permite alcanzar el nivel predicho para 50 años en el pequeño intervalo de 1 año.

Para evaluar la aceptabilidad de este método se realizó un análisis de control. Se lanzaron las simulaciones de dos modelos con las mismas características, pero con dos periodos de simulación distintos: uno de un año y otro de dos años. El de un año de duración correspondería a la aceleración del de dos años, de manera que la condición de contorno que se le introduce al primero de ellos es la de la serie temporal donde se alcance al final de la simulación el valor del nivel del mar que se alcanza al final de la segunda. Así representado gráficamente queda en la figura 4.6.

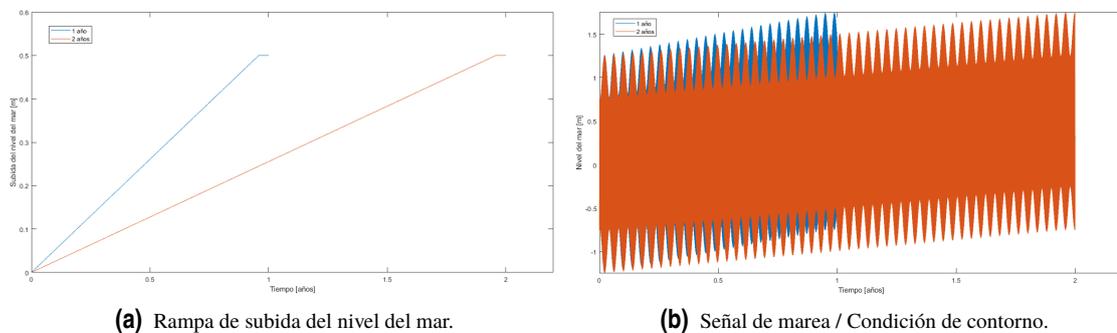


Figura 4.6 Condición de contorno *Offshore* para los dos modelos del análisis de control.

El objetivo de este análisis de control es comparar que las principales variables hidrodinámicas no varían dentro de un cierto margen de error. Para ello, se añadió a cada simulación un periodo de 15 días donde el nivel medio del mar de la condición de contorno permaneciese constante, de manera que la condición de contorno en esos instantes no difiere de una marea astronómica corriente, dominada por los armónicos M_2 y S_2 . Una vez lanzadas las simulaciones se compararon los resultados del nivel del mar, de la salinidad, y de la velocidad media, representándolas en solo 5 puntos para dar mayor claridad a las gráficas (4.7, 4.8, 4.9)

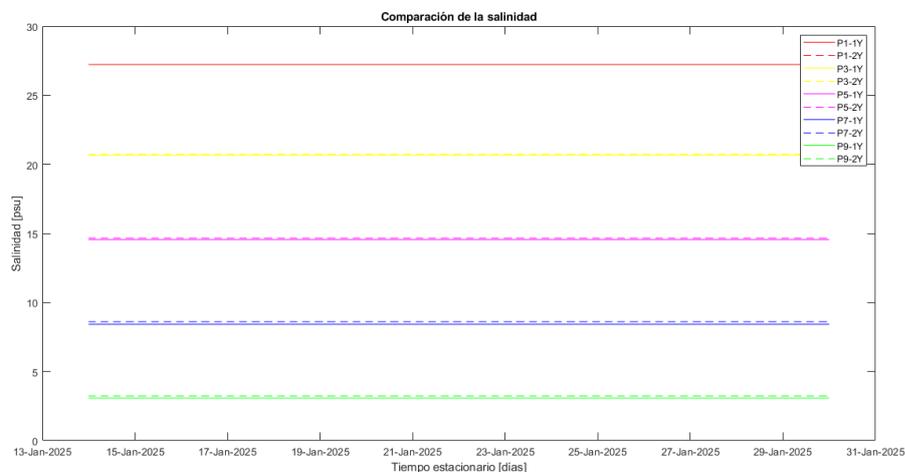


Figura 4.7 Comparativa de la salinidad media en los puntos de observación del análisis de control.

De la figura 4.7 se puede deducir lo que a priori se podría haber intuido: para cada punto de observación el valor medio de la salinidad va decreciendo. Para el análisis de control, los puntos de observación se definieron a lo largo del eje longitudinal del estuario, estando el primero situado en la boca del estuario y el último en las proximidades del límite aguas arriba del tramo 2. Ninguno alcanza el valor máximo (36 psu) o mínimo (0 psu) pues todos ellos se encuentran comprendidos dentro del tramo 2. En consecuencia, la salinidad media en los primeros puntos, más cercanos al dominio costero será mayor que la de los últimos puntos, más influenciados por el dominio fluvial.

Por otro lado, cabe destacar la comparación, para cada punto de observación, de la salinidad media en cada una de las dos simulaciones que se lanzaron a calcular en el análisis de control (representados con el mismo color para cada punto y con distintos estilos de línea para cada simulación). Como se observa, la diferencia en la salinidad media es mínima.

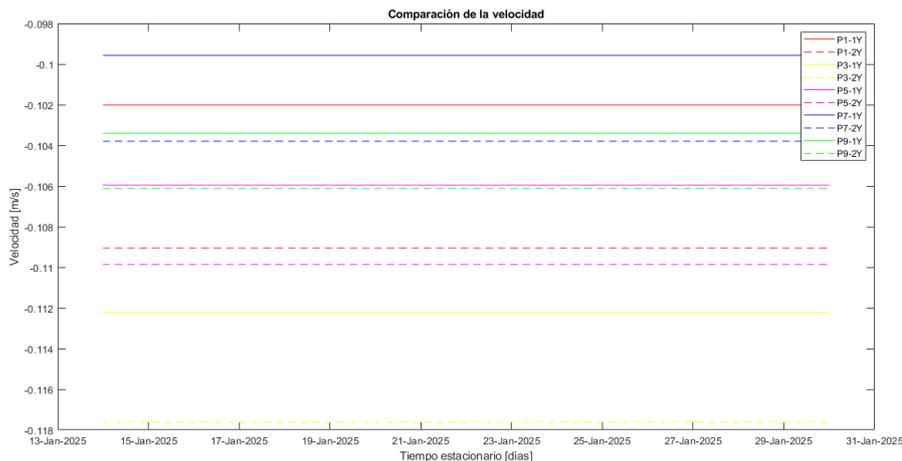


Figura 4.8 Comparativa de la velocidad media en los puntos de observación del análisis de control.

De la figura 4.8, observando la escala del eje de ordenadas, todos los valores de velocidad se encuentran comprendidos en el intervalo $(-0,098 -0,118)$ [m/s], es decir, que todas oscilan cerca del cero pero desplazado unas décimas en dirección negativa. Esto es debido a que el tramo está dominado, como ya ha sido mencionado, tanto por la descarga fluvial (que es constante en dirección positiva) y la marea, que produce una oscilación provocando el movimiento en ambas direcciones, de manera que en dirección positiva o aguas arriba del estuario la descarga fluvial resta velocidad a la marea, mientras que en la dirección negativa o aguas abajo del estuario le suma valor, haciendo que el eje de referencia de las oscilaciones de la velocidad quede desplazado a la izquierda del cero, es decir, en valores negativos de velocidad.

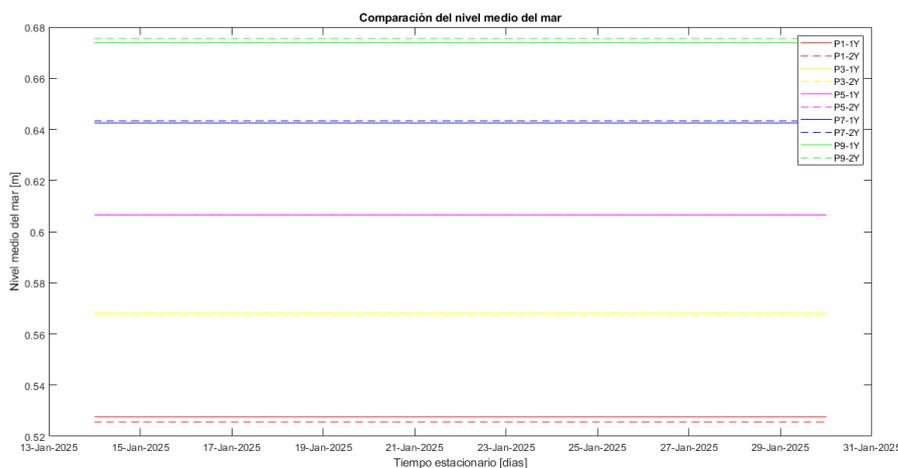


Figura 4.9 Comparativa del nivel medio del mar en los puntos de observación del análisis de control.

En primer lugar, de la gráfica de la figura 4.9 resulta destacable cómo, a pesar de haber establecido en la

condición de contorno un nivel medio del mar de 0,5 m en el intervalo de tiempo estacionario, a medida que se avanza positivamente en el estuario el nivel medio del mar aumenta. Este efecto podría estar provocado por la diferencia de densidades que existe a lo largo del estuario debido al diferente grado de salinidad. Esto propicia a un desequilibrio de las presiones hidrostáticas entre las distintas secciones transversales que provoca que el nivel del mar en las proximidades de la intrusión salina sea un poco mayor que en el mar.

Por otro lado, la diferencia relativa que existe entre las dos simulaciones del análisis de control para cada uno de los puntos de observación también es prácticamente despreciable.

En la tabla 4.2 se resumen las diferencias relativas porcentuales que se produce con la aceleración del modelo para las distintas variables en los diferentes puntos de observación, observándose como el error máximo cometido es de un 6,45 %.

Tabla 4.2 Diferencias relativas de las variables hidrodinámicas en el análisis de control [%].

Variable	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Salinidad	0.01	0.14	0.30	0.50	0.76	1.23	2.00	3.18	5.01
Velocidad	6.45	4.60	4.59	4.22	3.55	3.86	4.06	3.26	2.56
Nivel del mar	0.39	0.27	0.14	0.06	0.00	0.08	0.12	0.19	0.25

Se concluye por tanto que el proceso de aceleración es una buena forma de optimización del tiempo de cálculo, que puede dar como resultado buenas aproximaciones a los modelos con los tiempo de simulación reales.

4.4.2 Puntos de observación

Siguiendo en la línea de la eficiencia computacional, se definirán en este apartado los puntos de observación que han sido seleccionados para el análisis de los resultados.

Dada la magnitud de los archivos generados de las simulaciones, resultados de un año de periodo de simulación, el manejo de los datos es lento y limitado, por lo que se decide seleccionar ciertos puntos de observación cuyos datos y resultados serán los empleados para el análisis de los resultados de las simulaciones.

Se seleccionarán los puntos o celdas situadas en el eje longitudinal del estuario, junto con los puntos correspondientes a cuatro secciones transversales a lo largo del tramo 2 del estuario. De esta manera se abarcan las tres dimensiones del modelo, la longitudinal a través del thalweg, la transversal a través de las secciones transversales, y la vertical a través de las celdas en profundidad.

De esta manera, los archivos que se emplearán para el análisis de los resultados serán de mucho menor tamaño, pues solo continen los datos de un número reducido de celdas en comparación al número total de celdas del modelo.

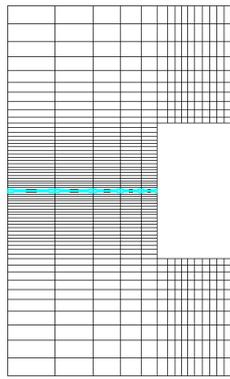
Los puntos de observación localizados sobre la malla de estudio se pueden observa en la figura 4.10.

4.4.3 Diseño experimental

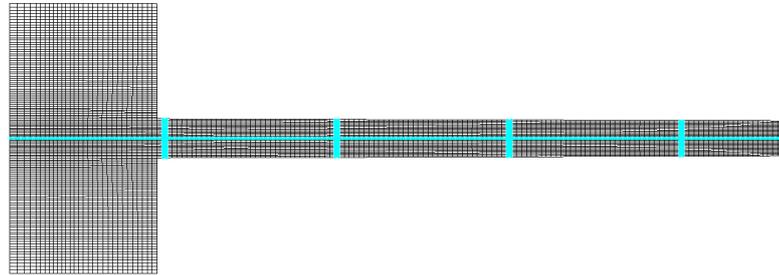
El proceso de aceleración se realiza con cada uno de los escenarios físicos seleccionados para el estudio y que han sido definidos en el apartado 4.1, de manera que los tres casos de estudio se reducen a tres modelos de un único año de periodo de simulación en el que cada uno de ellos alcance el incremento del nivel medio del mar predicho para cada uno de ellos al final de la simulación.

En la figura 4.11a se comparan en la misma gráfica la rampa o el incremento del nivel medio del mar que ha sido obtenido a través de la interpolación lineal de los datos del IPCC para cada uno de los escenarios, junto con la gráfica que muestra la condición de contorno *Offshore* que se introduce en cada uno de los modelos finales, resultado de la superposición de los datos previamente mencionados con la marea astronómica predicha para el intervalo temporal.

Con esta condición de contorno y con el resto de condiciones y características del modelo previamente descritas, se lanzan a calcular los tres modelos, uno para cada escenario físico, junto con un modelo base o referencia al que no se le aplique ninguna subida del nivel medio del mar, únicamente los armónicos de marea M_2 y S_2 . Los resultados finales del proceso se analizan en el próximo apartado 5.



(a) Tramo 1.

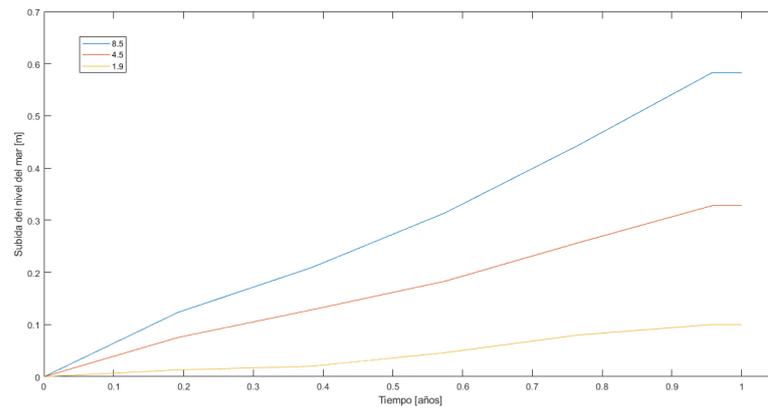


(b) Tramo 2.

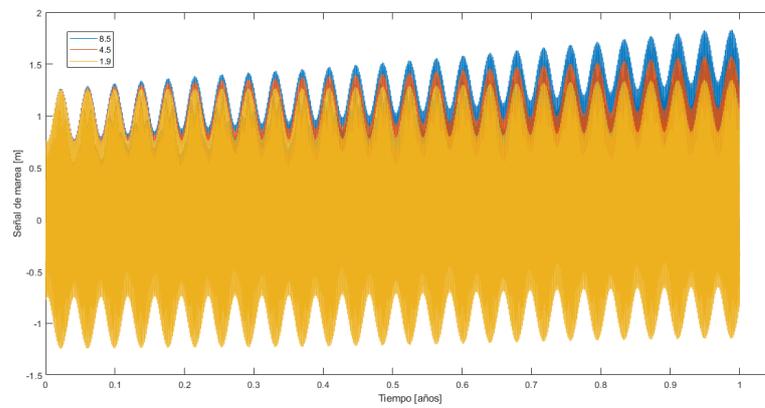


(c) Tramo 3.

Figura 4.10 Localización de los puntos de observación.



(a) Rampa de interpolación de subida del nivel del mar.



(b) Señal de marea - Condición de contorno *Offshore*.

Figura 4.11 Condición de contorno *Offshore* para cada los escenarios físicos.

5 Resultados

Se abordan en esta sección los resultados de las simulaciones descritas en la sección anterior y por tanto las conclusiones finales que se obtienen de este proyecto. Se analizan los efectos que la subida del nivel del mar produce en la hidrodinámica de un estuario idealizado, y en su salinidad.

Dada la envergadura de las simulaciones y la dificultad para trabajar con la gran cantidad de datos que resultan del cálculo, los resultados se estudiarán en dos escalas espaciales: longitudinalmente a través del thalweg o eje del estuario, y transversalmente mediante cuatro secciones transversales definidas equiespaciadas a lo largo del tramo 2. Estas dos dimensiones están definidas a partir de los puntos de observación que se describieron en el apartado 4.4.2.

Las simulaciones que se describieron en el diseño experimental tienen todas como condición de contorno en Descarga una descarga constante e igual a $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta descarga constante, sin variación temporal, implica que el proceso esté en su mayoría dominado por la marea.

5.1 Hidrodinámica

5.1.1 Nivel del mar

El efecto más visual que resulta tras el lanzamiento de las simulaciones es la subida del nivel del mar que se produce en el estuario. Así, analizando la variación espacio-temporal del nivel del mar para los tres últimos ciclos de mareas (descendiendo de marea viva a marea muerta), en el periodo estacionario, libre de incremento del nivel, y para el thalweg, se observa cómo se alcanzan valores máximos y mínimos del nivel del orden del incremento máximo que se incluyó para cada simulación.

En primer lugar, hay que mencionar que se observa lo que se pretendía obtener, que el modelo simulara el aumento del nivel del mar aplicado en las condiciones de contorno, uno de los retos que se pretendía alcanzar.

Si se observa la escala de color asociada a cada uno de los diagramas de la figura 5.1 se comprueba cómo los valores máximos aumentan para cada uno de los escenarios, y los mínimos disminuyen en comparación al escenario de referencia, de manera que mientras que el nivel sin cambios futuros oscilaría en torno al cero, a medida que se avanza en los escenarios, el nivel de referencia va aumentando, siendo máximo para el escenario SSP5-8.5.

Un detalle a comentar es la atenuación de la onda de marea que se produce a medida que se avanza positivamente en el estuario, los valores máximos del nivel del mar al final del estuario son inferiores a los del inicio. Esto confirma que a medida que se avanza aguas arriba del estuario la fricción supera a la convergencia de las márgenes, y la onda de marea se atenúa. Este fenómeno también se puede observar con mayor claridad en la figura 5.2, en la que se comparan las oscilaciones de marea para dos puntos de observación distintos: uno en las proximidades de la desembocadura y otro en las proximidades de la intrusión salina, como se verá más adelante.

Dado que la descarga fluvial es constante, no se distingue ningún efecto de esta sobre el nivel del mar, éste está dominado por la marea prácticamente en su totalidad.

En la figura 5.2 se distingue claramente la atenuación que experimenta la onda de marea a lo largo del estuario, y en consecuencia cómo la carrera de marea va disminuyendo hasta la mitad de su valor inicial aproximadamente. No se aprecian apenas cambios en el desarrollo de la onda de marea para los distintos escenarios, destacando únicamente ese incremento del nivel medio sobre el que oscilan los armónicos, y que bien puede comprobarse en las dos últimas gráficas de la figura.

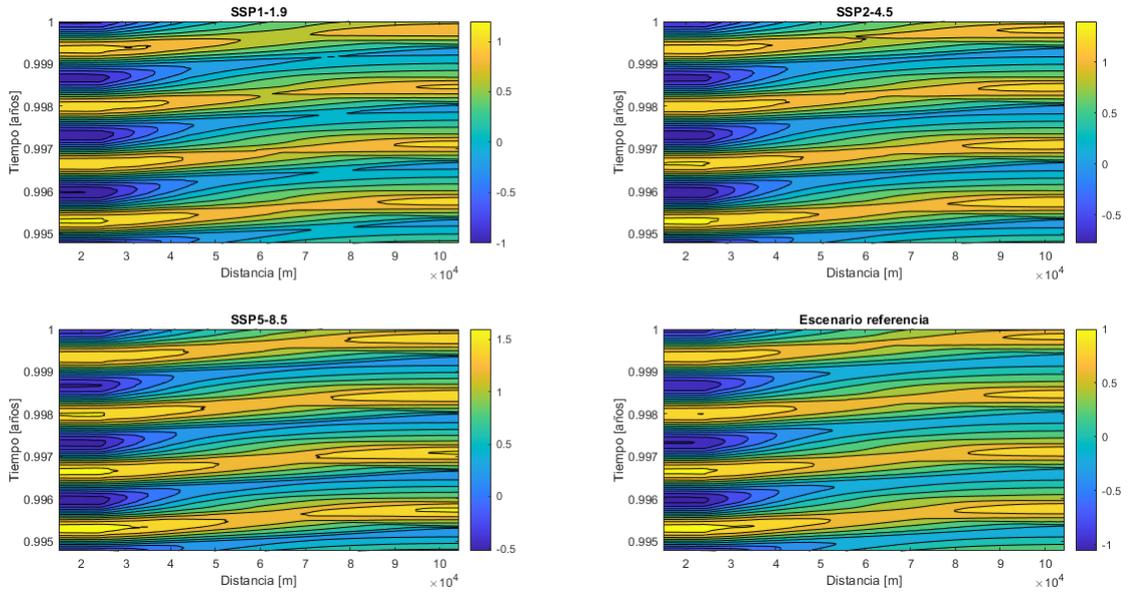


Figura 5.1 Variación espacio-temporal del nivel del mar en el eje del estuario para los distintos escenarios..

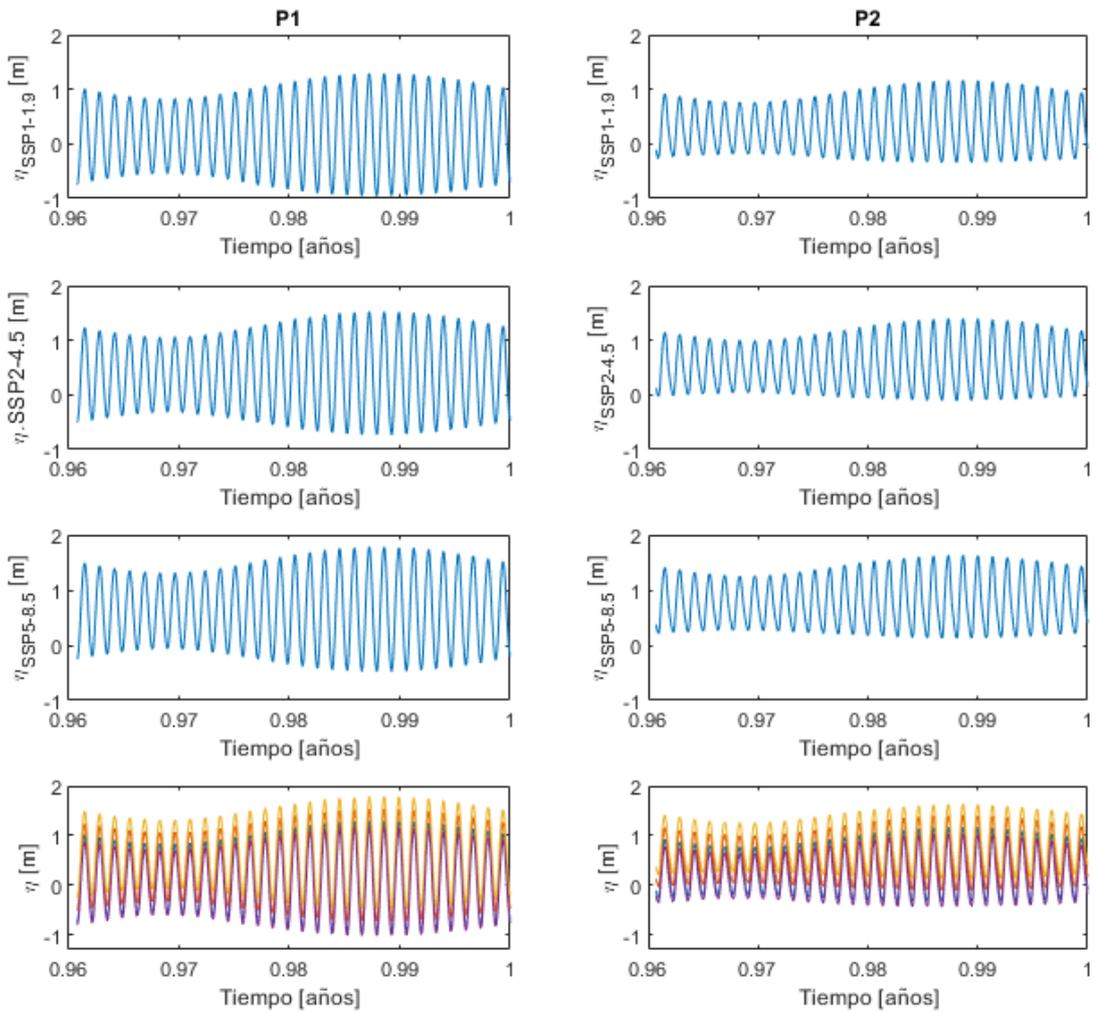


Figura 5.2 Evolución temporal del nivel del mar para los distintos escenarios en los puntos P_1 y P_2 .

Otro detalle que se podría mencionar es cómo comienza a cobrar algo de importancia la descarga fluvial a medida que se escala aguas arriba en el estuario. En el punto P_2 de la figura 5.2 se observa como los valores de los ciclos semidiurnos no son simétricos, siguen trazando ese recorrido sinusoidal propio de los periodos quincenales, pero los valores de las bajamares se encuentran más uniformados. Esto podría estar debido a, como se ha dicho, la influencia de la descarga fluvial en este punto del estuario, que en los momentos de bajar mantiene uniformes estos valores, así como a un incremento en la asimetría de la marea provocado por la interacción de las componentes semidiurnas y cuatridiurnas.

Si se comparan los niveles promediados del nivel del mar para cada uno de los escenarios en el periodo de 15 días sin incremento del nivel en la condición de contorno, y en los dos puntos de discusión, tal y como se aprecia en la figura 5.3, se puede observar como existe un ligero aumento del nivel medio del mar a medida que se avanza en el estuario, siendo para cada uno de los escenarios mayor en el punto P_2 que en el P_1 . Esto puede deberse a dos fenómenos: el primero, como se ha comentado sobre estas líneas, a la influencia de la descarga fluvial, que aumenta el nivel en las zonas donde comienza a ser dominante, uniformando los valores de las bajamares y desplazando el nivel medio hacia arriba. El segundo lugar, a las corrientes residuales que se producen como consecuencia de la diferencia de salinidad que existe entre los dos lados de la sección, un desequilibrio en las presiones hidrostáticas que aumenta ligeramente el nivel en la zona de la intrusión, aunque este efecto tendrá una importancia menor que el primero.

Al comparar este incremento de nivel medio y su diferencia porcentual (tabla 5.1), se observa como este incremento es lineal, siguiendo la misma pendiente, pues si bien la diferencia de nivel para cada uno de los escenarios es prácticamente la misma (alrededor de 0,6 m), la diferencia porcentual va disminuyendo para cada uno de los escenarios, siendo menor para el escenario más desfavorable ($SSP5 - 8.5$). Por lo tanto, este nivel seguirá aumentando hasta el límite de la intrusión, que como se verá, crecerá con los escenarios. Esto implica que a medida que aumente el nivel medio del mar de manera global, el ligero incremento que se produzca en el nivel medio a lo largo del estuario como consecuencia de la diferencia de densidades será cada vez mayor.

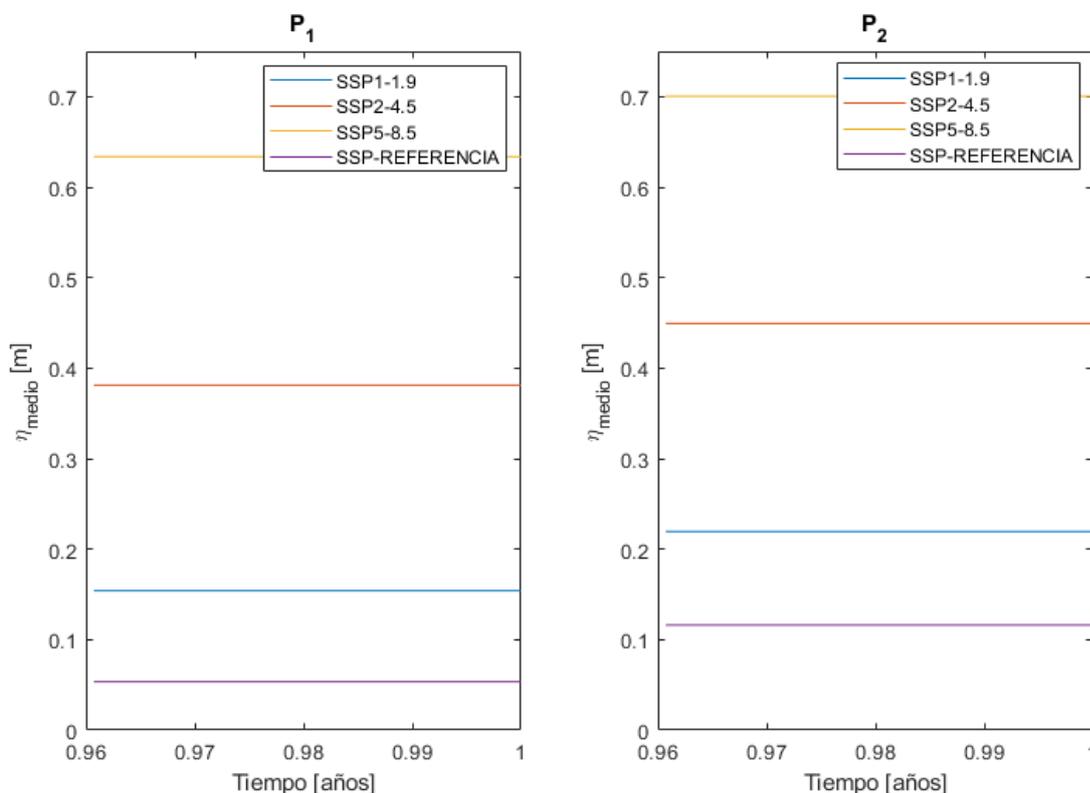


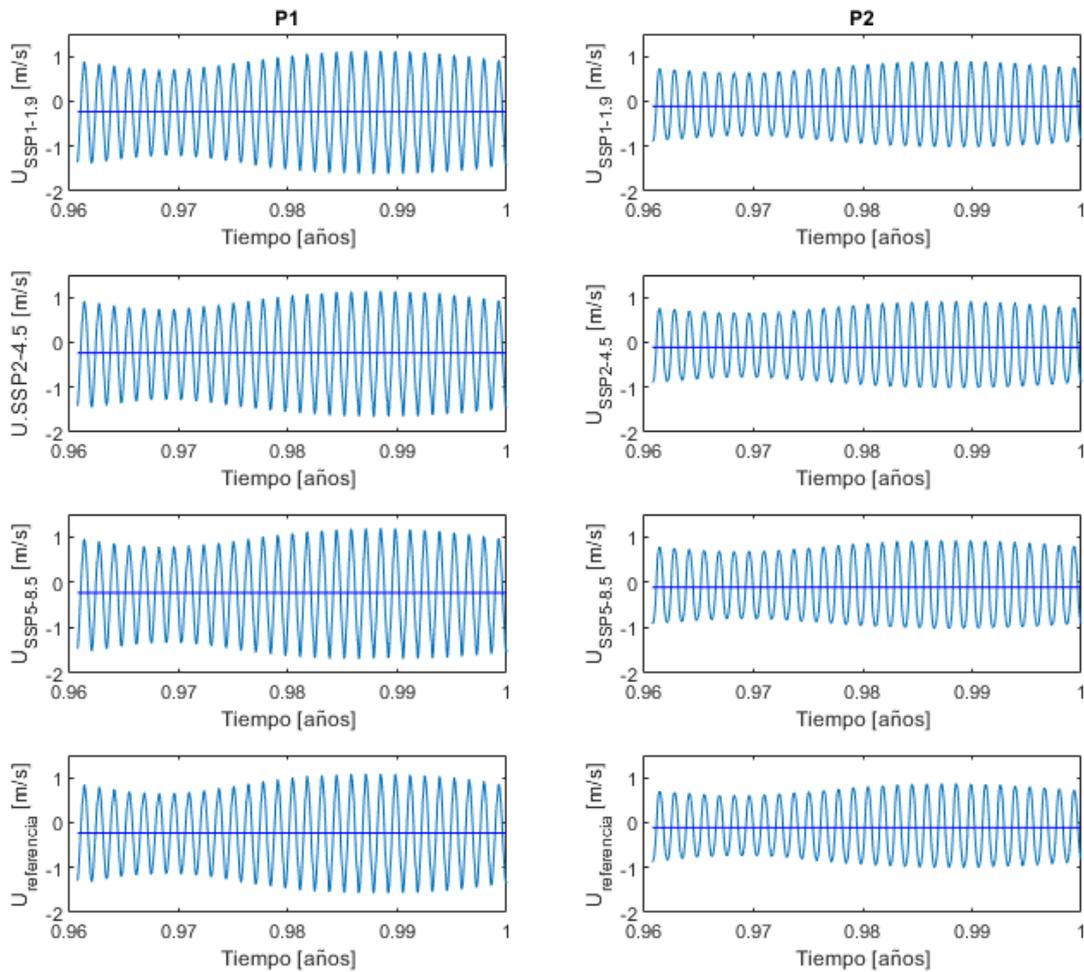
Figura 5.3 Comparación de los niveles medios del mar para cada escenario, en los puntos P_1 y P_2 .

Tabla 5.1 Comparación del aumento del nivel medio del mar para los puntos P_1 y P_2 .

Localización	SSP1-1.9	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP-REFERENCIA
P1 (m)	0,1541	0,3812	0,6337	0,0536
P2 (m)	0,2195	0,4494	0,7003	0,1162
Diferencia (m)	0,0654	0,0682	0,0666	0,0626
Dif (%)	42,44	17,9	10,51	116,8

5.1.2 Velocidad

En relación a las corrientes que se forman en el estuario, se puede resaltar que los armónicos de velocidad siguen la misma estructura que los armónicos de marea, experimentando la misma atenuación del armónico que la marea, dejando claro que el proceso está principalmente dominado por la marea. Para ello se ha representado gráficamente en la figura 5.4 la evolución temporal de la componente longitudinal de la velocidad en los mismos puntos de referencia que los que se utilizaron para el nivel del mar y para cada uno de los diferentes escenarios.

**Figura 5.4** Evolución temporal de la velocidad longitudinal para los distintos escenarios en los puntos P_1 y P_2 .

Como resultado de la influencia de la descarga fluvial, el promedio de la velocidad no coincide con el cero exacto, sino que se desplaza a un valor negativo. Dado que la descarga tiene la misma dirección (negativa) constantemente, la influencia de la descarga durante los momentos de pleamares es desfavorable, ralentizando el flujo en dirección positiva, mientras que en los momentos de bajamares la influencia es positiva, acrecentando la velocidad del flujo en dirección negativa. En consecuencia, el promedio está desplazado

negativamente.

Aunque no se aprecia con precisión en las gráficas, en la tabla 5.2 se ha calculado el rango de amplitud que abarca la velocidad para cada uno de los puntos de referencia y de los escenarios. Aunque la diferencia no es muy significativa, se observa que la tendencia es creciente según se recorren los escenarios, siendo mayor en el escenario más desfavorable (SSP5-8.5), y mayor la diferencia en la zona de la desembocadura (P_1) que medido en el estuario (P_2).

Tabla 5.2 Rango de velocidad para los distintos escenarios en los puntos P_1 y P_2 .

	SSP1-1.9	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP-REFERENCIA
P1 (m/s)	2,7370	2,8076	2,8787	2,6586
P2 (m/s)	1,9152	1,9286	1,9391	1,8692

5.1.3 Armónicos de marea

Para visualizar en profundidad algunos de los detalles que se han analizado en los apartados anteriores, principalmente la atenuación de la onda de marea, se procede a realizar un análisis armónico a las principales variables de la marea, la superficie libre y la velocidad longitudinal. La amplitud que desarrollen estos armónicos a lo largo del estuario dependerá del término que prevalezca en cada punto, la fricción o la convergencia. Así, en las primeras imágenes (5.5, 5.6, 5.7 y 5.8) se observan los resultados principales del análisis armónico para la superficie libre (amplitud y fase de los principales armónicos desde el punto de vista energético; M_2 y S_2), mientras que en las imágenes (5.9, 5.10, 5.11 y 5.12) se representan los resultados del análisis para la velocidad. Se incluyen también otras variables derivadas de estos resultados, como son el desfase entre el nivel del mar y la velocidad, y la asimetría.

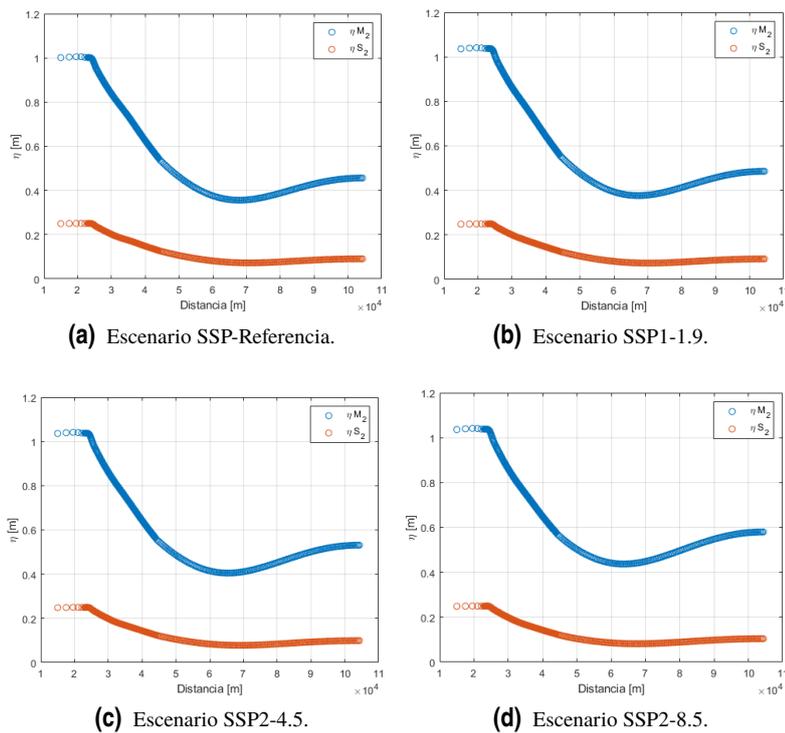


Figura 5.5 Amplitud de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios.

En relación a los armónicos de la superficie libre, obsérvese cómo para todos los escenarios (figura 5.5) se produce una disminución de la amplitud de los armónicos, más pronunciado en el armónico de mayor relevancia (M_2) y más suave en el armónico de menor importancia (S_2). Este hecho verifica la atenuación de la amplitud del nivel del mar que se comentaba en el apartado 5.1.1. Sin embargo, se puede destacar que mientras que en la primera mitad del estuario se produce una fuerte disminución de la amplitud, poniendo

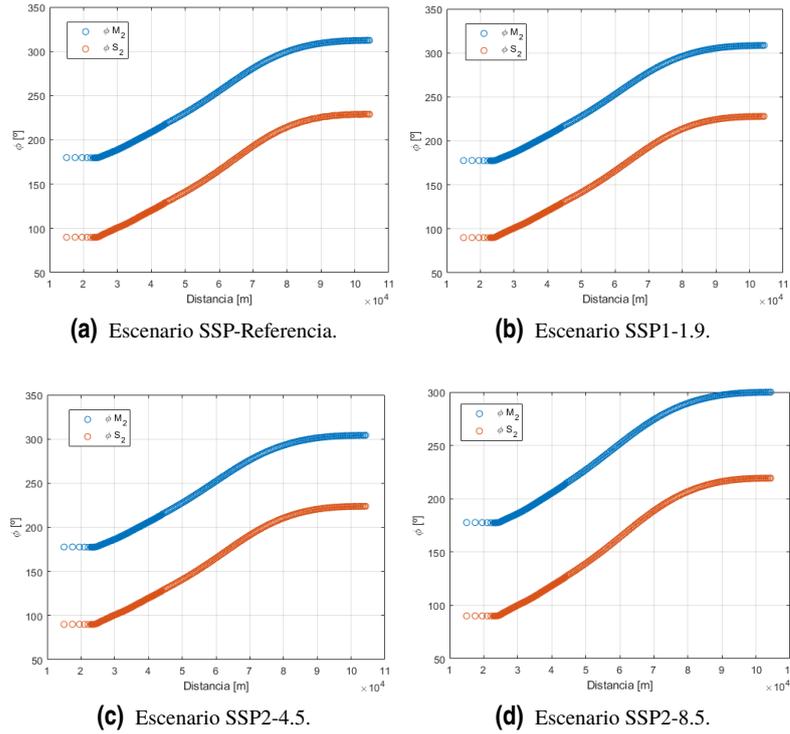


Figura 5.6 Fases de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios.

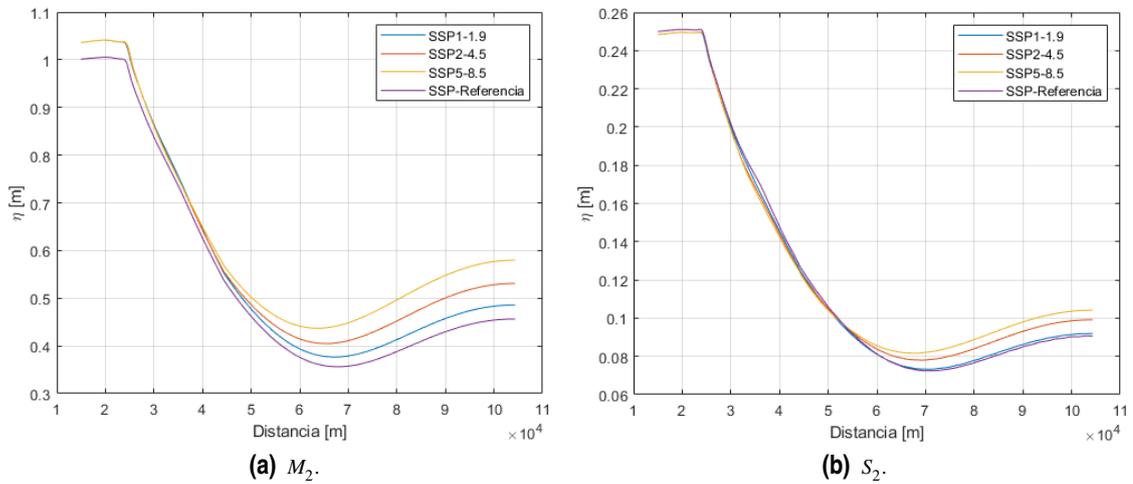


Figura 5.7 Comparación de las amplitudes de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios.

en evidencia que durante esta longitud la fricción domina frente a la convergencia, en la segunda mitad del estuario se genera un ligero aumento de la amplitud que pone en evidencia, por el contrario, que la convergencia domina frente a la fricción. Esto genera distintas condiciones de sincronía en el estuario. Si bien aguas abajo se dan condiciones de hiposincronismo, con una fuerte disminución de la amplitud, aguas arriba del estuario se dan unas condiciones de hipersincronismo, con un ligero aumento de la amplitud. Esta situación última podría verse incrementada por la presencia de la descarga fluvial en este tramo del estuario, que comienza a ganar importancia y favorece este aumento del nivel. Este hecho podría justificar igualmente el ligero incremento del nivel medio del mar que se obtiene aguas arriba del estuario (figura 5.3).

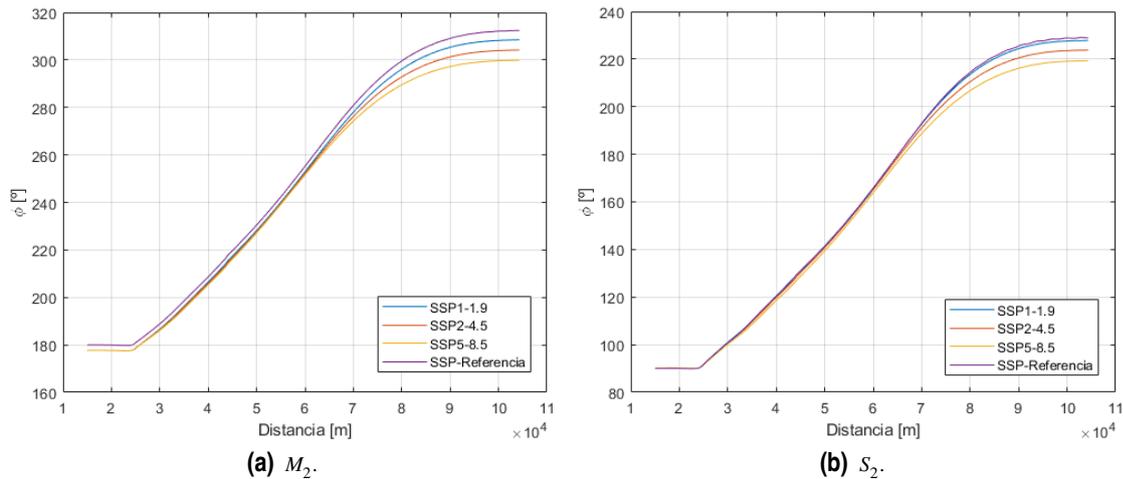


Figura 5.8 Comparación de las fases de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios.

Por otro lado, se comprueba cómo todos los escenarios siguen el mismo comportamiento hiposíncrono-hipersíncrono. No obstante, la figura 5.7 refleja cómo aún siguiendo el mismo comportamiento la amplitud va aumentando conforme se pasa de escenario. Se concluye que el aumento del nivel medio del mar provoca un aumento de la amplitud de las dos componentes de los armónicos de la superficie libre.

En relación a la fase, se observa efectivamente un aumento a lo largo del estuario que se estabiliza en el tramo final del estuario, con la estabilización de la amplitud del armónico de elevaciones. Para cada escenario, la fase irá disminuyendo, tal y como se aprecia en la figura 5.8.

Analizando ahora los armónicos de las corrientes longitudinales, se observa en la figura 5.9 la tendencia decreciente que sufren las amplitudes de los armónicos hasta hacerse cero, más pronunciada en el armónico M_2 que en el S_2 por la misma razón que con el análisis de elevaciones. Esta disminución de la amplitud de los armónicos de la corriente longitudinal hasta desaparecer está provocada por la atenuación de la onda de marea junto con la influencia de la descarga fluvial. Al final del estuario la influencia fluvial es mucho mayor, comenzando a convertirse el estuario en río, por lo que las corrientes comienzan a ser negativas y unidireccionales. Fijándose ahora en la figura 5.11 se observa que la amplitud aumenta a medida que lo hacen los escenarios, tal y como se predijo en el apartado anterior.

Las fases experimentan igual que en la elevación, una tendencia creciente, menor a medida que se avanza en los escenarios.

5.1.4 Diferencia de fases y asimetría

Una variable importante a la hora de analizar la hidrodinámica de los estuarios, es el desfase que se produce entre el nivel del mar y la velocidad, definiendo este desfase el tipo de onda que producirá en el estuario.

Una onda estacionaria se produce cuando todos los puntos del estuario alcanzan el nivel máximo en el mismo instante de tiempo, coincidiendo los momentos de pleamar y bajamar con las estoas de llenante y vaciante, es decir, el desfase entre el nivel del mar y la velocidad es $\pi/2$. Esta onda no se produce en estuarios aluviales, solo se da en un cuerpo semi-cerrado donde la onda de marea se refleje.

Por otro lado, una onda progresiva implica que los momentos de pleamar y bajamar se producen al mismo tiempo que las máximas y mínimas velocidades, respectivamente; es decir, que el desfase entre el nivel del mar y la velocidad es cero. Esta onda solo se puede producir en canales con sección transversal constante, longitud infinita y sin fricción.

El estuario aluvial no pertenece a ninguna de las dos categorías, desarrollándose en él una onda mixta entre ambas, cuyo desfase estará comprendido entre 0 y $\pi/2$. En efecto, si se representa el desfase entre estas dos variables (para el armónico de mayor importancia M_2) a lo largo del estuario se produce lo que se observa en la figura 5.13. Al principio se produce un desfase pequeño, inferior a 30° , asemejándose a una onda progresiva en los primeros 30 km de estuario, mientras que a medida que se avanza en el estuario el desfase va aumentando, hasta acercarse a 90° en los últimos 30 km del estuario, asemejándose en este tramo la onda a una estacionaria.

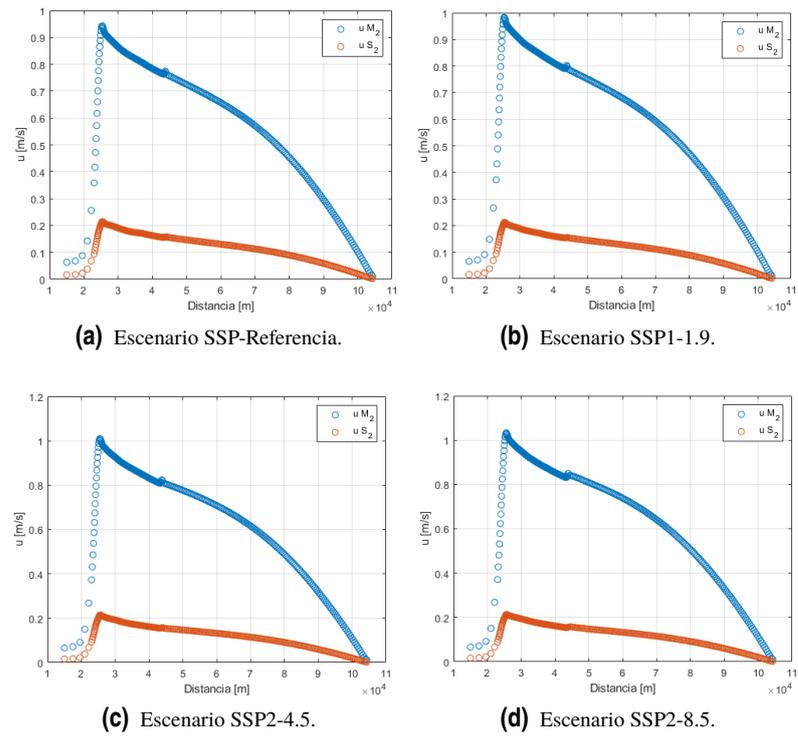


Figura 5.9 Amplitud de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios.

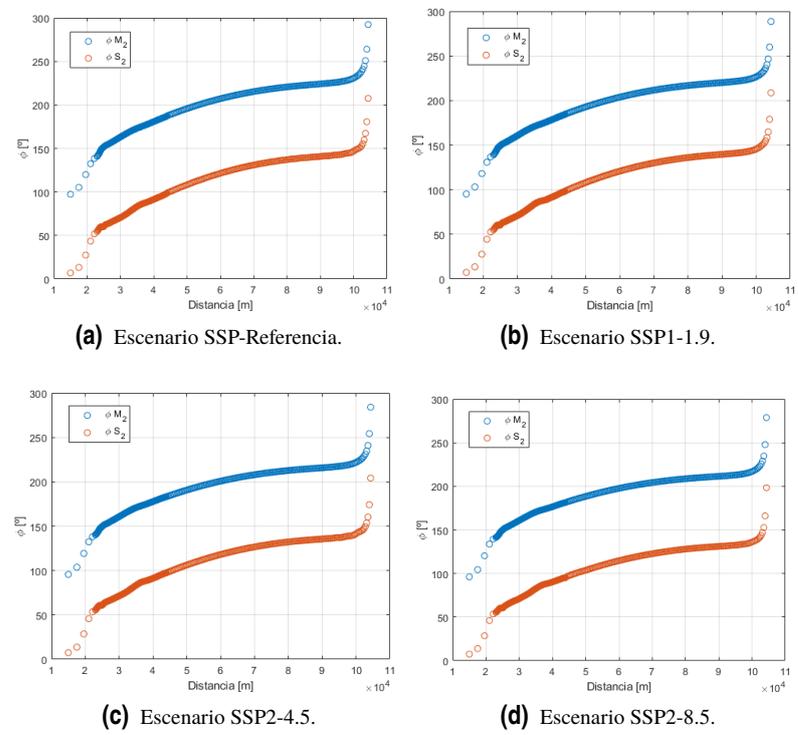


Figura 5.10 Fases de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios.

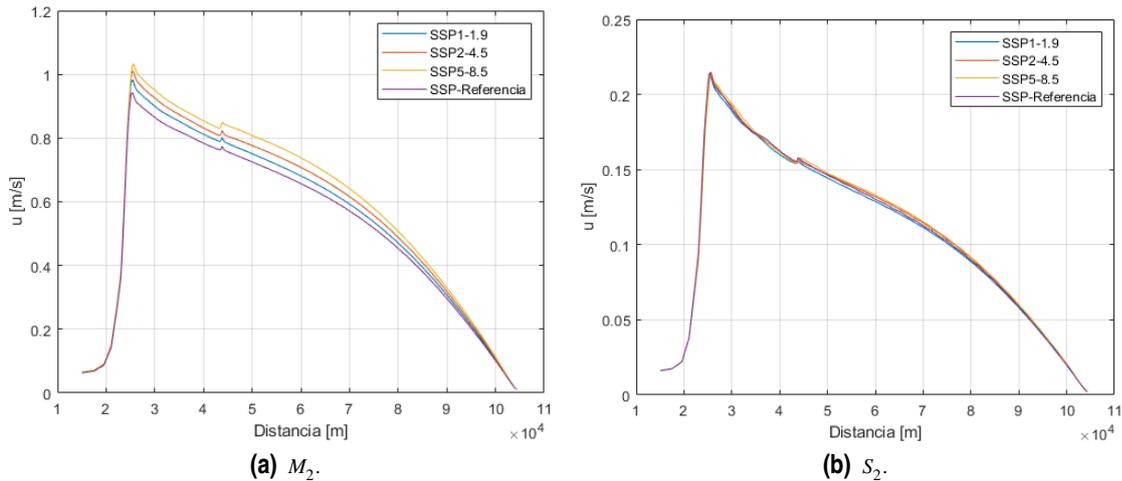


Figura 5.11 Comparación de las amplitudes de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios.

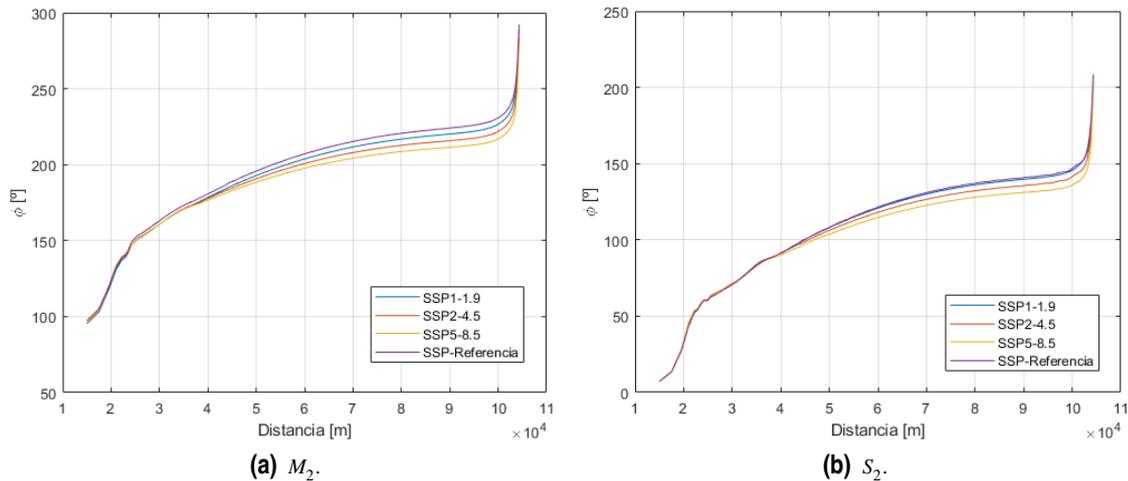


Figura 5.12 Comparación de las fases de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios.

Obsérvese cómo apenas hay diferencia entre los desfases para los distintos escenarios, siguiendo todos el mismo comportamiento.

Otra variable importante de analizar es la asimetría de marea, una distorsión en la marea que da lugar a llenantes y vaciantes de distinta duración a medida que se avanza en el estuario como consecuencia de los efectos no lineales que comienzan a tener mayor influencia debido a la menor profundidad. Esta variable se calcula con el ratio entre la amplitud del armónico M_2 frente a la amplitud del armónico M_4 , siendo este último el que determina la influencia de la fricción en la onda. De manera que si el valor de la asimetría es mayor, mayor será la distorsión a la que está sometida y predominará la vaciante o la llenante, según el caso. Será la diferencia de fase entre estas dos componentes la que determinará si es la llenante o la vaciante la que domina, estando la primera comprendida en el rango 90° - 270° , mientras que la segunda se encuentra comprendida en el rango 0° a 90° .

Como se observa en la figura 5.14, se da por un lado, una asimetría creciente, resultado del mayor efecto de la fricción a medida que se avanza en el estuario, con una leve disminución en el centro del estuario, aproximadamente en la misma longitud en la que se producía el cambio de tendencia en la amplitud del armónico M_2 de la elevación. En este punto a convergencia comienza a ser dominante frente a la fricción, reduciendo el dominio de esta variable, y por lo tanto la disminución de la asimetría. En relación a los escenarios, se destaca que el estuario es menos asimétrico a medida que aumenta el nivel del mar, lo que

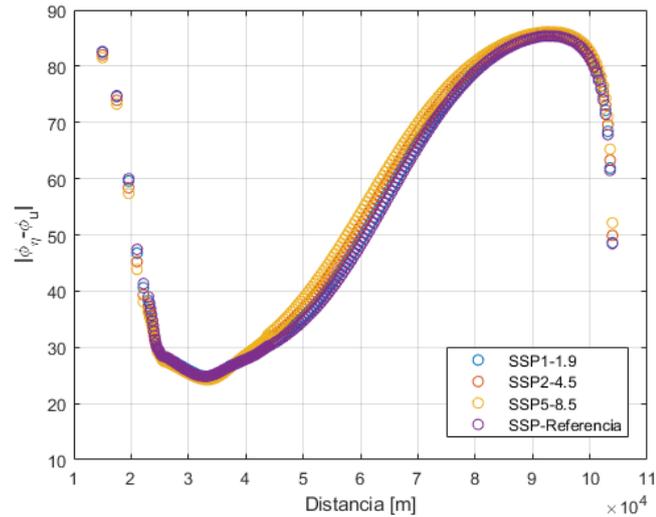


Figura 5.13 Comparación del desfase entre el nivel del mar y la velocidad a lo largo del estuario para los distintos escenarios.

cobra sentido sabiendo que la asimetría es producida principalmente por los efectos no lineales derivados de la fricción, y mientras mayor sea la profundidad como consecuencia del aumento del nivel medio, menor será dicha asimetría.

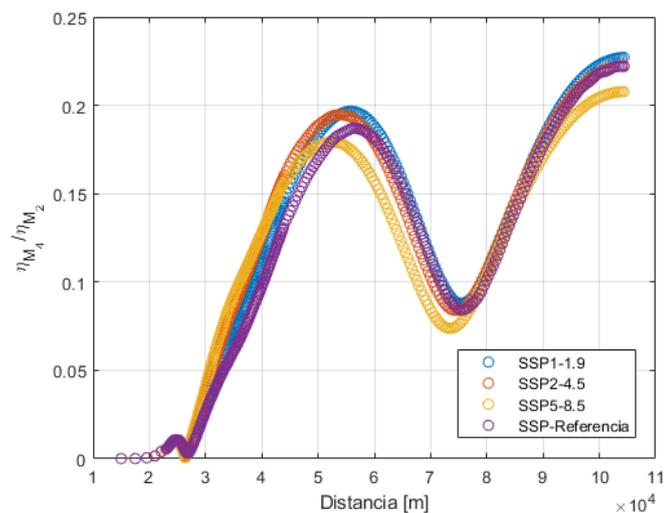


Figura 5.14 Comparación de la asimetría a lo largo del estuario para los distintos escenarios.

5.2 Salinidad

Uno de los principales objetivos del trabajo era estudiar la repercusión que un aumento de la subida del nivel del mar supondría en la distribución de salinidad del estuario. En este sentido, se analizan en este apartado distintas variables relacionadas con la salinidad: la intrusión salina, la distribución de salinidad, la estratificación y el método de mezcla que se produce.

5.2.1 Intrusión salina

La intrusión salina, tal y como se explicó en el apartado 3 define la longitud para la que la concentración de sal en la capa más profunda o lecho es inferior a 1 psu. A partir de este punto la concentración de sal en el agua es prácticamente despreciable, pasando a conformarse la zona fluvial o río, y estando principalmente dominada por la descarga fluvial.

La intrusión será máxima en estuarios bien mezclados donde la influencia de la descarga fluvial no sea relevante, mientras que un estuario estratificado resultado de una fuerte descarga fluvial provoca una cuña salina más cerca de la boca del estuario. Visto que en este trabajo la descarga fluvial se mantiene constante para todas las simulaciones, y correspondiente a un régimen medio (no es dominante), se espera que la intrusión salina alcance valores bien avanzados en el estuario resultado de una distribución parcialmente o bien mezclada de la salinidad (como también se verá en los próximos apartados), siendo cada vez mayor a medida que se avanza en los escenarios, pues como resultado del aumento del nivel del mar el prisma de marea que se adentra en el estuario es mayor.

En este sentido, se ha representado en la figura 5.15 la evolución espacial del valor de la intrusión salina para cada uno de los escenarios, junto con otra que representa la tendencia media que sigue la variable a medida que aumenta el nivel del mar, calculada mediante una regresión lineal de los datos.

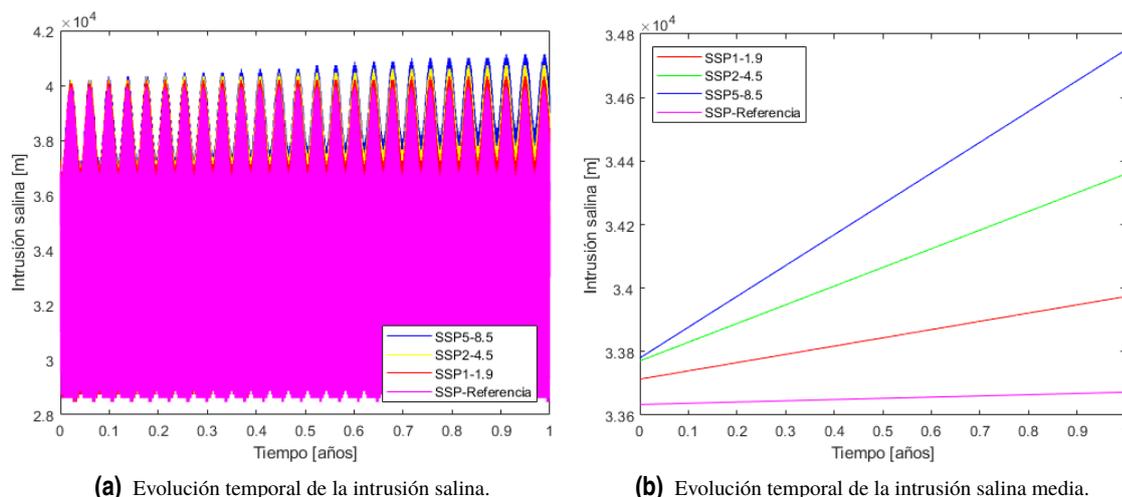


Figura 5.15 Evolución temporal de la intrusión salina para los distintos escenarios.

Como se esperaba, a medida que el nivel del mar aumenta en el estuario, la influencia de la marea agranda su alcance, aumentando el prisma de marea, resultando en un aumento de la intrusión salina. Como se observa, la intrusión está completamente dominada por los ciclos de marea, siguiendo el mismo patrón oscilatorio con periodos semidiurnos que experimenta la marea. Aunque en este punto del estuario la influencia de la descarga comienza a ser influyente, su estacionariedad no induce a variaciones en la intrusión, dejando que su variación dependa principalmente de la marea.

Para comprobar de manera más clara esta afirmación, se representa la evolución temporal de la intrusión salina para cada uno de los escenarios, en el periodo estacionario al final de cada simulación para el que no se incluye aumento del nivel medio del mar en la condición de contorno. Esta representación queda plasmada en la figura 5.16, donde se distingue con claridad que la amplitud de la intrusión ha aumentado conforme aumentó el nivel del mar, y que el agente que domina su variación es principalmente la marea, distinguiéndose claramente los ciclos semidiurnos siguiendo las pleamareas y bajamareas, y los periodos quincenales siguiendo las mareas vivas y las mareas muertas.

Para hacerse una idea de los órdenes de magnitud que se obtienen se han tabulado los valores máximos y mínimos de la intrusión junto con la diferencia de estos valores para cada uno de los escenarios, y la diferencia de los valores máximos con respecto al nivel de referencia.

Tabla 5.3 Valores representativos de la evolución temporal de la intrusión salina.

	SSP1-1.9	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP-REFERENCIA
Lmax (m)	40332	40733	41133	39932
Lmin (m)	28600	28867	29133	28467
Desplazamiento (m)	11732	11866	12000	11465
Diferencia con SSP-Referencia (m)	400	801	1201	-

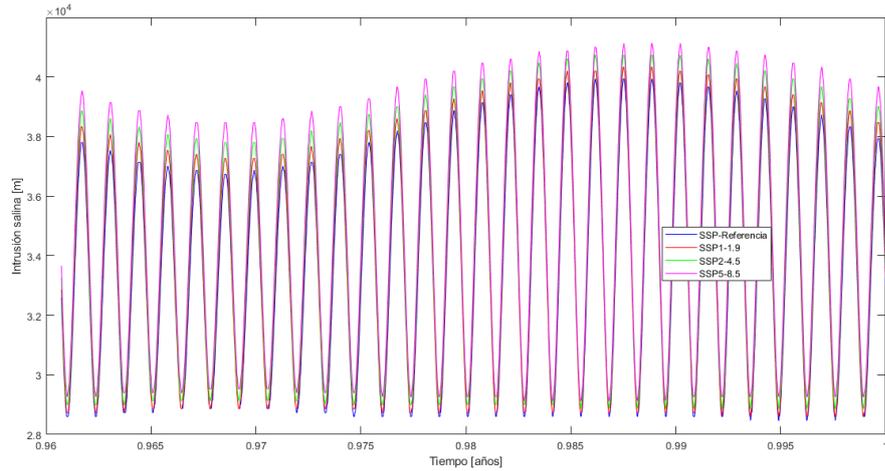


Figura 5.16 Evolución temporal de la intrusión salina para los distintos escenarios en el periodo estacionario.

Obsérvese en la tabla 5.3 cómo el alcance de la intrusión va aumentando conforme al aumento de la subida del nivel del mar, tal y como se predijo sobre estas líneas. Es interesante ver cómo este desplazamiento neto no supone una mera traslación a lo largo del estuario, sino que supone un crecimiento del rango de la intrusión, con una relación de 100 a 200 m más en cada escenario aproximadamente.

Finalmente, es destacable cómo en el peor de los escenarios de crecida del nivel medio del mar la intrusión salina máxima avanza más de 1 km más que en el escenario de referencia.

Dado que la evolución de la intrusión es consecuencia de las corrientes que en el estuario se forman, es interesante analizar las corrientes residuales, resultado de promediar en un ciclo de marea las velocidades longitudinales en cada celda. Así, representándolas sobre los tramos 1 y 2, se obtienen las gráficas de las figuras 5.17 y 5.18.

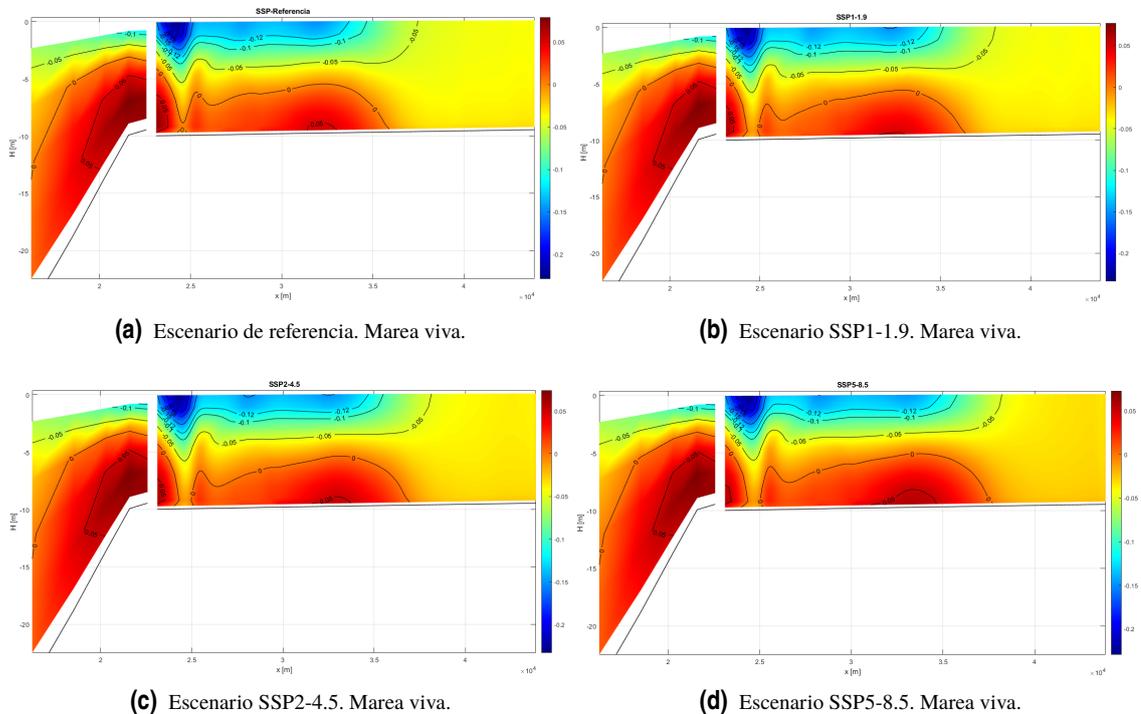


Figura 5.17 Corrientes residuales a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea viva.

Obsérvese cómo en la figura 5.18, durante el desarrollo de un ciclo en marea muerta, el promedio de la velocidad en prácticamente toda la zona central del estuario es negativa, es decir, saliente, dirigida aguas abajo

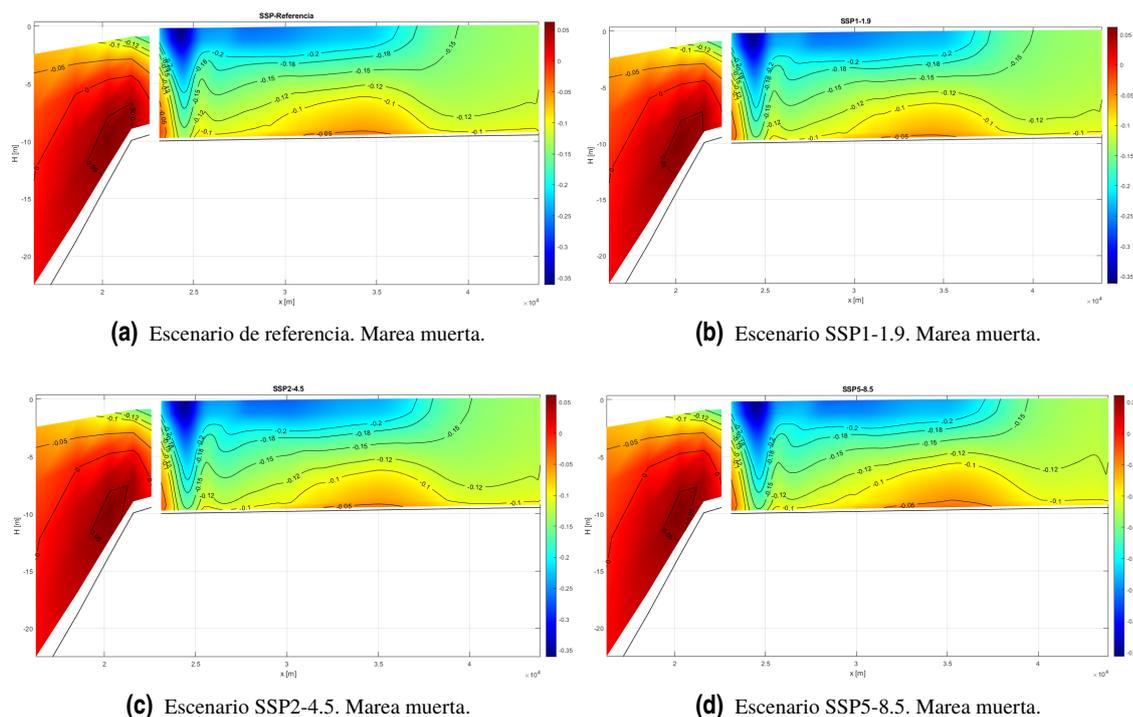


Figura 5.18 Corrientes residuales a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea muerta.

del estuario. En términos hidráulicos, una marea muerta, de menor amplitud, podría equivaler a un aumento de la descarga fluvial, que supondría un mayor aporte a la velocidad negativa en todo momento, dando lugar a un promedio negativo. De ahí que en la figura mencionada las corrientes residuales sean negativas en la totalidad de tramo central del estuario.

Sin embargo, si se observa la figura 5.17, durante el desarrollo de un ciclo de marea en marea viva, se observa cómo el flujo se divide, dando lugar a corrientes en dos sentidos, una negativa en la zona superior del estuario y una positiva en la zona más profunda. Durante el desarrollo de las mareas vivas, donde la amplitud de la onda de marea es superior, el prisma de marea es superior, la cantidad de agua salina que se adentra en el estuario es mayor que durante el desarrollo de la marea muerta, y en consecuencia, la diferencia de densidades que existe entre la zona más costera y la zona más fluvial es mayor, y el desequilibrio hidrostático será, en consecuencia, mayor, dando lugar a estas corrientes positivas de agua salina por la zona del lecho, y corrientes negativas en la zona más superficial. Esto provoca que, promediando, el flujo quede dividido en ambos sentidos. Estas corrientes provocan la asimetría en los ciclos de la intrusión que se observa en la figura 5.16: si bien la influencia de los ciclos quincenales de mareas vivas y muertas en la intrusión salina se distingue para los ciclos de pleamares, durante las bajamares los periodos quincenales no se aprecian con el mismo detalle, provocando una uniformidad de los límites inferiores de la intrusión salina o asimetría. Dado que la intrusión salina se calcula a partir de la salinidad en la capa más profunda, esta desigualdad es resultado de estas corrientes residuales en sentido positivo que se dan durante las mareas vivas, que producen un transporte neto de salinidad aguas arriba por la zona del lecho.

En relación a los escenarios, cabe destacar que no se observa ningún cambio significativo en la formación de corrientes. Para todos ellos y durante la formación tanto de mareas vivas como de muertas, ni los valores de las corrientes ni el patrón de formación difieren a medida que se aumenta el nivel del mar.

5.2.2 Distribución de salinidad

Como bien se ha indicado sobre estas líneas, la descarga fluvial es poco dominante en las simulaciones lanzadas, lo que se debe traducir en una distribución parcialmente o bien mezclada de la salinidad a lo largo del estuario.

Se ha representado en las figuras 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 la distribución de salinidad a lo largo del eje longitudinal para todos los escenarios. Se distinguen el tramo 1 y el tramo 2 en las figuras, siendo los más representativos de esta distribución. Ha sido analizada para dos momentos representativos, el momento de

máxima intrusión y el momento de mínima intrusión, junto con el perfil de salinidad promediado en un ciclo de marea, para un ciclo en marea viva y otro en marea muerta.

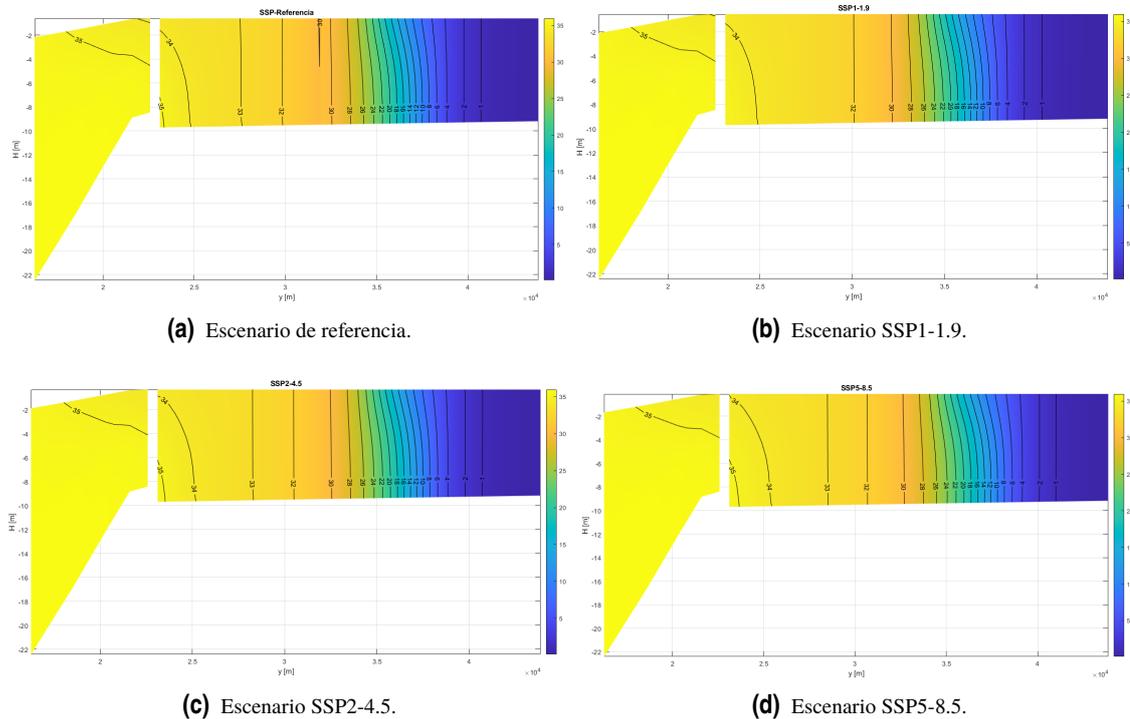


Figura 5.19 Distribución de salinidad durante la máxima intrusión a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios..

Comparando las figuras 5.19 y 5.20, se comprueba cómo, durante los escenarios de máxima intrusión, producidos durante el desarrollo de una pleamar en una marea viva, la influencia de la marea es tan dominante que el estuario está prácticamente bien mezclado. No obstante, se observan ligeros gradientes verticales de salinidad en la zona cercana a la intrusión que coincide con el mayor gradiente longitudinal de salinidad que se da en el estuario.

Comparándolo con los escenarios en el desarrollo de la mínima intrusión (figura 5.20) existe una gran diferencia, no solo en el alcance de la intrusión salina sino en la distribución de salinidad. En este caso, la transición de agua dulce a agua salada se realiza en un intervalo espacial mucho más pequeño, produciéndose un gradiente longitudinal de salinidad muy fuerte cerca de la desembocadura, junto con un aumento de la estratificación en la boca del estuario. Aparentemente, durante el desarrollo de la mínima intrusión, la influencia de la descarga fluvial adquiere valor dando lugar a un estuario más estratificado.

Cabe destacar, por un lado, cómo la intrusión salina alcanza valores cada vez más elevados a medida que se avanza en los escenarios, siendo este incremento superior durante el desarrollo de la máxima intrusión que en el de la mínima intrusión, de acuerdo con lo que se explicó en el apartado anterior 5.2.1 y que se comprueba en la tabla 5.3. Sin embargo, no se observa cambio aparente en el desarrollo de la salinidad con respecto a los escenarios, simplemente alguna ligera disminución del gradiente longitudinal de salinidad a medida que avanzan los escenarios.

Por otro lado, obsérvese cómo la distribución de salinidad media promediada en un ciclo de marea confirma la teoría. En estuarios con una descarga fluvial pequeña en comparación a la influencia de la marea, la distribución de salinidad es parcialmente o bien mezclada. Se da, en promedio, una distribución bien mezclada, con gradientes verticales pequeños, creciendo a medida que se acercan a la boca del estuario. Estos gradientes verticales son ligeramente más pronunciados durante el desarrollo de un ciclo en marea viva, resultado de las corrientes residuales que se vieron en el apartado anterior (5.2.1).

Para completar el estudio de la distribución de salinidad convendría analizar la distribución de salinidad transversal. En la figura 5.23 se ha representado una sección transversal en el kilómetro 36,5 aproximadamente, durante el momento de máxima intrusión.

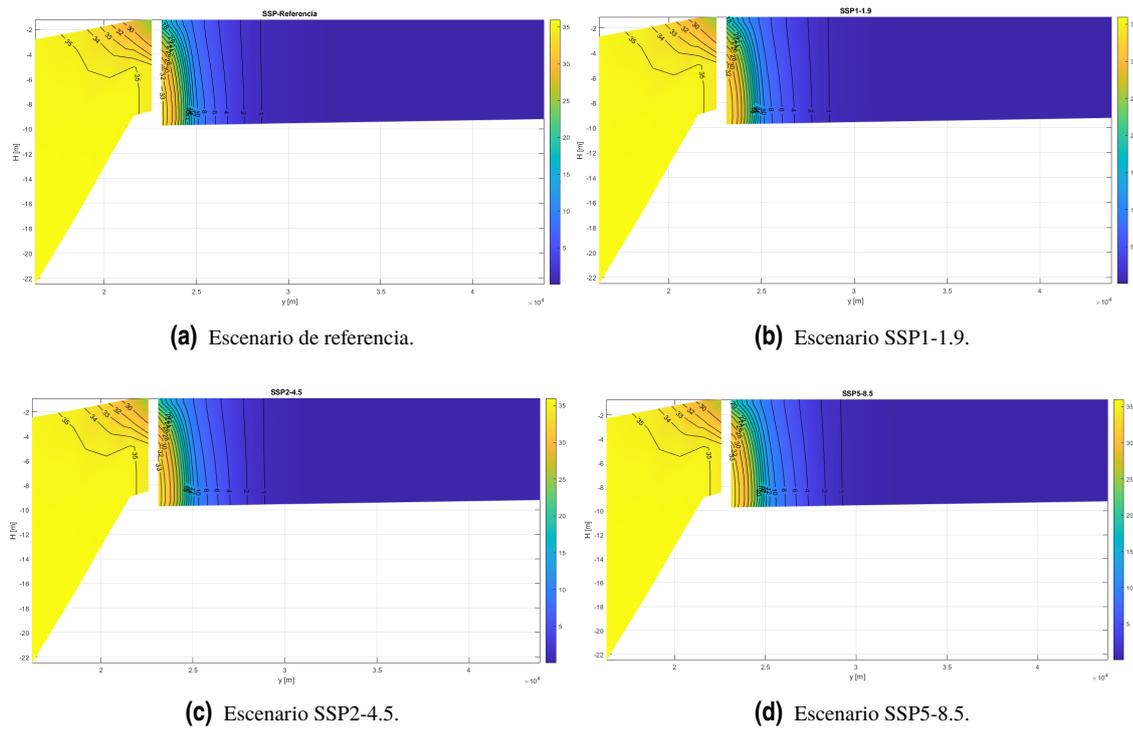


Figura 5.20 Distribución de salinidad durante la mínima intrusión a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios..

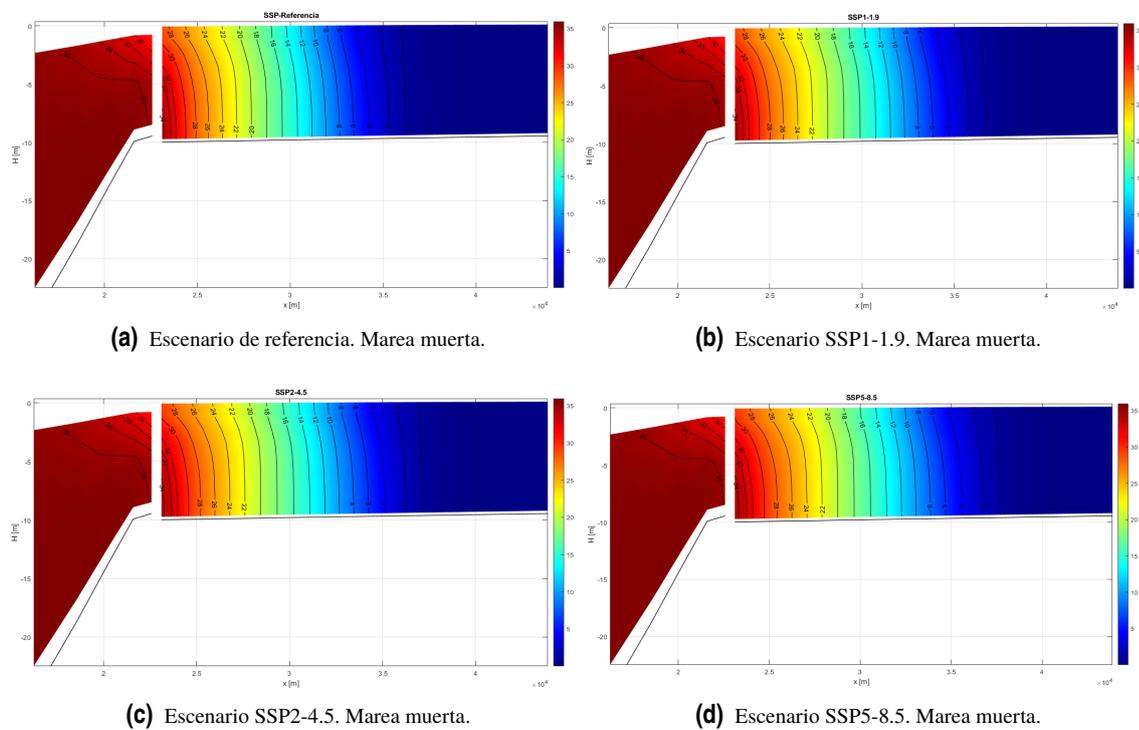


Figura 5.21 Distribución de salinidad a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea viva.

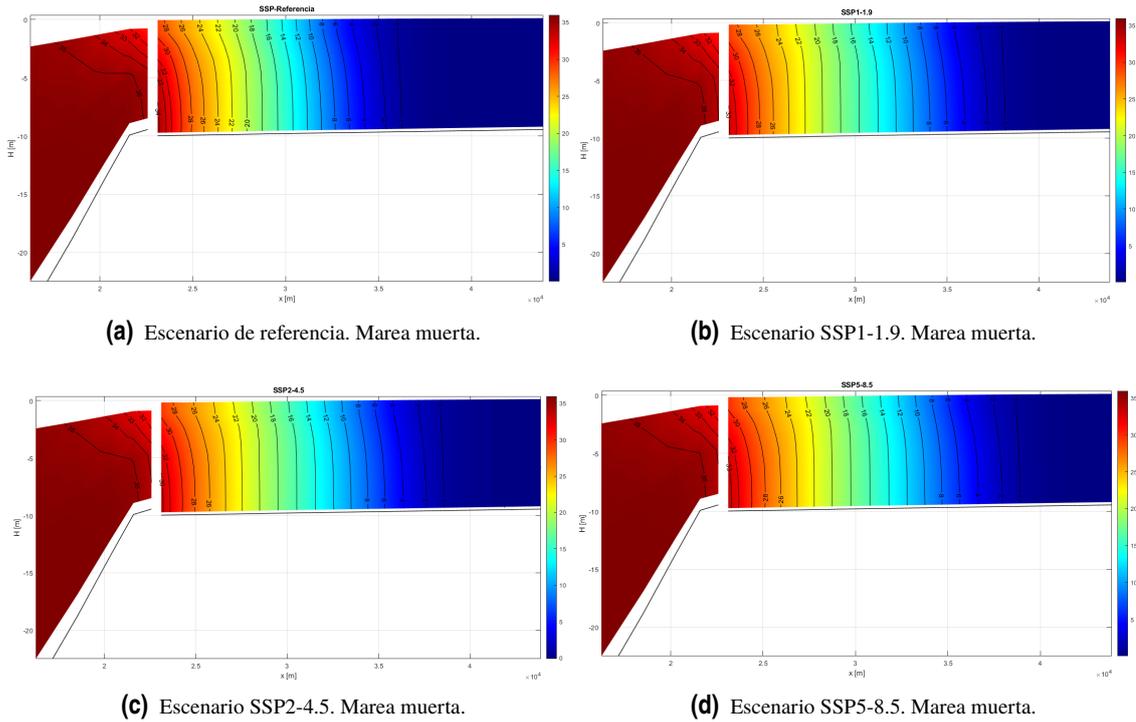


Figura 5.22 Distribución de salinidad a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea muerta.

En efecto, se produce un gradiente vertical de salinidad, donde el agua más salada circula por el lecho y el agua menos salada por la superficie. Además, se observa como dicho gradiente es superior a medida que se avanza en los escenarios, confirmando ese desplazamiento de la intrusión a medida que aumenta el nivel medio del mar y que por tanto, traslada esa zona de transición de mayores gradientes aguas arriba.

Conviene destacar que las isolíneas no son horizontales en la sección, sino que van aumentando hacia los extremos, dando lugar a un gradiente de salinidad en una tercera dimensión, transversalmente. Esto podrá influir en el mecanismo de mezcla de aguas.

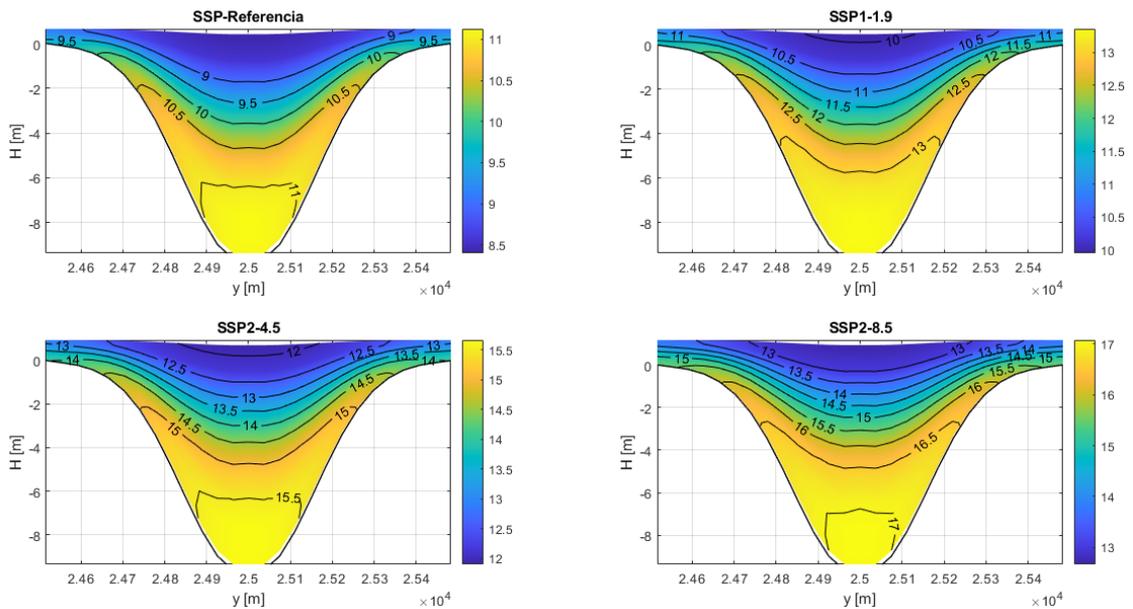


Figura 5.23 Distribución de salinidad en una sección transversal ($x=36,5$ km) para los distintos escenarios. Máxima intrusión.

5.2.3 Estratificación y mecanismos de mezcla

Como se mencionó, un estuario parcialmente o bien mezclado supondría un valor del número de Richardson pequeño, pues al ser la descarga fluvial pequeña en comparación a la marea, la relación de la energía potencial aportado por el río a través de la descarga fluvial frente a la energía cinética aportada por la marea es pequeña. Dicho valor será, sin embargo, mayor durante el desarrollo de las mareas muertas y las bajamares, donde la influencia de la descarga fluvial es superior. Igualmente, para hacerse una idea del nivel de estratificación se puede representar el parámetro de estratificación a lo largo del thalweg. Si esta relación es pequeña el estuario está bien o parcialmente mezclado, mientras que si es grande se produce la estratificación del flujo. En este caso se espera que el nivel de estratificación también sea reducido.

En efecto, las figuras 5.24 y 5.25 representan para cada uno de los escenarios el número de Richardson y el nivel de estratificación para el eje del estuario. El nivel de estratificación es cercano o inferior al 10% en prácticamente todo el eje y a lo largo de todo el tiempo, a excepción de algunos ciclos en torno al kilómetro 25 (boca del estuario). Estos gradientes verticales de mayor valor (alcanzan hasta un 80%) se dan por lo tanto cerca de la desembocadura, durante el desarrollo de las bajamares o mínima intrusión, donde se comprobó en las figuras 5.11 y 5.12 que efectivamente se daba una mayor inclinación de las isólineas. El resto del estuario, por el contrario, mantiene a lo largo del thalweg y del tiempo un gradiente de estratificación muy pequeño.

Obsérvese de la misma forma cómo, a medida que se avanza en los escenarios el nivel de estratificación disminuye ligeramente, en tanto que para el escenario más desfavorable la barra de color disminuye su valor máximo en un 10%. Un aumento del nivel medio del mar supondría, tal y como se ha comentado, una menor influencia de la descarga fluvial, favoreciendo la formación de un estuario cada vez mejor mezclado.

En relación al número de Richardson se obtiene una conclusión similar. Si bien prácticamente en su totalidad el valor se acerca a cero (una influencia de la descarga muy pequeña en comparación a la de la marea), en algunos puntos a lo largo del tiempo estos valores aumentan, definiendo momentos de mareas muertas o bajamares donde la influencia mareal disminuye y la descarga fluvial cobra importancia. Estos puntos destacan en torno al kilómetro 3, próximo al límite de la máxima intrusión, donde por tanto, la descarga fluvial se hace importante, y en la boca del estuario, durante el desarrollo de las bajamares, donde la marea pierde influencia. En este caso también se observa una ligera disminución, en términos generales, del valor del número de Richardson a medida que se avanza en los escenarios, concordante con lo que se observa del nivel de estratificación.

Se puede concluir lo que se predijo: una pequeña influencia de la descarga fluvial como la que se tiene en las simulaciones favorecería una distribución de salinidad a lo largo del estuario parcialmente o bien mezclada, salvo en algunos momentos puntuales donde el nivel de estratificación aumenta.

En relación al mecanismo de mezcla que se desarrolla en el estuario, teóricamente es conveniente distinguir entre los periodos de marea viva y marea muerta, pues durante los periodos de marea muerta, donde el prisma de marea es inferior los estuarios tienden a estar más estratificados que durante los periodos de marea viva. Sin embargo, como se observó y comentó en las imágenes 5.17 y 5.18, durante la marea viva se desarrollan unas corrientes residuales en sentido positivo a través del lecho y negativo a través de superficie, provocando un mecanismo de mezcla por circulación gravitacional, lo que implica que la teoría es difícilmente generalizable.

Durante los periodos semidiurnos, el mecanismo de mezcla dependerá del punto del ciclo que se analice. Así, para momentos de pleamares, donde la distribución de salinidad se desarrolla de manera progresiva a lo largo del estuario y homogéneamente en la vertical, con números de Richardson pequeños, se da un mecanismo de mezcla turbulenta, mientras que durante las bajamares, donde se observa una estratificación del perfil de salinidad, y donde el número de Richardson es mayor, se producirá una mezcla por circulación gravitacional.

La subida del nivel medio del mar no afecta aparentemente al mecanismo de mezcla, pues afecta ligeramente al patrón de distribución de la salinidad.

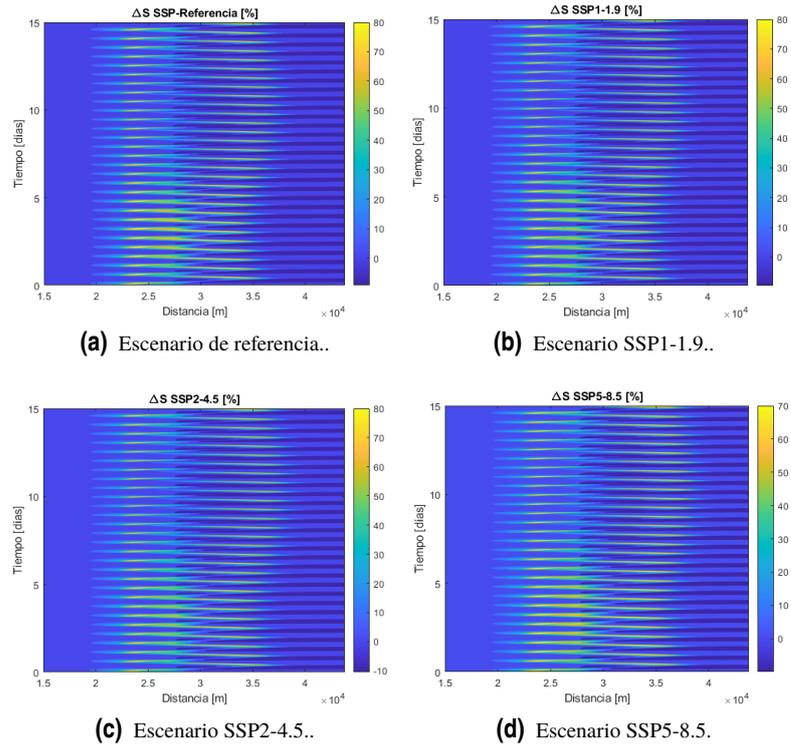


Figura 5.24 Evolución espacio-temporal del nivel de estratificación a lo largo del ejedel estuario para los distintos escenarios.

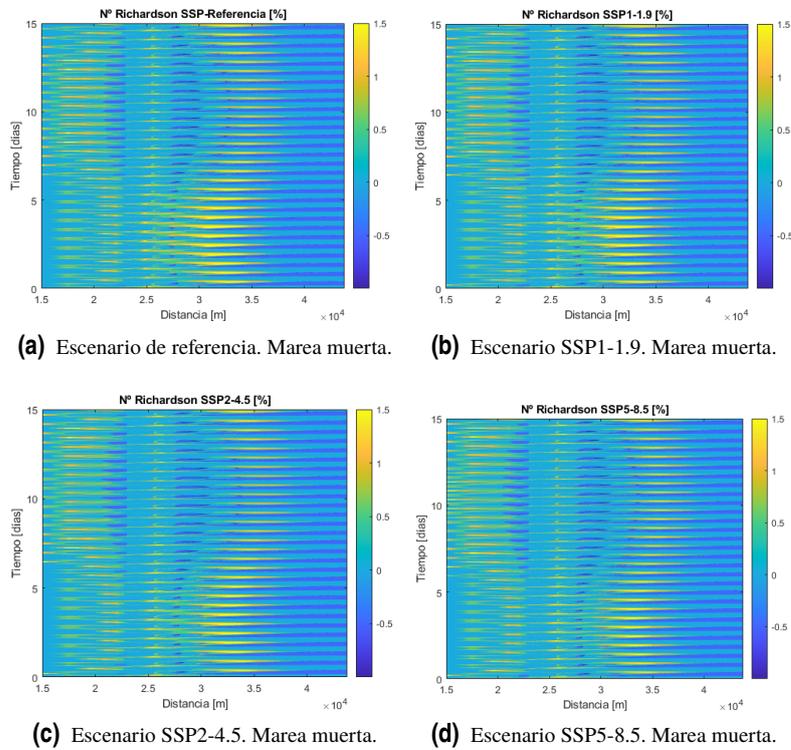


Figura 5.25 Evolución espacio-temporal del número de Richardson a lo largo del ejedel estuario para los distintos escenarios.

6 Conclusiones

Al inicio de este trabajo se expuso la necesidad de perseverar en el estudio y en el desarrollo de herramientas que permitan estudiar el comportamiento de los estuarios así como los efectos que en ellos producirían escenarios futuros que alteren su equilibrio. Con ese propósito, se ha ajustado en este proyecto un modelo numérico de estuario aluvial, guiado por las hipótesis básicas de estuario idealizado, capaz de simular unos escenarios futuros particulares, y de predecir los cambios que puedan generar en su hidrodinámica y en la distribución de la salinidad. Particularmente, se ha ajustado y se ha empleado para predecir el efecto de la subida del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático.

Para ello, se han llevado a cabo cuatro simulaciones con las mismas características, pero con diferente condición de contorno de marea. Una de ellas suponía el desarrollo normal de la marea astronómica en el límite costero, sin alteraciones de nivel en el periodo de simulación, mientras que las otras describían a lo largo del periodo de simulación un aumento progresivo del nivel medio del mar, con una pendiente diferente para cada uno. Las conclusiones principales que se han obtenido son las siguientes:

1. Aumento de la intrusión salina. La intrusión salina eleva su alcance a medida que aumenta el nivel medio del mar en el estuario, llegando a alcanzar valores superiores a 1 km en el escenario más desfavorable, con relación al escenario de referencia. Impulsado por el comportamiento propio de las mareas, oscila entre unos valores límites que definen un rango de variación espacial o excursión de marea cada vez mayor a medida que aumenta el nivel del mar, llegando a ser del orden de 12 km en el escenario más desfavorable.
2. Aumento del nivel medio del agua. El aumento del nivel medio del agua del estuario también resulta destacable, llegando a aumentar un máximo de 0,7 metros con respecto al escenario de referencia, medido en las proximidades de la intrusión salina. En comparación a la condición de contorno impuesta (un incremento máximo de 0,5 m) el nivel medio del agua en el estuario alcanza aguas arriba del estuario 0,2 m más que en la desembocadura, en el escenario más desfavorable.
3. Alteración de la hidrodinámica. Si bien las principales variables hidrodinámicas siguen el mismo patrón de comportamiento para todos los escenarios futuros, se distingue una diferencia de magnitud en sus variables, con un aumento en la amplitud de los armónicos de elevaciones y velocidades, y con una disminución de la asimetría de marea a medida que aumenta el nivel del agua.
4. Alteración de la salinidad. De la misma forma que con la hidrodinámica, la distribución de la salinidad en el estuario sigue el mismo patrón de comportamiento para todos los escenarios, con una ligera variación de la magnitud de las variables, desplazándose la zona de transición entre agua salada y agua dulce aguas arriba a medida que se incrementa el nivel medio del agua.
5. Eficacia del modelo. El modelo ajustado para ser capaz de predecir una subida del nivel medio del mar y de generar resultados derivados de dicha variación ha resultado ser eficaz, simulando la subida del nivel del mar que se le introduce como condición de contorno y generando resultados acordes al comportamiento propio esperado de los estuarios en tales situaciones.
6. Eficiencia del modelo. El horizonte temporal para el que se establecían las condiciones de contorno que se pretendía alcanzar se establecía en 50 años, dando lugar a simulaciones con un periodo de cálculo

fuera de la practicidad que se pretende conseguir con este modelo. Las técnicas de eficiencia que se han desarrollado en este trabajo permiten reducir 50 veces el periodo de tiempo de cálculo, reduciendo el coste computacional sin perder precisión de los resultados. Esta eficiencia es fundamental para una herramienta de gestión con la que evaluar un número elevado de combinaciones de condiciones de contorno y subidas del nivel medio del mar.

7. Impactos ambientales y sociales. Las conclusiones derivadas del modelo con relación al comportamiento del estuario ponen de manifiesto el impacto que generaría una subida del nivel medio del mar en los sistemas ambientales y sociales que se desarrollan en torno a él. Por ejemplo, las variaciones en la distribución de salinidad y el mayor alcance de la intrusión salina podría provocar la salinización de acuíferos y afectar a la agricultura que se desarrolle en torno a esta zona. Y un aumento del nivel medio del agua del estuario podría provocar la inundación de todas aquellas zonas alrededor del estuario que se encontrasen a una cota inferior a este nivel, o aumenta el límite de las zonas inundables por el estuario, entre otras cosas. Además de afecciones a los ecosistemas acuáticos y terrestres que de él dependan. No todas podrían ser negativas, un aumento del nivel medio podría mejorar la navegabilidad del estuario. En resumen, la alteración del equilibrio en el estuario generaría un impacto tanto ambiental como social en los sistemas que en torno a él se desarrollen.

Índice de Figuras

2.1	Observaciones y otros indicadores de un sistema climático global cambiante ([R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), 2014])	7
2.2	Representación gráfica de los escenarios SSPs y sus características [Chen et al., 2021]	8
2.3	El enfoque del AR6 del IPCC para caracterizar la comprensión y la incertidumbre en las conclusiones de la evaluación ([Chen et al., 2021])	9
2.4	Representación de las declaraciones de acuerdo y evidencia y su relación con la confianza ([Mastrandrea and Zwiers, 2010])	9
2.5	Representación de la subida del nivel del mar para los SSP según el IPCC en Bonanza, estuario del Guadalquivir ([IPCC, 2024b])	10
2.6	Contribuciones individuales de los factores forzadores de la subida del nivel medio del mar para el año 2060 ([IPCC, 2024b])	11
3.1	Geometría de los estuarios aluviales [Savenije, 2005]	14
4.1	Geometría y batimetría del estuario	22
4.2	Definición de los <i>DDBoundaries</i>	24
4.3	Ilustración gráfica de los dos sistemas de coordenadas verticales que emplea <i>Delft3D</i> ([Ezer and Mellor, 2004])	25
4.4	Definición de los contornos del dominio	27
4.5	Comparación de las principales variables hidrodinámicas de los dos modelos de aceleración con respecto al de referencia	29
4.6	Condición de contorno <i>Offshore</i> para los dos modelos del análisis de control	30
4.7	Comparativa de la salinidad media en los puntos de observación del análisis de control	30
4.8	Comparativa de la velocidad media en los puntos de observación del análisis de control	31
4.9	Comparativa del nivel medio del mar en los puntos de observación del análisis de control	31
4.10	Localización de los puntos de observación	33
4.11	Condición de contorno <i>Offshore</i> para cada los escenarios físicos	34
5.1	Variación espacio-temporal del nivel del mar en el eje del estuario para los distintos escenarios.	36
5.2	Evolución temporal del nivel del mar para los distintos escenarios en los puntos P_1 y P_2	36
5.3	Comparación de los niveles medios del mar para cada escenario, en los puntos P_1 y P_2	37
5.4	Evolución temporal de la velocidad longitudinal para los distintos escenarios en los puntos P_1 y P_2	38
5.5	Amplitud de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios	39
5.6	Fases de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios	40
5.7	Comparación de las amplitudes de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios	40
5.8	Comparación de las fases de los armónicos M_2 y S_2 de la superficie libre para los distintos escenarios	41
5.9	Amplitud de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios	42
5.10	Fases de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios	42
5.11	Comparación de las amplitudes de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios	43

5.12	Comparación de las fases de los armónicos M_2 y S_2 de la corriente longitudinal para los distintos escenarios	43
5.13	Comparación del desfase entre el nivel del mar y la velocidad a lo largo del estuario para los distintos escenarios	44
5.14	Comparación de la asimetría a lo largo del estuario para los distintos escenarios	44
5.15	Evolución temporal de la intrusión salina para los distintos escenarios	45
5.16	Evolución temporal de la intrusión salina para los distintos escenarios en el periodo estacionario	46
5.17	Corrientes residuales a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea viva	46
5.18	Corrientes residuales a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea muerta	47
5.19	Distribución de salinidad durante la máxima intrusión a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios.	48
5.20	Distribución de salinidad durante la mínima intrusión a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios.	49
5.21	Distribución de salinidad a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea viva	49
5.22	Distribución de salinidad a lo largo del Thalweg para los distintos escenarios. Marea muerta	50
5.23	Distribución de salinidad en una sección transversal ($x=36,5$ km) para los distintos escenarios. Máxima intrusión	50
5.24	Evolución espacio-temporal del nivel de estratificación a lo largo del eje del estuario para los distintos escenarios	52
5.25	Evolución espacio-temporal del número de Richardson a lo largo del eje del estuario para los distintos escenarios	52

Índice de Tablas

2.1	Proyecciones de la subida del nivel del mar en la boya de Bonanza, del IPCC ([IPCC, 2024b])	12
4.1	Escenarios de estudio	20
4.2	Diferencias relativas de las variables hidrodinámicas en el análisis de control [%]	32
5.1	Comparación del aumento del nivel medio del mar para los puntos P_1 y P_2	38
5.2	Rango de velocidad para los distintos escenarios en los puntos P_1 y P_2	39
5.3	Valores representativos de la evolución temporal de la intrusión salina	45

Bibliografía

- [Chen et al., 2021] Chen, D., Rojas, M., Samset, B., Cobb, K., Diongue Niang, A., Edwards, P., Emori, S., Faria, S., Hawkins, E., Hope, P., Huybrechts, P., Meinshausen, M., Mustafa, S., Plattner, G.-K., and Tréguier, A.-M. (2021). *Framing, Context, and Methods*, page 147–286. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [Climate.gov,] Climate.gov. Past climate.
- [Davies, 1964] Davies, J. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8(5):127–142.
- [Deltares,] Deltares. About delft3d.
- [Deltares, 2024a] Deltares (2024a). *D-Water Quality. Versatile water quality modelling. User Manual*. Deltares, 2600 MH Delft, The Netherlands.
- [Deltares, 2024b] Deltares (2024b). *Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual*. Deltares, 2600 MH Delft, The Netherlands.
- [Deltares, 2024c] Deltares (2024c). *Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual*. Deltares, 2600 MH Delft, The Netherlands.
- [Ezer and Mellor, 2004] Ezer, T. and Mellor, G. (2004). A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids. *Ocean Modelling*, 6:379–403.
- [Fox-Kemper and Yu, 2021] Fox-Kemper, B., H. H. C. X. G. A. S. D. T. E. N. G. M. H. R. K. G. K.-A. M. D. N. S. N. I. N. L. R. J.-B. S. A. S. and Yu, Y. (2021). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*, page 1211–1362. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [IPCC, 2024] IPCC (2024). Ipcc en español.
- [IPCC, 2024a] IPCC (2024a). Sea level projection tool.
- [IPCC, 2024b] IPCC (2024b). Sea level projection tool-bonanza.
- [IPCC, 2024c] IPCC (2024c). Working group i the physical science basis.
- [IPCC, 2024d] IPCC (2024d). Working group ii impacts, adaptation and vulnerability.
- [IPCC, 2024e] IPCC (2024e). Working group iii mitigation of climate change.
- [Llanes, 2022] Llanes, G. M. (2022). *Desarrollo de una nueva herramienta para la gestión de estuarios: modelado numérico idealizado*. PhD thesis, Universidad de Sevilla.
- [Martín-Llanes and López-Ruiz, 2024] Martín-Llanes, G. and López-Ruiz, A. (2024). The role of estuarine convergence on the salinity distribution and the estuary response to short river discharge pulses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 306:108893.

- [Mastrandrea and Zwiers, 2010] Mastrandrea, M.D., C. F. T. S. O. E. K. E. D. F. H. H. E. K. K. M. P. M. G.-K. P. G. Y. and Zwiers, F. (2010). *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- [Organización de las Naciones Unidas,] Organización de las Naciones Unidas. ¿qué es el cambio climático?
- [R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), 2014] R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), e. p. d. r. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC, Geneva, Switzerland, 1 edition.
- [Sarah Connors (WGI TSU) and Co-Chair), 2021] Sarah Connors (WGI TSU), Sophie Berger (WGI TSU), C. P. W. T. G. B. a. d. C. . N. C. W. T. D. C. a. d. C. . T. E. a. d. C. . S. F. a. d. C. . T. Y. G. a. d. C. . M. G. T. E. H. a. d. C. . R. J. a. d. A. R. K. a. d. C. . K. L. W. T. E. L. W. T. D. M. a. d. C. . V. M.-D. W. C.-C. T. M. W. T. A. P. W. T. R. R. a. d. C. . J. R. a. d. C. . A. C. R. a. d. C. . S. S. a. d. C. . and Co-Chair), P. Z. W. (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*.
- [Savenije, 2005] Savenije, H. H. (2005). *Salinity and tides in alluvial es*. Elsevier BV, Radarweg 29, PO Box 211 1000 AE Amsterdam, The Netherlands.