

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis del efecto de la descarga fluvial en la
distribución de salinidad de estuarios

Autor: Guillermo Martín Llanes

Tutor: Alejandro López Ruiz

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Análisis del efecto de la descarga fluvial en la distribución de salinidad de estuarios

Autor:

Guillermo Martín Llanes

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Grado: Análisis del efecto de la descarga fluvial en la distribución de salinidad de estuarios

Autor: Guillermo Martín Llanes

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer todo el apoyo recibido por parte de mi familia y mis amigos durante estos cuatro duros años. Gracias por haber creído en mí desde el primer momento.

Por otra parte, quiero agradecer a todos mis profesores por los conocimientos transmitidos, que son los que han permitido que a día de hoy haya podido llegar hasta aquí. Agradecer en especial a aquéllos que me inspiraron para elegir esta fascinante rama de la Ingeniería Civil.

Por último, agradezco enormemente la labor y ayuda de mi tutor Alejandro López Ruiz, al que considero un gran profesional y referente.

Los estuarios, especialmente los aluviales, son un tipo de morfología de transición entre el régimen fluvial y el litoral, con unas características únicas que surgen de la síntesis de los dos anteriores. Pese a que participan una gran multitud de factores puede establecerse que, a grandes rasgos, su hidrodinámica es fruto de la combinación entre la descarga fluvial, que afecta en mayor medida a la zona superior, y la marea astronómica, que predomina en la zona más cercana a la desembocadura. Es claro que la concentración de sal en estas mismas dos zonas será, o bien la correspondiente a la del agua dulce (primer caso) o bien la asociada al agua del mar (36 psu).

La zona intermedia entre las dos anteriores, de comportamiento también intermedio, variará su posición de equilibrio en función de los condicionantes externos en el estuario, concretamente, debido a la variabilidad de la marea y de la descarga fluvial.

La marea astronómica, causada por la interacción gravitatoria de la Tierra, la luna y el sol, provoca oscilaciones de nivel principalmente en dos escalas temporales distintas, con periodo diario o semidiurno (pleamares y bajamares) o cada quince días (mareas vivas y muertas).

Por otra parte, la variabilidad de la descarga estará asociada fundamentalmente al régimen de lluvias, de tal forma que el caudal medio en el río experimentará crecidas en las estaciones húmedas y se verá reducido durante el periodo estival.

Estas variaciones provocarán la migración de la zona intermedia hacia posiciones más altas cuando las descargas sean reducidas o el régimen litoral sea de marea viva (acentuado en pleamar). En este mismo caso, la intrusión salina alcanzará sus valores máximos. Por el contrario, la zona de transición se concentrará en la parte baja del estuario cuando la descarga fluvial sea de gran envergadura o la participación de la marea se vea reducida por la ocurrencia de mareas muertas (aún menor en bajamar). La intrusión asociada a este escenario será, a su vez, mínima.

Además de estudiar el alcance de la sal en el estuario, puede realizarse un análisis acerca de su distribución. Así, las condiciones hidrodinámicas en el estuario podrán dar lugar a situaciones en las que puedan distinguirse regiones de concentración homogéneas u otras en las que exista una fuerte variación de concentración en la columna de agua. Se habla en este último caso de un estuario estratificado y la ocurrencia o no del mismo puede determinarse en función de una serie de parámetros que dependen de la variación de concentración en la vertical (parámetro de estratificación) o del balance energético entre la descarga fluvial y la marea (número de Richardson).

El objetivo de este trabajo es determinar cómo cambia la posición de la zona de transición y la distribución salina en el estuario, fruto de la interacción entre la dinámica litoral y la descarga fluvial, representada por posibles avenidas de distinto periodo de retorno.

Concretamente, el estudio se centrará en torno al estuario del río Guadiana, en el cual se analizará la influencia de la construcción de la Presa de Alqueva en condiciones medias y el efecto de avenidas en régimen extremal de 500, 1000 y 2500 m³/s de caudal punta.

Para ello, se elaborará un modelo numérico tridimensional en el software Delft 3D, que pasará por una serie de etapas. En primer lugar, deberá establecerse el dominio espacial del problema, lo cual se realizará partiendo de la aproximación geométrica que supone la consideración de un *estuario idealizado*. Se entiende por el mismo, a grandes rasgos, un entorno caracterizado por unos márgenes que convergen siguiendo una función exponencial y una profundidad aproximadamente constante. Los coeficientes que gobiernan estas formas geométricas se obtendrán de forma experimental.

Una vez definida la geometría del modelo, sin perder de vista la discretización temporal, se procede a la definición de las condiciones iniciales y de contorno.

El primer grupo de condiciones estará asociado a la posición de equilibrio de la cuña salina durante el régimen medio del estuario, mientras que el segundo deberá responder a condiciones hidráulicas que reflejen un comportamiento real.

El último paso para completar el modelo será definir los parámetros físicos de mayor relevancia en el análisis, lo cual será fruto de un análisis de sensibilidad. Concretamente, se considerará el efecto de la fricción, la viscosidad y la difusividad en los ejes horizontal y vertical.

Una vez finalizado el modelo se definirán las simulaciones necesarias para obtener los resultados del análisis, que serán discutidos y permitirán extraer una serie de conclusiones.

Por último, se expondrán los aspectos a mejorar y la consecuente apertura de nuevas líneas de trabajo.

Alluvial estuaries are a kind of transition morphology between a river and the sea. However, its hydraulic characteristics are unique and different from those belonging to both mentioned. Despite the existence of many agents that take part in this performance, river discharge and astronomical tide are prevailing. Actually, the tide will control the closest part to the mouth and the discharge will determine the hydrodynamic of the highest area. Therefore, the salt concentration will be the one associated to sea and fresh water, respectively.

The position of the space placed between these two zones will vary according to the dynamic balance between the river discharge and the tide.

Astronomical tide, which is a result from the gravitational interaction between the Earth, the moon and the sun causes level variations along two different time scales, due to the existence of neap and spring tides and the short intra-tidal period.

On the other hand, the river discharge variability is determined by the rain regime. In this way, it will be reduced during the dry season and will reach its maximum volume during the wet months.

Those variations will generate the migration of the intermediate zone upstream the river when the discharge is low or there is spring tide. In this case, saline intrusion is maximum. Conversely, salt concentration will be limited to the mouth when high discharge takes place or the sea level is in period of neap tide. Salt intrusion is, in this case, close to its lowest values.

Additionally, a salt distribution analysis can be carried out. Considering different situations of river discharge, the salt distribution will respond to a well-mixed estuary, where homogeneous regions can be distinguished, or a stratified estuary. The last case, associated to a high discharge on the river, implies a sharp vertical gradient of salt concentration and its determination is possible thanks to some numerical parameters. Two of them will be used during this investigation, and they are the stratification parameter, result of the salt difference between surface and bottom, and the Richardson's Number, defined as the energetic balance between tidal and riverine energy.

The main objective of this study is to determine how the salt intrusion (and distribution) changes due to different regimes in the estuary, considering tidal and discharge variation.

Concretely, the study is focused on the Guadiana's estuary, where two types of analysis are going to be executed. First of all, the study is centered on ordinary conditions in the estuary and the influence of the construction of Alqueva's Dam. After that, different hydrographs in extreme regime will be taken into account.

In order to achieve the aim of the study, a three-dimensional numerical model is going to be generated in making use of Delft 3D software.

First of all, geometry has to be generated. In order to represent it, the definition of an ideal estuary is taken as an approximation where banks are represented by an exponential function and depth is approximately constant. The numerical parameters needed will be extracted from different empirical studies.

Once geometry is generated, the model proceeds with the definition of initial and boundary conditions.

The first group of conditions will be associated to the equilibrium position of salt concentration during the normal situation in the estuary. The second one, on the other hand, needs to respond to a real hydraulic restriction.

The last part of the model definition will be the determination of the main physical parameters, which are friction and vertical and horizontal viscosity and diffusivity.

Once the modelling has finished, simulations will be defined in order to obtain the required results. After that, this document includes the discussion and conclusions from the analysis and the improvable aspects and future research lines.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	11
1.1 <i>Motivación del trabajo</i>	11
1.2 <i>Objetivos</i>	11
1.2.1 <i>Objetivo principal</i>	11
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	12
1.3 <i>Estructura</i>	12
2 Hidrodinámica y salinidad en estuarios aluviales	13
2.1 <i>Estuarios aluviales</i>	13
2.1.1 <i>Forma de los estuarios aluviales</i>	14
2.2 <i>Hidrodinámica de estuarios aluviales</i>	16
2.3 <i>Salinidad y estratificación en estuarios aluviales</i>	17
3 Metodología	21
3.1 <i>Definición del estuario idealizado</i>	21
3.2 <i>Modelo numérico</i>	25
3.2.1 <i>Descripción</i>	26
3.2.2 <i>Implementación en la zona de estudio</i>	27
3.2.3 <i>Análisis de sensibilidad</i>	33
3.3 <i>Definición de simulaciones</i>	37
3.3.1 <i>Simulación de las condiciones previas a la construcción de la Presa de Alqueva</i>	38
3.3.2 <i>Simulación de las condiciones posteriores a la construcción de la Presa de Alqueva</i>	39
3.3.3 <i>Simulación en régimen extremal. Hidrograma de caudal punta de 500 m³/s</i>	40
3.3.4 <i>Simulación en régimen extremal. Hidrograma de caudal punta de 1000 m³/s</i>	42
3.3.5 <i>Simulación en régimen extremal. Hidrograma de caudal punta de 2500 m³/s</i>	43
4 Resultados	47
4.1 <i>Condiciones medias. Influencia de la construcción de la Presa de Alqueva</i>	47
4.2 <i>Análisis en régimen extremal (Q_p=500 m³/s)</i>	51
4.3 <i>Análisis en régimen extremal (Q_p=1000 m³/s)</i>	54
4.4 <i>Análisis en régimen extremal (Q_p=2500 m³/s)</i>	56
5 Conclusiones y futuras líneas de trabajo	59
5.1 <i>Conclusiones</i>	59
5.2 <i>Futuras líneas de trabajo</i>	60
Referencias	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen del análisis geométrico del estuario	24
Tabla 2 Armónicos de marea	30
Tabla 3 Modelos para el análisis de sensibilidad de los parámetros físicos	36
Tabla 4 Resumen de resultados	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Forma en planta de un estuario aluvial tipo.	15
Figura 2.2 Perfil longitudinal tipo de un estuario aluvial.	15
Figura 2.3 Perfil longitudinal tipo de un estuario estratificado. Savenije (2012).	18
Figura 2.4 Perfil longitudinal tipo de un estuario parcialmente estratificado. Savenije (2012).	18
Figura 2.5 Perfil longitudinal de un estuario verticalmente homogéneo. Savenije (2012).	19
Figura 3.1 Vista en planta (arriba) y perfil (abajo) del estuario del Guadiana.	22
Figura 3.2 Detalle de la medición en la desembocadura del estuario.	23
Figura 3.3 Interpolación de los datos de anchura mediante función exponencial.	24
Figura 3.4 Interpolación de los datos de área mediante función exponencial.	25
Figura 3.5 Imagen ampliada de los splines que conforman el dominio.	28
Figura 3.6 Malla definitiva del modelo. Planta general (arriba) y ampliación de la misma (abajo).	28
Figura 3.7 Batimetría del estuario. Entorno litoral (arriba) y entorno fluvial (abajo).	29
Figura 3.8 Superficie global (telescópica) del estuario.	30
Figura 3.9 Puntos de control en el análisis de sensibilidad de la malla.	33
Figura 3.10 Comparativa de nivel y velocidad en el análisis de sensibilidad de la malla.	34
Figura 3.11 Diferencias porcentuales entre los resultados del análisis de sensibilidad de la malla.	35
Figura 3.12 Distribución de salinidad en el eje del estuario para los modelos de calibración.	36
Figura 3.13 Diferencias porcentuales de salinidad entre modelos.	37
Figura 3.14. Hidrograma adimensional SCS.	38
Figura 3.15 Evolución del nivel del mar ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$).	39
Figura 3.16 Evolución del nivel del mar ($Q= 50 \text{ m}^3/\text{s}$).	40
Figura 3.17 Hidrograma de caudal de punta $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa el pico en $550 \text{ m}^3/\text{s}$, dado que se trata de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ sobre el caudal base ($50 \text{ m}^3/\text{s}$).	40
Figura 3.18 Evolución del nivel del mar ($Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$).	41
Figura 3.19 Velocidad en la desembocadura ($Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$).	41
Figura 3.20 Hidrograma de caudal de punta $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa el pico en $1050 \text{ m}^3/\text{s}$, dado que se trata de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ sobre el caudal base ($50 \text{ m}^3/\text{s}$).	42
Figura 3.21 Evolución del nivel del mar ($Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$).	43
Figura 3.22 Velocidad en la desembocadura ($Q= 1000 \text{ m}^3/\text{s}$).	43
Figura 3.23 Hidrograma de caudal de punta $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa el pico en $2550 \text{ m}^3/\text{s}$, dado que se trata de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ sobre el caudal base ($50 \text{ m}^3/\text{s}$).	44
Figura 3.24 Evolución de la marea ($Q=2500 \text{ m}^3/\text{s}$).	44
Figura 3.25 Velocidad en la desembocadura ($Q=2500 \text{ m}^3/\text{s}$).	45
Figura 4.1 Comparación intrusión-nivel e intrusión velocidad en condiciones previas y posteriores a la Presa de Alqueva.	47

Figura 4.2 Comparación de la influencia de la presa sobre la intrusión salina.	48
Figura 4.3 Evolución de la intrusión durante 3 ciclos de marea.	49
Figura 4.4 Distribución salina ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$).	49
Figura 4.5 Estratificación ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$).	50
Figura 4.6 Intrusión ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$).	51
Figura 4.7 Distribución salina ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$).	52
Figura 4.8 Estratificación ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$).	53
Figura 4.9 Intrusión ($Q_p= 1000 \text{ m}^3/\text{s}$).	54
Figura 4.10 Distribución salina ($Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$).	55
Figura 4.11 Estratificación ($Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$).	55
Figura 4.12 Intrusión ($Q_p= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$).	56
Figura 4.13 Distribución salina ($Q_p= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$).	57
Figura 4.14 Estratificación ($Q_p= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$).	57

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del trabajo

Los estuarios constituyen uno de los tipos morfológicos de transición entre el entorno fluvial y el litoral, que ocurren habitualmente en desembocaduras estrechas de ríos. Su forma y extensión están condicionadas por múltiples factores y procesos, de entre los que destacan, además de la actuación humana, la interacción entre el nivel del mar, representado principalmente por la marea, y la descarga fluvial.

El interés de estos entornos reside en múltiples aspectos. En primer lugar, desde el punto de vista económico y social, se trata de espacios altamente poblados e industrializados en los que se desarrolla una elevada actividad agrícola. Esto es posible gracias a la riqueza de la tierra, que se ve favorecida por el intercambio de agua y nutrientes entre el río y el mar. Este último factor es también el responsable de la proliferación de ecosistemas de elevada biodiversidad, lo que les confiere gran valor ecológico, llegando algunos a constituir reconocidos Parques Naturales. Por último, los estuarios pueden constituir una vía navegable para embarcaciones, lo cual potencia la actividad comercial y portuaria de la zona.

La mayor parte de los aspectos comentados anteriormente se ven afectados por la presencia de la sal en el estuario, premisa de la que parte el desarrollo de este trabajo, en el que se pretende abordar un análisis de la distribución de la salinidad en estuarios aluviales en función de la descarga fluvial, aplicado al caso concreto del estuario del río Guadiana. Concretamente, el documento se centra en determinar la intrusión salina y la estratificación bajo distintas hipótesis del régimen fluvial combinadas con los procesos propios de la dinámica litoral.

El conocimiento de la intrusión salina, así como de la distribución de la salinidad en el estuario, permitirán llevar a cabo una gestión eficiente de la cuenca, pudiéndose asignar correctamente los usos de suelo en función de su compatibilidad con estos factores. Esto afecta directamente al ámbito de los cultivos y, principalmente, a aquellos que se nutren de las aguas del estuario, de manera que se podrían definir zonas de potencial desarrollo sin riesgo de afección de la sal o en las que se admita una cierta concentración tolerable, según el tipo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

El elevado interés de los estuarios reflejado en el apartado anterior les confiere cierta susceptibilidad de ser objeto de múltiples actuaciones humanas, de entre las que destacan los dragados, que buscan la mejora de la navegabilidad por aumento del calado, la ejecución de presas en el cauce, con el fin de conseguir el aprovechamiento de los recursos hídricos, y la construcción de diques, espigones u otras obras de protección frente a la acción del mar.

La presencia de estos elementos, así como la influencia cada vez mayor del cambio climático sobre el nivel del mar, provocan cambios constantes en la morfología e hidrodinámica de los estuarios y, por tanto, en la distribución de la salinidad a lo largo de los mismos.

La intrusión salina, entendiéndose por ésta la distancia a partir de la cual la concentración de sal en el estuario desciende hasta los 3.6 psu, puede llegar a condicionar los patrones de migración y reproducción de los peces, relacionados directamente con la actividad del sector pesquero. Por otra parte, la concentración de sal puede producir cambios en los ecosistemas presentes en el entorno, modificando la flora y la fauna del mismo, hasta el punto que se registran casos de invasión de especies y pérdida de las autóctonas de la zona.

Desde otro punto de vista, el avance del frente salino puede llegar a provocar la salinización de los acuíferos presentes en la zona en su recarga con agua procedente del estuario, dificultándose el aprovechamiento del

mismo para usos como el regadío.

Siendo clara la necesidad de conocer y localizar el alcance de la sal, el objetivo de este trabajo es analizar la forma en que varía este parámetro sujeto a distintas hipótesis de descarga fluvial. En primer lugar, particularizando al estuario del río Guadiana, se analizará la influencia de la presa de Alqueva y su consecuente reducción de la descarga sobre la distribución salina en el estuario y, posteriormente, se analizará el comportamiento de este parámetro ante avenidas de distinta envergadura. El efecto será distinto en función de la participación de la dinámica litoral, siendo especialmente relevante considerar la variación entre periodos mareales semidiurnos (pleamares y bajamares) o ante la presencia de mareas vivas o muertas. El fin último es poder comparar la influencia de cada uno de estos factores sobre la distribución y llegar a determinar la posición máxima de la intrusión, de manera que se resuelvan los problemas planteados, que son fruto de la falta de planificación.

1.2.2 Objetivos específicos

El propósito que se plantea parte de la definición de la zona de estudio que, como se mencionó anteriormente, será el estuario del río Guadiana. No obstante, no se analizará el propio estuario, sino una aproximación del mismo a través del concepto de estuario idealizado. Es por tanto el primer objetivo transformar la geometría del entorno real en una simplificada, para lo que se recurrirá a distintos estudios que han procurado determinar empíricamente los parámetros necesarios en la definición. Dichos valores serán contrastados con mediciones propias a lo largo del estuario, con el fin de corroborar el ajuste de las expresiones empleadas.

Sobre el estuario idealizado definido se implementará un modelo que permita simular la respuesta hidrodinámica del sistema ante perturbaciones de distinto tipo (descargas constantes, hidrogramas de distinto caudal punta, etc.), incorporadas a través de una condición de contorno en el río.

Dicho modelo deberá superar previamente un análisis de estabilidad, tras el cual se podrá concluir una resolución óptima de la malla y un ajuste de los parámetros físicos que permitan obtener resultados acordes a los que tendrían lugar en el propio estuario sometido a las mismas condiciones y que podrían medirse a través de ensayos de campo.

Una vez finalizada la validación del modelo, se procede a definir e incorporar en el modelo los distintos regímenes del río para los que se quiere dar respuesta, procediendo al análisis de los resultados y a la obtención de conclusiones.

1.3 Estructura

La estructuración de la memoria se realiza en torno a los siguientes apartados. Tras reflejar la importancia y el interés de los estuarios en este primer apartado, así como los objetivos principales del estudio, se procede en el segundo a desarrollar toda la información de interés acerca de los mismos, centrada principalmente en la hidrodinámica y salinidad de estuarios aluviales. Uno de los puntos más importantes de este apartado es la definición de los parámetros que se emplearán para el análisis de resultados y la obtención de conclusiones.

Dando por finalizado el marco teórico, el tercer apartado se centra en la elaboración del modelo numérico, partiendo de la definición de estuario idealizado y continuando por la adaptación del modelo a la zona de estudio. Una vez superado el análisis de estabilidad, se procede a la definición de simulaciones.

El cuarto apartado recoge los resultados obtenidos, su análisis y discusión, de los que se extraen las conclusiones expuestas en el quinto y último punto.

2 HIDRODINÁMICA Y SALINIDAD EN ESTUARIOS ALUVIALES

2.1 Estuarios aluviales

Un estuario es un sistema de transición entre un río y el mar, por lo que cuenta con características propias de ambos medios. Por parte del río, se trata de un entorno en el que transcurre una corriente de agua dulce y que cuenta con un transporte de sedimentos propio de los últimos cursos de un río. Con respecto al mar, se trata de un emplazamiento cuya hidrodinámica está fuertemente vinculada a la marea, de manera que presenta volúmenes de agua salada que varían en función del comportamiento de las mismas.

Por otra parte, como se mencionó en apartados anteriores, se trata de medios ricos en nutrientes que dan lugar al desarrollo de múltiples formas de vida y a la existencia de una amplia diversidad de flora y fauna. La elevada fertilidad del suelo, la llanura del terreno y la alta disponibilidad de agua dulce hacen de este sistema un espacio de gran potencial agrícola, siempre y cuando la descarga fluvial sea suficiente como para limitar la intrusión salina. Sin embargo, también se trata de medios muy sensibles a la contaminación y a la acumulación de sedimentos por lo que su vida es relativamente corta.

Pese a ser fruto de la combinación del régimen fluvial y el litoral, los estuarios presentan un comportamiento hidráulico único y distinto al de los dos anteriores, que está principalmente dominado por la marea y la descarga fluvial, si bien puede considerarse la influencia de otros agentes.

La marea (astronómica) es una perturbación en el nivel del mar que se origina debido a la atracción gravitatoria de la Tierra, la luna y el sol. Matemáticamente, puede considerarse como una onda constituida por una suma infinita de armónicos, si bien los más representativos corresponden a los de periodos diurnos y semidiurnos. Se trata de la principal fuente de agua salada y el componente de mayor energía en el estuario. Al producir de forma periódica la entrada y salida de agua genera un proceso erosivo que se atenúa conforme avanza hacia aguas arriba en el río.

La descarga fluvial representa, por el contrario, el aporte de agua dulce y sedimento del sistema. Este transporte está claramente influenciado por la forma del estuario, de tal manera que en aquellos que presenten márgenes paralelos y, por tanto, sección transversal constante, el transporte se producirá de forma rápida y por causa del propio avance de la descarga. En cambio, si los márgenes tienden a divergir, la velocidad se verá reducida por el aumento de la sección transversal y el transporte de sedimento dependerá de la energía de las corrientes residuales.

Otro factor importante, aunque relacionado en mayor medida con cuestiones morfológicas, es el oleaje. Fruto de la combinación del viento y la presión atmosférica, este agente es el principal responsable de la formación de la boca del estuario, siendo especialmente relevantes los eventos de régimen extremal. A diferencia de la marea, se trata de un proceso que actúa y se disipa en las inmediaciones de la desembocadura.

Por otro lado, cabe mencionar la importancia del transporte de sedimento paralelo a la línea de costa, que continúa avanzando si supera la cantidad que la acción conjunta de la descarga fluvial y la marea es capaz de erosionar, formando barras o flechas que pueden llegar a cerrar temporalmente la desembocadura. Esto impediría la entrada de agua salada en el estuario y, por ende, un fuerte retroceso de la intrusión salina.

El gradiente de densidad existente en el límite entre agua dulce y salada provoca la formación de corrientes residuales en el fondo, que posibilitan el transporte del sedimento marino, y la deposición de la carga en suspensión, generando un alto grado de turbidez que permite reconocer visualmente la posición aproximada de la intrusión salina.

Por último, cabe destacar la importante influencia del clima, que determina el régimen fluvial (magnitud de las descargas), el nivel de evaporación, la temperatura del agua y la frecuencia de precipitaciones, por lo que

participa en gran medida sobre la concentración de sal.

De entre las múltiples clasificaciones que pueden aplicarse a los estuarios (en función de la forma, la influencia de la marea y del río, la geología, la salinidad, etc.) el texto se centrará a partir de ahora en los estuarios aluviales, en torno a los cuales se desarrolla el presente documento.

Según Savenije (2012), un estuario aluvial es aquel que presenta un lecho formado por material depositado tanto por el río como por el mar y en el que existe posibilidad de transporte debido al movimiento del agua, que podrá erosionar el lecho (profundizando o ensanchando la sección) o depositar sedimentos en él, lo cual demuestra una clara relación entre la geometría y el comportamiento hidráulico. La mayor o menor medida en que ocurre la erosión y la sedimentación revela la existencia de un perfil de equilibrio dinámico observable a tres escalas distintas: en un ciclo de marea (distinguiéndose la variación de velocidad entre pleamar y bajamar), cada quince días (que es el tiempo que permite apreciar la variación de amplitud entre una marea viva y una muerta) y estacional o anual (con elevada descarga fluvial en tiempo húmedo y reducida en tiempo seco).

Cabe mencionar que esta fuerte interdependencia entre la topografía y el comportamiento hidráulico han permitido a numerosos autores describir la hidrodinámica de estos sistemas a través de una serie de ecuaciones.

2.1.1 Forma de los estuarios aluviales

La definición de la forma en planta de un estuario aluvial puede llevarse a cabo fácilmente teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La boca del estuario, entendiéndose por ésta el punto donde se produce el cambio de flujo bidimensional a unidimensional, determina el origen del eje longitudinal (x), cuyos valores crecen conforme avanza de forma ascendente en el estuario.
- El ancho de la sección transversal, $B(x)$, varía exponencialmente con la distancia al origen siguiendo el eje definido en el apartado anterior, pudiéndose aplicar para su cálculo la siguiente expresión, cuyas connotaciones implícitas se describirán más adelante.

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

Donde x es la distancia al origen, B_0 el ancho de la sección transversal en la boca del estuario (B en $x=0$) y b la distancia (siguiendo el eje) desde la boca hasta el punto donde se produce la intersección entre la tangente al margen por el punto $(0, B_0/2)$ y el eje longitudinal.

- Al igual que en el caso anterior, el área de la sección transversal, $A(x)$ puede considerarse que varía exponencialmente con la distancia al origen, siendo de aplicación la siguiente expresión, análoga a la anterior.

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

Siendo x la distancia al origen, A_0 el área de la sección transversal en la boca del estuario (A en $x=0$) y a la distancia (siguiendo el eje) desde la boca hasta el punto donde se produce la intersección entre la tangente al margen por el punto $(0, A_0)$ y el eje longitudinal.

- La excursión de marea, E , por la que se entiende la diferencia entre el máximo alcance de la pleamar y el mínimo de la bajamar es aproximadamente constante y puede considerarse del orden de 10 kilómetros.

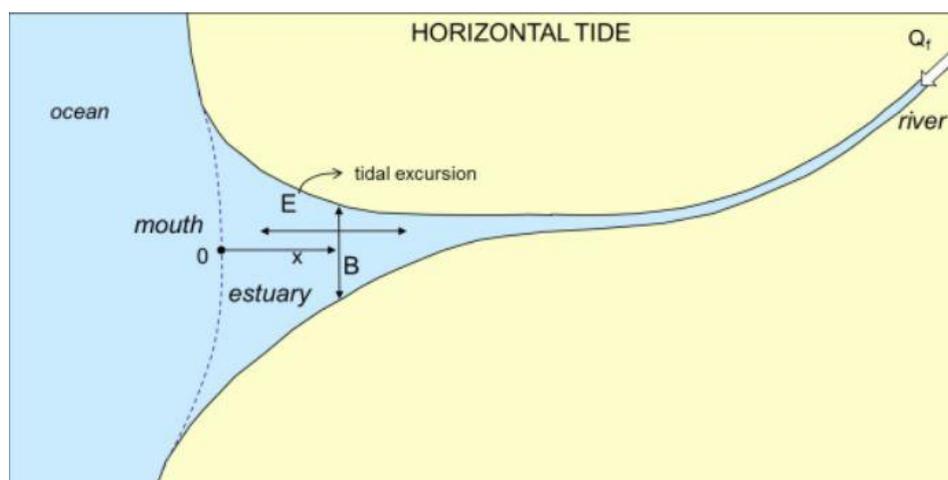


Figura 2.1 Forma en planta de un estuario aluvial tipo

En cuanto a la definición de la forma del perfil longitudinal son de aplicación las leyes de Fargue. En ellas se expone que la pendiente local del fondo del thalweg es directamente proporcional a la variación de la curvatura del eje. Esto implica que en los puntos de mayor curvatura la profundidad del lecho es mayor, mientras que los puntos de inflexión corresponden a puntos altos del perfil. Por tanto, a medida que se asciende por el estuario y se van recorriendo los distintos meandros, se observan fluctuaciones en la profundidad del fondo.

No obstante, dado que la longitud de estos sistemas es relativamente alta puede considerarse que la profundidad es, en término medio, constante a lo largo de todo el estuario. Además, la consideración de un estuario idealizado en el que la forma en planta se define por una función exponencial sin considerar tramos meandriformes permite asumir una profundidad constante ($h=h_0$).

En la siguiente ilustración se muestra un esquema tipo del perfil longitudinal de un estuario aluvial. En ella puede apreciarse, en base a la idea anterior, una profundidad constante del fondo hasta llegar a la plataforma y tres niveles de la superficie del agua: la pleamar (HW) la bajamar (LW) y el nivel medio del mar (TA). Pese a que este último se muestra sensiblemente horizontal, es importante reflejar que en realidad no lo es, y que sufre fluctuaciones debido al gradiente de densidad, la descarga fluvial y la no linealidad de la ecuación de conservación del momento (Savenije, 2012).

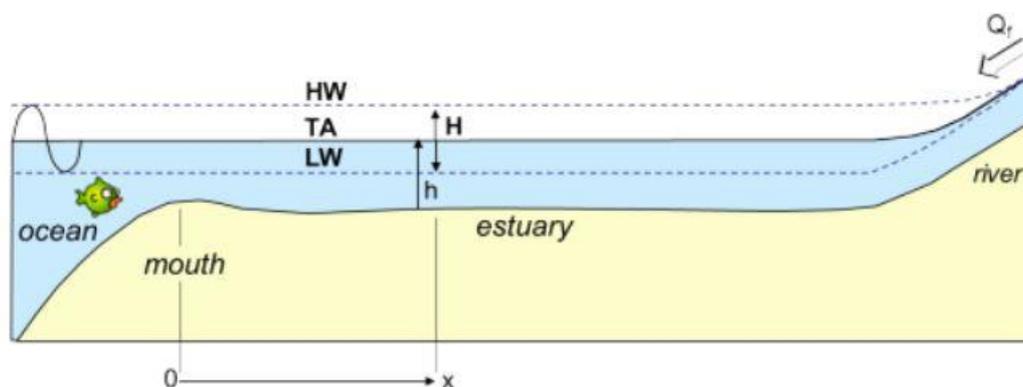


Figura 2.2 Perfil longitudinal tipo de un estuario aluvial

En conclusión, la forma de un estuario aluvial se caracteriza por tener unos márgenes que convergen a través de una función exponencial y una profundidad aproximadamente constante. Dicha forma está condicionada por una serie de factores.

En primer lugar, por la marea, cuyo potencial puede representarse a través de la carrera de marea, y el oleaje, responsable principal de la forma de la boca del estuario. De este último factor son importantes la altura de ola

y la dirección predominante de propagación. También las tormentas son responsables del modelado de la boca del estuario, y en este caso, el potencial dependerá de la cantidad de sedimento presente, tanto aportado por el río como por el mar.

Por otro lado, la forma del estuario esta condicionada por el tipo de sedimento que forma su lecho. Así, sedimentos gruesos se asocian a regímenes de dinámica más fluvial y a una forma, por tanto, más prismática. Por el contrario, si el sedimento que constituye el lecho es de grano fino, el estuario será de dinámica litoral y su forma responderá a las funciones exponenciales expuestas anteriormente.

2.2 Hidrodinámica de estuarios aluviales

En primera instancia, el comportamiento hidrodinámico de los estuarios aluviales está condicionado por el balance entre el flujo de agua dulce (que depende de la sección del río) y el flujo de agua salada (que depende del área del estuario). Bajo este criterio, pueden distinguirse tres tipos de estuarios (clasificación de Davies, 1964):

- **Estuarios micromareales.** En este tipo de formaciones la carrera de marea es inferior a los dos metros, por lo que la hidrodinámica viene marcada por la descarga fluvial aguas arriba y la acción del oleaje y las posibles tormentas aguas abajo.
- **Estuarios mesomareales.** La carrera de marea oscila entre los dos y cuatro metros. A diferencia del anterior, cobra una mayor importancia la influencia de la marea.
- **Estuarios macromareales.** En este caso, la carrera de marea supera los cuatro metros de altura, lo cual permite el ascenso en el estuario hasta una distancia que puede llegar hasta los 100 kilómetros. Así, la hidrodinámica se encuentra plenamente controlada por la marea, siendo apenas significativo el aporte de la descarga fluvial.

Considerando el caso intermedio de un estuario mesomareal, como lo es el estuario del río Guadiana, pueden distinguirse tres tramos en función del régimen dominante. En la parte alta del estuario la influencia de la marea no es apenas apreciable, dado que la onda está práctica o totalmente disipada debido a la fricción con el fondo. Domina la descarga fluvial y la salinidad es nula.

Por el contrario, en las inmediaciones de la boca del estuario las partículas describen movimientos oscilatorios propios del movimiento de las mareas, siendo inapreciable la perturbación de la descarga fluvial (en condiciones medias). En este caso, la concentración de sal ronda los niveles normales del agua del mar (36 psu).

En el caso concreto del río Guadiana, dichas zonas se extienden (considerando la referencia longitudinal expuesta en el apartado anterior) desde el kilómetro 23 hasta el 78 y desde el origen hasta los 7 kilómetros, respectivamente (Garel et al, 2018).

En cuanto a la zona intermedia entre las dos anteriores, ésta se trata de una región de confluencia de los dos tipos de agua, cuyos límites están vinculados a las condiciones de la descarga fluvial y los ciclos de marea. Esto implica que alterará su posición media de equilibrio desplazándose o bien hacia la zona litoral ante descargas elevadas o durante los periodos de menor amplitud de marea (bajamar, mareas muertas), o bien hacia la parte alta del estuario. Este último comportamiento será habitual en tiempo seco (descargas fluviales reducidas) y más acentuado durante la pleamar y en mareas vivas. Uno de los objetivos principales de este trabajo es valorar la influencia combinada de cada uno de estos factores sobre la posición de la zona de transición, pues es la que marca el límite de la intrusión salina.

Desde el punto de vista teórico, Savenije (2012) expuso que existen dos agentes principales que hacen posible la mezcla de aguas en el estuario, que son la energía potencial resultante del gradiente de densidad y la energía cinética y potencial contenida en las mareas. Estos dos agentes dan lugar a cuatro procesos de mezcla distintos.

El primero de ellos es la **turbulencia**. Este fenómeno se produce como consecuencia de la tensión tangencial debida a la fricción con el fondo y es el proceso de menor eficacia.

Otro proceso, de mayor relevancia que el anterior, es el conocido como **mezcla gravitacional**. Éste se basa en el principio de desequilibrio de presión hidrostática que existe a ambos lados de la sección transversal debido a

la diferencia de densidad entre agua dulce y salada, que produce una circulación residual por fondo de agua salada hacia aguas arriba y otra por superficie de agua dulce hacia aguas abajo. Existe además una cierta circulación lateral, causada por la diferencia de salinidad en la propia sección.

Existe otro mecanismo, conocido como “**trapping**”, que se basa en la retención de agua en espacios confinados por barras de sedimento y en la diferencia de fase que existe entre los ciclos de marea y la descarga fluvial. De esta forma, en periodo de pleamar la marea ascenderá por el estuario hasta alcanzar un cierto límite, provocando el llenado de estos espacios con agua salada. Cuando descienda el nivel en la bajamar puede ocurrir que el agua salada quede “atrapada” en estos espacios, provocando una diferencia de densidad y un gradiente de presión con el agua dulce que comienza a entrar en contacto con ella, favoreciendo de la misma forma que en el caso anterior, una serie de corrientes residuales.

Este fenómeno cobra mayor importancia, por tanto, en estuarios aluviales de geometría irregular, y es más intenso cuanto mayor sea la excursión de marea y el gradiente de salinidad. En un estuario idealizado como el que se utilizará en este trabajo, se trata de un proceso que carece de importancia.

Por último, cabe mencionar el proceso de mezcla por **corrientes residuales**, especialmente importante en la zona de la boca del estuario. A diferencia de los dos anteriores, no depende del gradiente de salinidad, sino que es directamente proporcional a la anchura del estuario.

2.3 Salinidad y estratificación en estuarios aluviales

El objetivo principal de este trabajo es analizar la distribución y la intrusión salina en estuarios aluviales, por lo que se considera necesario realizar una introducción teórica de este fenómeno, así como identificar una serie de parámetros clave que permitirán cuantificar y extraer soluciones en el análisis concreto del estuario del río Guadiana.

En general, los estuarios aluviales pueden caracterizarse de forma rápida y eficaz a través de una serie de parámetros o números adimensionales que establecen una relación entre la descarga fluvial y la intrusión salina. De entre éstos destacan principalmente dos.

En primer lugar, se encuentra el **número de estuario** o de Canter-Cremers que, en vistas a la expresión que se muestra a continuación, representa una relación clara entre el volumen de agua dulce que entra en el estuario a través de la descarga fluvial (Q_f) y el volumen de agua salada que entra durante un ciclo de marea (T). Este último parámetro, conocido como prisma de marea (P_t), puede obtenerse fácilmente en el modelo estableciendo una sección de control en la boca del estuario y midiendo el caudal que atraviesa la misma en el periodo de tiempo correspondiente a una bajamar y pleamar consecutivas.

$$N = \frac{Q_f * T}{P_t}$$

Por otra parte, puede recurrirse al parámetro conocido como **número de Richardson** N_R (Fischer et al., 1979), el cual establece un balance entre la energía potencial de la descarga fluvial y la energía cinética de la marea durante un ciclo de marea. Se considera un parámetro de mayor relevancia que el anterior, dado que tiene en cuenta los gradientes de densidad entre agua dulce y salada y el número de Froude. Su expresión es la siguiente:

$$N_R = \frac{\Delta\rho}{\rho} * \frac{gh}{v^2} * \frac{Q_f T}{P_t}$$

Donde cabe destacar como parámetros no citados anteriormente la velocidad de la onda de marea en la boca del estuario (v), la densidad del agua salada (ρ), el gradiente o diferencia entre la densidad del agua salada y la del agua en cada instante ($\Delta\rho$), la constante de aceleración de la gravedad (g) y la profundidad en la sección (h)

En vistas a lo anterior pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Valores elevados del número de Richardson están asociados a una elevada energía procedente de la descarga fluvial, que permite mantener una interfaz brusca en el estuario. Da lugar a estuarios estratificados.
- Valores reducidos del número de Richardson implican una mayor componente energética asociada al prisma de marea, que favorece la mezcla del agua dulce y salada y da lugar a estuarios verticalmente homogéneos. En este caso, el flujo está dominado por los gradientes de densidad.

Por tanto, atendiendo a la intrusión salina y a la estratificación, pueden distinguirse tres tipos de estuario:

- I. **Estuarios estratificados** (N_R elevado). En este tipo de estuarios la salinidad cambia bruscamente en una sección cercana a la desembocadura (intrusión salina reducida) y tiene lugar en las estaciones húmedas, cuando las descargas fluviales son elevadas. El perfil longitudinal está constituido pues, por dos zonas (una al 35‰ de salinidad y otra al 0‰) separadas por una sección en la que existe un importante gradiente de densidad en la vertical.

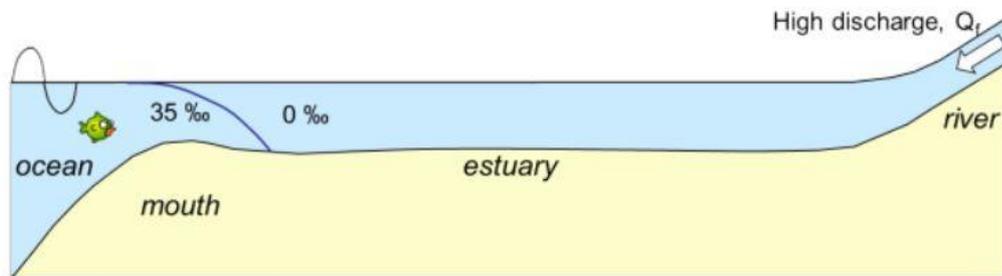


Figura 2.3 Perfil longitudinal tipo de un estuario estratificado. Savenije (2012)

- II. **Estuarios parcialmente estratificados**. En este caso, la transición se produce de forma gradual a lo largo del estuario (mayor intrusión salina), dando lugar a un perfil longitudinal en el que las isolíneas de salinidad no son perpendiculares al lecho. Esto implica que en una misma sección vertical se dan distintos valores de salinidad; la mezcla no es homogénea. Este régimen se asocia a descargas fluviales de mediana envergadura.

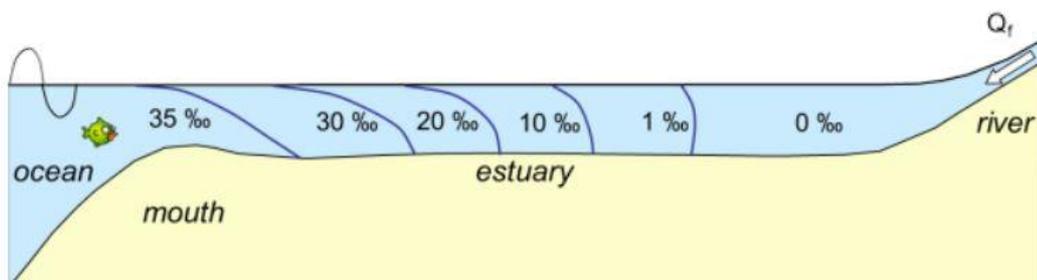


Figura 2.4 Perfil longitudinal tipo de un estuario parcialmente estratificado. Savenije (2012)

- III. **Estuarios verticalmente homogéneos** (N_R bajo): se caracterizan por una descarga fluvial notablemente menor a la de los casos anteriores, propia de estaciones secas, que permite un mayor avance del prisma de marea (intrusión salina máxima). En este caso, el perfil longitudinal se asemeja al anterior, pero con la discrepancia de que las isolíneas son paralelas entre sí y aproximadamente perpendiculares al lecho, de forma que las secciones verticales contienen un único nivel de salinidad

(existen regiones de homogénea concentración de sal, decreciente conforme nos desplazamos hacia aguas arriba).

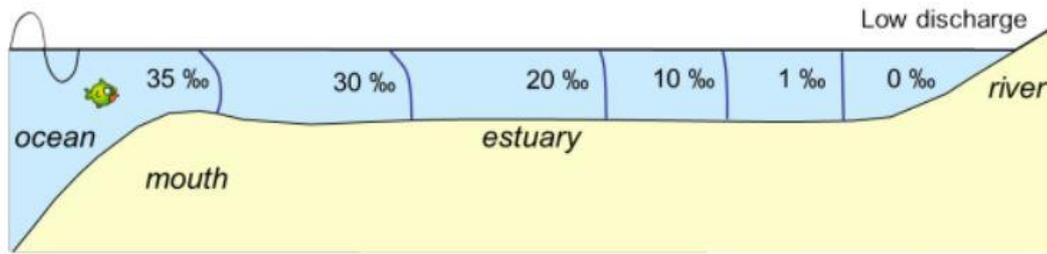


Figura 2.5 Perfil longitudinal de un estuario verticalmente homogéneo. Savenije (2012)

A diferencia de la distinción que pudiera existir entre el segundo y el tercer tipo, que resulta menos clara, puede considerarse que la transición entre un estuario verticalmente homogéneo y uno estratificado ocurre para valores del número de Richardson comprendidos entre **0,08** y **0,8**. Este umbral es el que se empleará para calificar la situación en el estuario del río Guadiana.

Por otra parte, puede evaluarse la estratificación en el estuario atendiendo al **parámetro de estratificación** (S_p) por el que se entiende el cociente entre la diferencia de salinidad en superficie y fondo, y la salinidad media en la sección, según indica la siguiente expresión (Haralambidou et al., 2010).

$$S_p = \frac{S_{fondo} - S_{superficie}}{0.5 * (S_{fondo} + S_{superficie})}$$

A través de este coeficiente podrá concluirse la existencia de estratificación si el valor que toma es superior a **0,1** y verticalmente homogéneo en otro caso.

Existe un último parámetro conocido como **frecuencia de Brunt-Väis älä**, relacionado con la variación temporal de la estratificación en los estuarios (Perales-Valdivia et al., 2018), en el que intervienen la densidad media (ρ), la aceleración de la gravedad (g) y la variación de la densidad en la sección.

$$N = \sqrt{\frac{-g \delta\rho}{\rho \delta z}}$$

De forma empírica puede asumirse que valores elevados de N^2 (en el entorno de $0,1 \text{ s}^{-1}$) se asocian a estuarios estratificados mientras que valores inferiores a 10^{-2} s^{-1} se relacionan con estuarios parcialmente mezclados.

La evaluación de la estratificación en el estuario del Guadiana se realizará en función de los resultados obtenidos para los parámetros anteriores, incidiendo especialmente en el número de Richardson y el parámetro de estratificación.

En el primer caso, tal y como se introdujo anteriormente, se definirá una sección transversal de control en la boca del estuario, que permita obtener el valor del prisma de marea a través del caudal que haya atravesado la misma durante el ciclo de marea. Adicionalmente se requerirán los resultados de velocidad en el punto de control correspondiente a la boca del estuario, la descarga fluvial, la profundidad y la densidad en cada instante de tiempo.

Con respecto al segundo parámetro, el hecho de implementar un modelo tridimensional permite estimar el parámetro de estratificación a partir de los valores de salinidad obtenidos en las capas extremas del modelo.

3 METODOLOGÍA

Una vez establecido el marco informativo que contextualiza el análisis, se procede en este apartado a desarrollar el proceso que permite alcanzar el modelo numérico a implementar para la obtención de resultados.

Dicho proceso comienza con la introducción del concepto de estuario idealizado, pues se trata del modelo adoptado en la definición geométrica del estuario a analizar, cuyos parámetros pueden extraerse de diversos estudios realizados sobre el mismo. Adicionalmente, se realizan una serie de mediciones para corroborar la validez de dichos resultados.

Definida la geometría y batimetría del estuario, se recurre al software Delft 3D para elaborar el modelo hidrodinámico. A través de este programa, sobre el que se realizará una breve introducción, se pueden incorporar cada uno de los fenómenos clave que actúan sobre el comportamiento de la salinidad en el medio.

Al igual que ocurre en todo modelo numérico, su aceptación requiere de la superación de una fase de calibración y otra de validación de resultados. En este sentido cabe mencionar que los parámetros presentes en el modelo definitivo son fruto de un análisis de sensibilidad en el que se han considerado, en primer lugar, distintas discretizaciones del dominio con el fin de alcanzar aquella que permita obtener resultados adecuados en un tiempo de computación razonable. La segunda parte del análisis consiste en contrastar el efecto producido por la variación de los parámetros físicos presentes en el modelo (rugosidad, viscosidad y difusividad) y elegir los más representativos del comportamiento real del estuario del Guadiana.

Por último, se listarán las simulaciones realizadas a través del modelo finalmente construido y que permitirán abordar el análisis de resultados.

3.1 Definición del estuario idealizado

El concepto de estuario idealizado surge empíricamente tras la observación de un patrón geométrico que se repite en estuarios de ríos cuyo emplazamiento y características hidráulicas difieren mucho entre sí.

En primer lugar, se observa, tal y como se comentó en el apartado 2.2.1, que la profundidad del lecho permanece, en término medio, sensiblemente constante a lo largo de todo el estuario, dejando a un lado las variaciones locales que puedan ocurrir por fenómenos tales como cambios de forma en planta. Esto implica que no existe dependencia entre la profundidad y la variable espacial x definida, como se introdujo también, como la distancia medida sobre el eje del estuario.

$$\frac{\partial h}{\partial x} \approx 0$$

Por otra parte, se puede observar que la amplitud de la velocidad de la onda de marea es prácticamente idéntica en todos los puntos que comprenden la zona entre la boca del estuario y el límite de la intrusión salina. Más aún, el valor que toma esta variable no difiere significativamente entre estuarios micromareales y macromareales, pudiéndose establecer un valor medio de 1 m/s. Si no existe gradiente de velocidad en el espacio, puede considerarse que la excursión de marea es aproximadamente independiente de la variable espacial. También lo es la carrera de marea, que al igual que la anterior, sufre variaciones debidas a los fenómenos de pleamar y bajamar y de mareas vivas y muertas, por lo que se trata de variables que dependen del tiempo, pero no del espacio.

$$\frac{\partial E}{\partial x} \approx 0$$
$$\frac{\partial H}{\partial x} \approx 0$$

El comportamiento descrito anteriormente puede modelizarse matemáticamente a través de una serie de ecuaciones cuyo cumplimiento solamente es posible en estuarios que cumplen una serie de condiciones geométricas. Éstas reflejan principalmente que la forma de los márgenes debe responder a una función exponencial, lo cual requiere además la asunción de un coeficiente de rugosidad constante. Esta aplicación será, por tanto, factible en ríos en los que el material que compone el lecho sea prácticamente homogéneo y en los que la posible generación de formas de fondo no afecte sensiblemente a la rugosidad.

El resultado de la consideración global de todas estas premisas es lo que se conoce como estuario idealizado, en los que la cantidad de energía por unidad de volumen permanece constante en todo momento. Esto implica que la energía que se pierde por fricción en la erosión del medio es exactamente la misma que se gana por sedimentación y convergencia de los márgenes, de manera que existe un equilibrio dinámico total.

Las funciones exponenciales que permiten describir la geometría (ancho y sección transversal) de los estuarios idealizados tienen la forma que se muestra a continuación. Como puede observarse, la modelización depende únicamente del ancho y sección transversal en la boca del estuario (B_0 , A_0), las longitudes de convergencia (a , b) y la distancia al origen (x).

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

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

El siguiente paso consiste, por tanto, en transformar la geometría real del estuario del río Guadiana en una simplificada a través de esta aproximación. Estudios realizados por Garel y Cai (2018) y Garel y D'Alimonte (2017) demuestran que esto es posible y asumen, además, que el flujo se concentra principalmente en una sección transversal rectangular, por lo que la profundidad del lecho en cada sección puede calcularse a través del cociente entre el área $A(x)$ y el ancho $B(x)$ de la misma. Esta última premisa es posible gracias a la concentración de sedimento a lo largo de una franja longitudinal en el estuario, que permite reducir el perímetro mojado desde un ancho total (B_s) a uno menor (B), de manera que la sección se asimila a una forma cuadrangular. Esto puede visualizarse mejor en las siguientes imágenes, que representan la vista en planta y perfil del estuario.

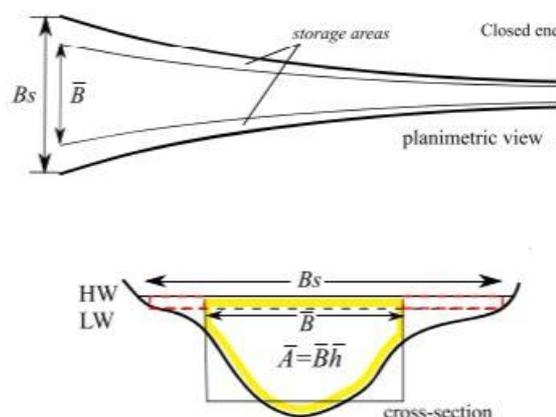


Figura 3.1 Vista en planta (arriba) y perfil (abajo) del estuario del Guadiana.

Así pues, puede añadirse una ecuación adicional a las dos anteriores, que se muestra a continuación.

$$h(x) = \frac{A(x)}{B(x)}$$

Para obtener finalmente la geometría del estuario, tan sólo resta determinar los coeficientes presentes en las funciones que la definen. Según Garel (2018), la profundidad a lo largo de los 78 kilómetros de estuario toma valores que oscilan entre los 4 y 8 metros, siendo 5,5 metros un valor medio aceptable para esta variable. Adicionalmente, introdujo los valores de las longitudes de convergencia, a y b, para las que pueden tomarse unos valores de 31 y 38 kilómetros, respectivamente. Por último, Garel y D'Alimonte (2017) obtuvo las dimensiones medias de la boca del estuario, siendo 700 metros el ancho de la misma y 3850 m² el área de su sección transversal. Sustituyendo parámetros en las ecuaciones anteriores resulta la siguiente estimación:

$$B(x) = 700 \exp\left(-\frac{x}{38}\right) = 700 \exp(-0.026x)$$

$$A(x) = 3850 \exp\left(-\frac{x}{31}\right) = 3850 \exp(-0.032x)$$

Nótese que para obtener el ancho en metros y la superficie en metros cuadrados debe introducirse la distancia al origen en kilómetros.

Para corroborar este ajuste se ha procedido a la medición, haciendo uso de la herramienta Google Earth Pro, cada 10 kilómetros del ancho del estuario desde la boca del mismo hasta su finalización, como se ha mencionado, situada 78 kilómetros aguas arriba de la desembocadura, a la altura de la población de Mértola.

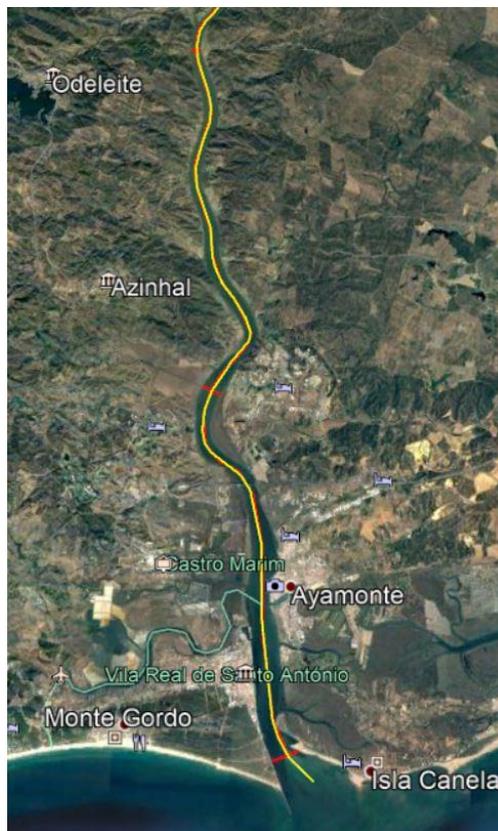


Figura 3.2 Detalle de la medición en la desembocadura del estuario

En la siguiente tabla se recogen los resultados de anchura obtenidos en la medición, a través de los cuales se ha determinado una superficie para la sección transversal suponiendo una profundidad constante de 5,5 metros. También se incluyen los resultados obtenidos mediante la sustitución de la distancia al origen en las expresiones anteriormente propuestas, así como la diferencia porcentual con respecto a los anteriores.

Tabla 1 Resumen del análisis geométrico del estuario

X(km)	B(m)			h(m)	A(m ²)		
	Exponencial	Real	Diferencia (%)		Exponencial	Real	Diferencia (%)
0	700.00	700	0.00	5.5	3850.00	3850	0.00
10	538.03	547	1.65	5.5	2788.47	3008.5	7.59
20	413.54	267	43.07	5.5	2019.63	1468.5	31.60
30	317.86	158	67.19	5.5	1462.77	869	50.93
40	244.31	176	32.51	5.5	1059.45	968	9.02
50	187.78	130	36.37	5.5	767.34	715	7.06
60	144.33	119	19.24	5.5	555.76	654.5	16.32
70	110.94	85	26.48	5.5	402.53	467.5	14.94

Pese a que pueden encontrarse diferencias de más del 50% en algunos casos, no se consideran discrepancias especialmente elevadas, teniendo en cuenta que la situación real del estuario presenta cambios de forma en planta, adquiriendo curvatura o modificando el ancho de la sección transversal, situación alejada de la divergencia constante que propone la función exponencial. Más aún, efectuando la regresión de los datos obtenidos a través de una función exponencial se obtienen curvas de ajuste muy similares a las propuestas por los autores citados, tal y como se muestra en los siguientes gráficos.

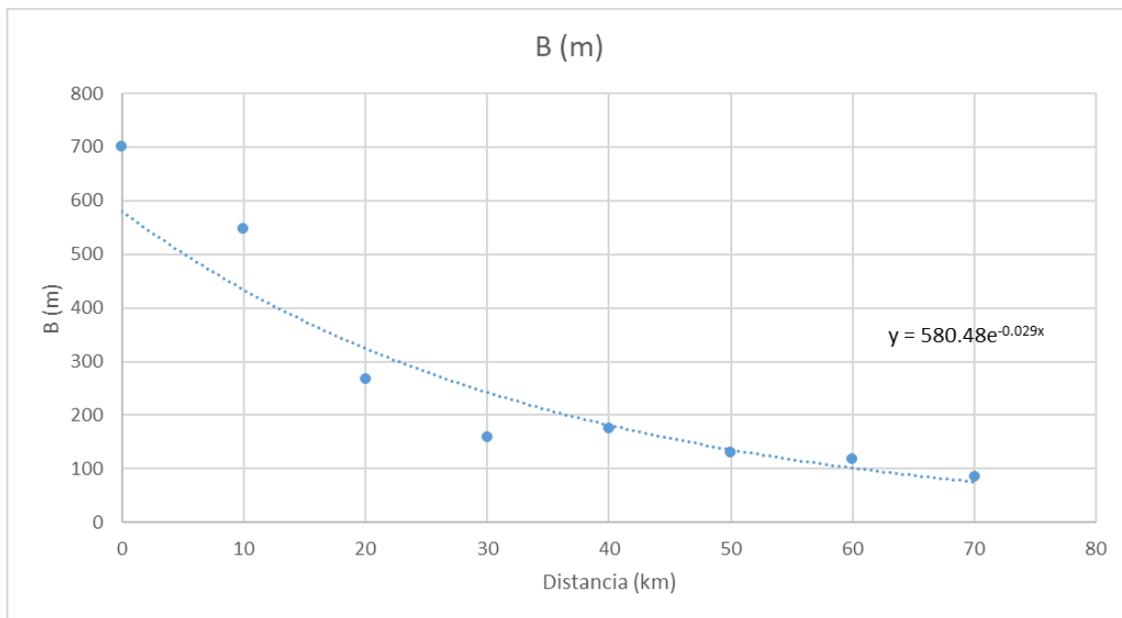


Figura 3.3 Interpolación de los datos de anchura mediante función exponencial

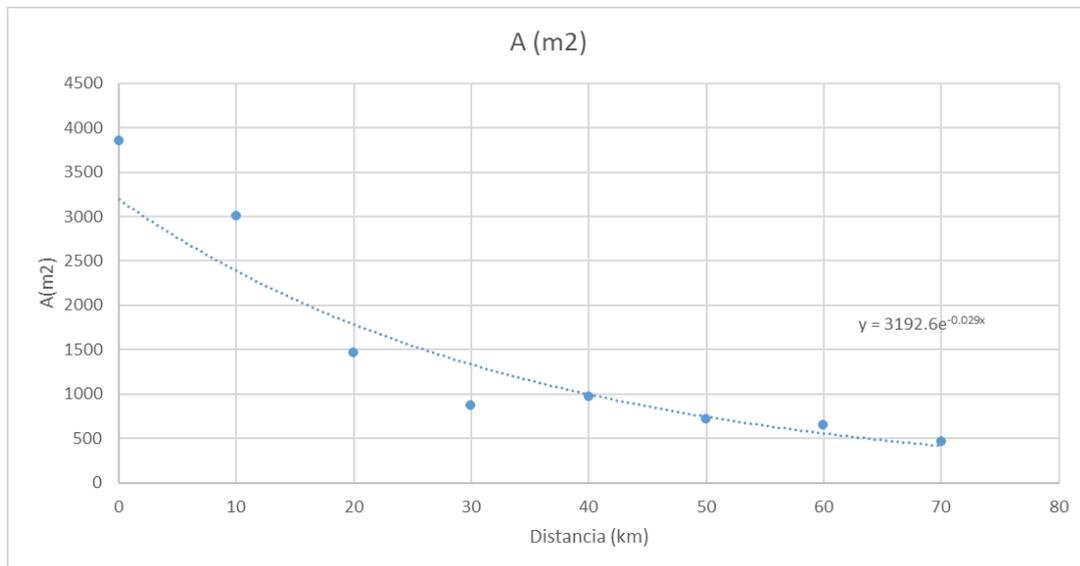


Figura 3.4 Interpolación de los datos de área mediante función exponencial

De las expresiones de estas curvas de ajuste puede deducirse el valor de las longitudes de convergencia, obteniéndose unos valores de 34,48 kilómetros para b , que supone una diferencia menor del 10% con respecto a la original (38 km), y de 34 kilómetros para a , con una diferencia porcentual del orden de la anterior respecto a la original (31 km).

Se asume pues, salvando las distancias frente a la geometría real, un buen ajuste de la estimación planteada.

3.2 Modelo numérico

La elaboración de un modelo numérico tiene como fin último resolver un sistema de ecuaciones en derivadas parciales en un dominio concreto. Para ello, es estrictamente necesario definir, en primer lugar, los límites que lo separan del resto del espacio y dividir su interior en un número de celdas determinado en el que resolver. Además, no es solo importante la discretización espacial, sino también la temporal y la forma en que se relacionan entre ellas.

Por otra parte, la solución determinada del sistema de ecuaciones en el dominio requiere de la definición de las condiciones iniciales en el mismo, además de una serie de restricciones en sus contornos, que serán de distinto tipo en función del tipo de forzamiento que se quiera imponer. Es igualmente importante definir correctamente los parámetros físicos y numéricos que intervienen, pues de su elección dependerá principalmente la validación del modelo como representativo de la situación real, por lo que estarán sujetos a un análisis de sensibilidad.

Una vez definida la malla del modelo e impuestas sus restricciones, resta únicamente definir los procesos que participarán en él, que en este caso serán la concentración de la sal y la descarga fluvial.

De todo lo anterior se deduce que el procedimiento de elaboración del modelo es el siguiente.

1. Definición de la malla. Análisis de sensibilidad.
2. Definición de la batimetría.
3. Imposición de las condiciones de contorno.
4. Establecimiento de las condiciones iniciales.
5. Análisis de sensibilidad sobre los parámetros físicos y numéricos.
6. Introducción de los procesos específicos de la simulación.

3.2.1 Descripción

El módulo Delft3D-FLOW es el encargado de proporcionar la base hidrodinámica al resto de los módulos del programa. Simula el flujo y el transporte en aguas someras obtenidos del forzamiento meteorológico y/o mareas teniendo en cuenta los siguientes procesos:

- Efecto Coriolis por la rotación de la Tierra.
- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de mareas en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

A través de este módulo se obtienen multitud de parámetros de interés en el análisis, tanto algunos más simples (nivel de agua, campo de velocidades, densidad, salinidad) como otros de mayor complejidad (número de Richardson).

Para abordar el análisis, Delft resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible bajo la hipótesis de aguas someras (Ecuaciones de Shallow-Waters) y las hipótesis de Boussinesq (Deltares, 2016). A continuación, se presenta una breve descripción de las ecuaciones de profundidad promediada que gobiernan el modelo hidrodinámico, si bien un mayor detalle puede encontrarse en (Lesser, 2004).

La ecuación de continuidad, despreciando los efectos de la precipitación y de la evaporación, es la siguiente.

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

donde \bar{u} y \bar{v} son las velocidades en profundidades promediadas en las direcciones x e y ($m s^{-1}$) respectivamente; h la profundidad (m) y ξ el nivel de la superficie libre (m).

Las ecuaciones de momento horizontal en profundidad promediada, 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 se escriben de la forma:

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

donde g es la aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$), v la velocidad de turbulencia ($m^2 s^{-1}$) y C el coeficiente de Chézy ($m^{1/2} s^{-1}$). El coeficiente de Chézy se define como:

$$C = 18 \log 12h/k_s$$

donde k_s es la rugosidad de la escala longitudinal Nikuradse (Cistina Aguilar Correa, 2016).

En cuanto al transporte de sustancias conservativas, dentro de las cuales se encuentra la sal, el modelo emplea la siguiente ecuación de advección-difusión en tres direcciones. Dicha expresión incluye términos asociados a sumideros y fuentes, con el fin de poder simular descargas y desagües en el modelo.

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(d + \zeta)c}{\delta t} + \frac{\delta[(d + \zeta)uc]}{\delta x} + \frac{\delta[(d + \zeta)vc]}{\delta y} + \frac{\delta\omega c}{\delta \sigma} \\ & = (d + \zeta) \cdot \left(\frac{\delta}{\delta x} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta y} \right) \right) + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\delta}{\delta \sigma} \left(D_V \frac{\delta c}{\delta \sigma} \right) - \lambda_d(d + \zeta)c + S \end{aligned}$$

Donde d representa la profundidad, ζ 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.

Como puede observarse, en los términos advectivos aparece la concentración de la sustancia multiplicada por el nivel y la velocidad. Por ello, previo a la extracción de resultados puede predecirse que, en los momentos en los que aparezcan variaciones mayores en la velocidad y el nivel (variaciones semidiurnas), también serán mayores las variaciones registradas en cuanto salinidad.

Por último, en lo que respecta al análisis de la estratificación, el modelo es capaz calcular uno de los parámetros clave definidos anteriormente: el número de Richardson. En este caso, el coeficiente se define como el resultado de la interacción de las fuerzas gravitacionales y turbulentas, dada por:

$$Ri = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)}$$

3.2.2 Implementación en la zona de estudio

3.2.2.1 Mallado

La implementación del modelo numérico en la zona de estudio comienza por la definición del dominio, que incluye tanto sus contornos exteriores como la subdivisión interna en un número determinado de celdas, componiendo así la malla de cálculo.

Para la generación de dicha malla se ha optado por emplear una de las herramientas que ofrece el propio programa de cálculo, que consiste en subdividir cada una de las regiones internas que surgen de la intersección de una serie de contornos o “splines”.

Los dos primeros contornos a modelizar serán los asociados a los márgenes del estuario. Dado que se conoce la formulación matemática de la geometría de los mismos, para la que se han empleado finalmente los parámetros extraídos de la bibliografía, se procede a la generación de dos listados de puntos (vectores en Matlab) que recojan el valor de la ordenada de ambos márgenes cada cien metros.

Paralelamente se definirán secciones rectilíneas (para lo que únicamente se necesitan dos puntos) perpendiculares al eje del estuario y separadas 2 kilómetros entre sí, exceptuando las localizadas en la plataforma costera, de 6,5 kilómetros de longitud, en la que se ubica una única sección que dista 1,5 kilómetros de la boca del estuario, con el fin de coseguir una mejor resolución en esta parte del dominio, en la que se analizarán principalmente los fenómenos asociados a la marea.

El dominio queda finalmente cerrado a través de dos contornos rectos y paralelos al eje, separados entre sí una distancia igual a $4B_0$ y equidistantes del eje.

Posteriormente se almacenan estos datos en un archivo .spl dispuestos de tal forma que puedan ser leídos por el programa y se cargan como Attribute File en el módulo RFGRID de Delft, obteniendo el resultado que se muestra a continuación.

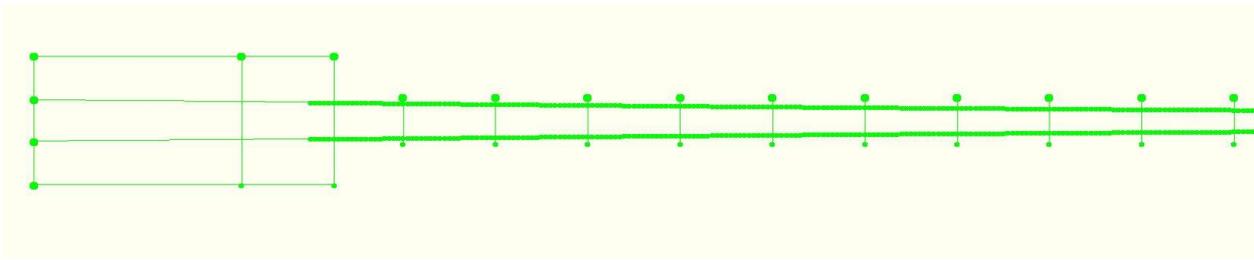


Figura 3.5 Imagen ampliada de los splines que conforman el dominio

Llegados a este punto debe tomarse una de las decisiones más importantes en cuanto a lo que a definición del dominio se refiere, y es elegir la resolución de la malla que verifique un equilibrio entre precisión en los resultados y tiempo de computación. Para abordar esta tarea se proponen tres tamaños de malla distintos:

1. Subdivisión de cada región en 27x27 celdas.
2. Subdivisión de cada región en 21x21 celdas.
3. Subdivisión de la región en 15x15 celdas.

Nótese que independientemente de la opción escogida, la resolución es mayor en las regiones cuyos contornos se encuentran más próximos entre sí dado que al ser el número de celdas el mismo, cada una de ellas es de menor tamaño.

Para elegir el tamaño definitivo de la malla de entre los tres propuestos se procede a la simulación 2D de tres escenarios, idénticos entre sí salvo por la malla empleada, y a la comparación de los resultados obtenidos. Este aspecto se ampliará en el apartado de análisis de sensibilidad de esta memoria, del que se concluye la elección de la tercera malla propuesta que, ventajosamente, resulta ser la de menor tamaño y, por tanto, la de mayor ahorro de tiempo en cada simulación.

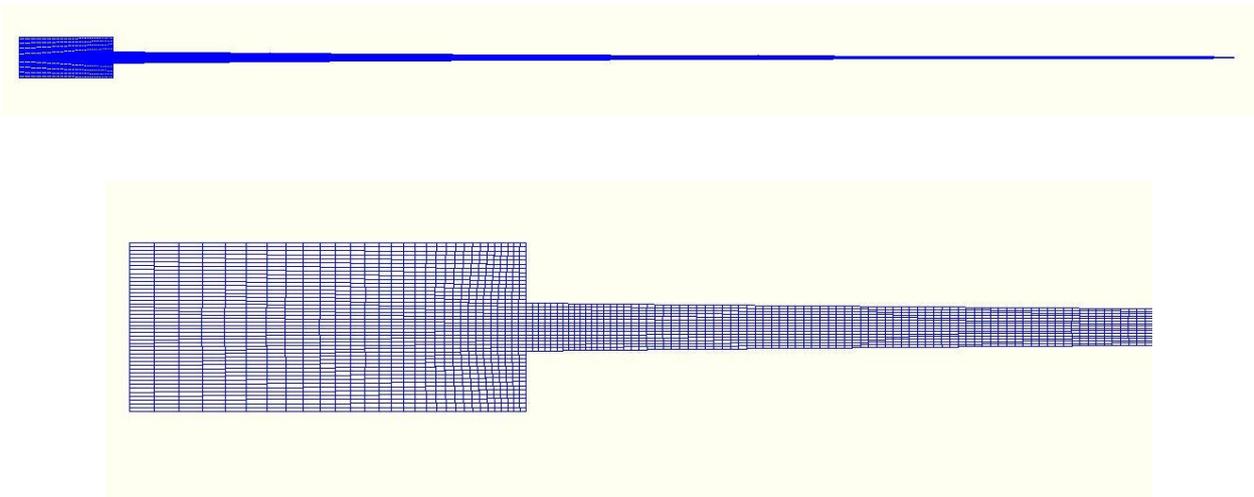


Figura 3.6 Malla definitiva del modelo. Planta general (arriba) y ampliación de la misma (abajo)

3.2.2.2 Batimetría

La generación de la batimetría del estuario se lleva a cabo a través de Matlab una vez que se ha terminado de definir la malla, de forma que ésta pueda ser incorporada al script mediante el empleo de la función “wlggrid”.

Para modelizar la batimetría se distinguen dos partes en el dominio. En lo que respecta a la zona del cauce, se parte de la premisa de que la profundidad del fondo es constante en todas las secciones e igual a 5,5 metros. No obstante, esta profundidad no es igual en todos los puntos de la sección y, de forma aproximativa, puede

considerarse que se distribuye siguiendo una función normal. Por esta razón, se ha optado por fraccionar a partes iguales el eje de la sección transversal en un número elevado de divisiones (5000) y aplicar en ellas una distribución normal de parámetros ajustados en búsqueda de un resultado razonable. Para el resto de puntos comprendidos entre los anteriores y siempre dentro de los límites que marca la malla en cada sección, se ha interpolado linealmente para obtener el valor de la profundidad. De esta forma se consigue definir una superficie telescópica en la que la profundidad en cada una de las secciones se distribuye según una normal.

La segunda de las partes que conforman el dominio es la correspondiente a la desembocadura. En esta zona debe considerarse la transición del cauce al fondo marino a través del talud de la plataforma continental, para el que se ha considerado una pendiente del 5%. La envolvente superior de la intersección entre la superficie del cauce y el plano del talud determinan la batimetría en esta zona.

Una vez que se han definido dichas superficies se procede a la creación del archivo .dep a incorporar en Delft, para lo que se hace uso de la función “wldep”.

A continuación, se muestran una serie de imágenes que permiten visualizar el resultado del proceso anterior.

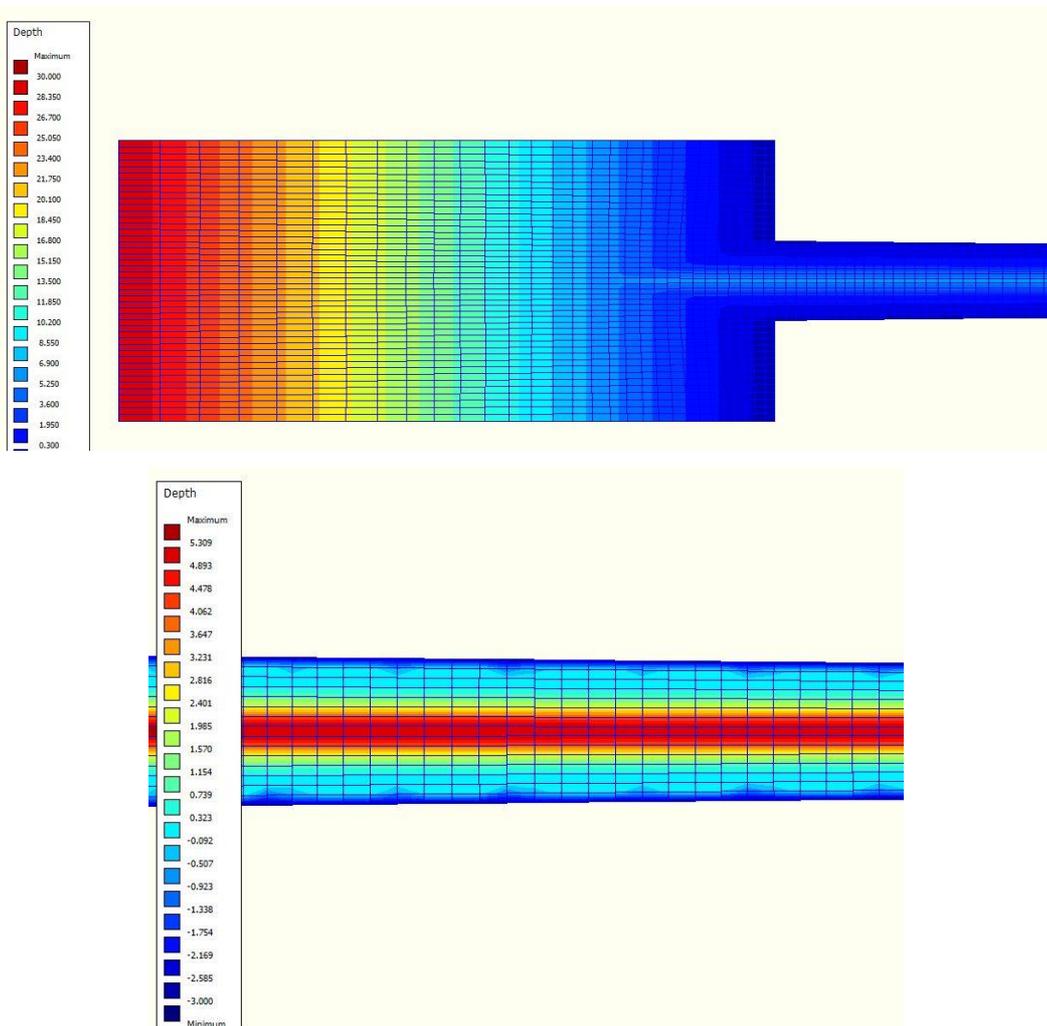


Figura 3.7 Batimetría del estuario. Entorno litoral (arriba) y entorno fluvial (abajo)

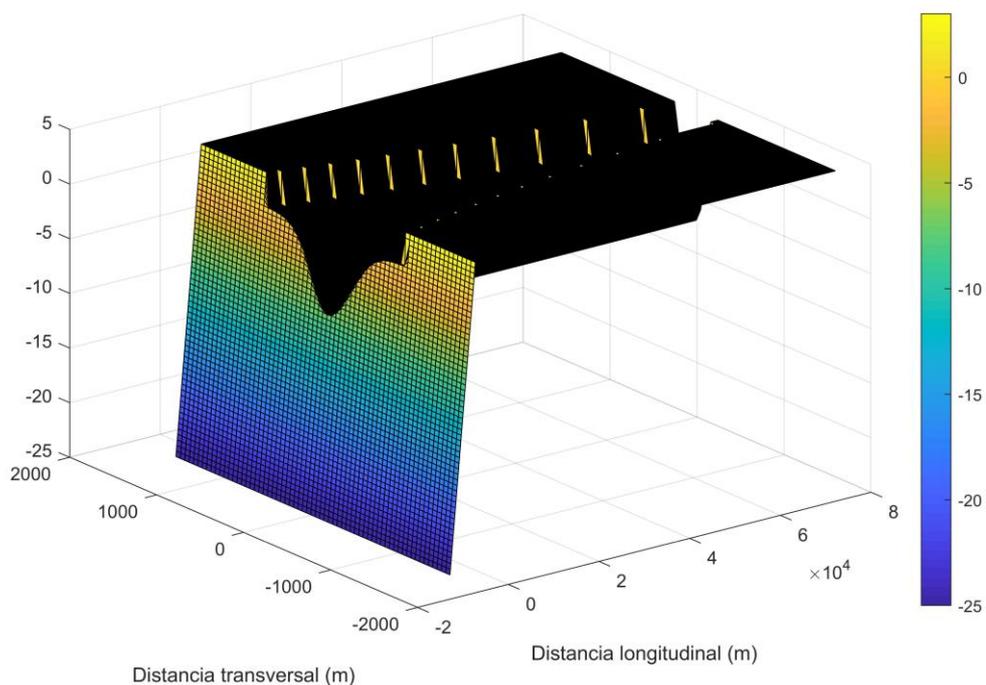


Figura 3.8 Superficie global (telescópica) del estuario

3.2.2.3 Condiciones de contorno

Una vez definidas la malla y batimetría del modelo se procede a establecer las condiciones iniciales y de contorno. En cuanto a las del segundo tipo, se han introducido las que se describen a continuación.

En el contorno litoral exterior, entendiéndose por éste el más septentrional del dominio, se ha introducido un forzamiento de marea astronómica representado por los principales armónicos de la zona, que a su vez son fruto de un análisis de frecuencia realizado a partir de los datos recogidos por el mareógrafo de la Estación de Cacela.

En la siguiente tabla se recogen los armónicos más representativos de la desembocadura del río Guadiana, de los que se incluye su amplitud y su fase.

Tabla 2 Armónicos de marea

Armónico	Amplitud (m)	Fase (º)
MM	0.0231	244.14
MSF	0.0106	176.85
Q1	0.0206	260.92
O1	0.0583	304.54
P1	0.0225	26.42
K1	0.0719	48.43
N2	0.2326	36.86
M2	1.0024	55.76
S2	0.3656	77.64
K2	0.0958	76.12
MN4	0.0095	105.25
M4	0.0176	159.21
MS4	0.0097	236.90

En cuanto a las condiciones de transporte (salinidad) se establece una concentración constante de 36 psu a lo largo de toda la simulación, valor que se corresponde con la concentración de sal del agua del mar. Se considera además un perfil de distribución uniforme.

En los contornos litorales perpendiculares a la alineación media de la costa se ha impuesto una condición de contorno tipo Neumann, de manera que quedan anulados los gradientes en la dirección paralela a las líneas batimétricas. Así, el nivel de agua será diferente según la sección de la que se trate, pero será el mismo en todos los puntos de una misma sección. En cuanto a las condiciones de transporte, se utilizan las mismas que en el caso anterior.

La última condición de contorno es la situada en el contorno fluvial, que marca el final del estuario. Pese a que el programa de cálculo ofrece la posibilidad de incluir la descarga fluvial como una condición de contorno, las pruebas realizadas sobre el modelo reflejan una mayor estabilidad cuando ésta se incluye como una descarga externa en las celdas que constituyen el contorno. Por ello, se introduce una condición de contorno tipo water level a cota cero, es decir, la lámina de agua es horizontal y está situada 5,5 metros por encima del fondo. En este caso, se considera que la intrusión nunca alcanza la parte alta del estuario, por lo que se impone una concentración de sal nula durante todo el tiempo de simulación.

3.2.2.4 Condiciones iniciales

Los resultados obtenidos a través de un modelo numérico dependen en gran medida de las condiciones iniciales en el mismo.

Por ello, su definición parte del análisis de un modelo 3D intermedio, en el que se ha simulado un amplio periodo de tiempo (4 meses) con una descarga fluvial de 50 m³/s, que se corresponde con la existente tras la construcción de la presa de Alqueva.

El objetivo de esta simulación es poder observar la evolución de la cuña salina y localizar las posiciones de equilibrio entre las que oscila en función del régimen de la marea, de tal forma que se utilicen en cada capa del modelo definitivo las concentraciones de sal obtenidas en cada capa del modelo de prueba para el instante en el que la cuña se encuentra en su posición media de equilibrio.

Tras la ejecución de dicho modelo se observa un comportamiento ascendente continuo de la intrusión, hasta el punto que podría afirmarse que no se produce la salinización total del estuario debido a la condición impuesta en el contorno en el que se introduce la descarga. Este fenómeno puede justificarse debido a la elección de la geometría, cuya forma juega siempre un papel favorable para el flujo de agua salada, dado que se han eliminado todos los elementos que distorsionan y provocan su paulatina disipación.

No obstante, dicha condición inicial se empleará para todas las simulaciones definidas en el apartado 3.3 de esta memoria por lo que, a igualdad de condiciones entre todas ellas, pueden establecerse comparaciones cuantitativas.

Así pues, el modelo se inicia con la superficie de la lámina de agua en horizontal, con velocidad nula (en las dos direcciones del plano) en los puntos que constituyen cada una de las 7 capas (con un reparto de espesor del 5% en las capas superior e inferior y un 18% en las intermedias) en las que se divide el espacio y con una concentración de sal en cada punto igual a la de la posición media de la cuña.

3.2.2.5 Parámetros de cálculo

En este apartado se concretan cada uno de los valores adoptados para los parámetros físicos que intervienen en la formulación del modelo. La elección de estos coeficientes es fruto de un análisis de sensibilidad, que se describirá en detalle en el siguiente apartado, por lo que en éste el texto se limita a reflejar los valores escogidos.

En cuanto a la rugosidad, ésta se representa a través del coeficiente de Manning, que toma un valor de 0,06 en ambas direcciones del plano. En consonancia con las hipótesis bajo las cuales se formula el estuario idealizado, este coeficiente es constante en todo momento.

Debe puntualizarse que el valor de rugosidad escogido es fruto del citado análisis de estabilidad, de forma que

su utilización permite obtener una intrusión que se ajusta en mayor medida a los límites normales observados en el estuario, si bien se trata de un coeficiente de elevada fricción (cauces con mucha vegetación, rocas, etc.), anormalmente alto teniendo en cuenta las características de la zona de estudio. Esto deberá tenerse en cuenta en el análisis de resultados.

Como constantes hidrodinámicas se incorporan el valor de la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), la densidad del agua dulce (1000 kg/m^3) y la temperatura del agua, para la que se mantiene el valor por defecto de 15°C .

Sin duda, los parámetros más relevantes cuando se trabaja con concentraciones de sustancias disueltas en el agua son la viscosidad y difusividad de la misma. Estas variables marcan la velocidad con la que se propaga un determinado componente en el medio, así como la concentración que alcanza.

El coeficiente de difusión, por su parte, representa la facilidad con la que una determinada sustancia (soluto) se mueve en el interior de otra (disolvente). Concretamente, cuanto mayor es este parámetro, mayor es la velocidad con la que se difunde dicha sustancia.

Esto supone que para un mismo volumen de agua (disolvente del problema en cuestión) un coeficiente de difusión bajo implica que la sal tardará más en llegar a todos los puntos del fluido, pero las concentraciones se mantendrán en valores mayores durante más tiempo (se diluye con más dificultad). Por el contrario, un coeficiente de difusión alto implica una rápida difusión de la sal en el fluido; el compuesto se propaga con mayor rapidez, pero las concentraciones que llegarán serán menores.

Paralelamente, la difusión en un medio viscoso se produce con una mayor dificultad frente a la que tendría lugar en un medio de mayor fluidez.

Estos parámetros son clave en la definición del modelo, dado que las condiciones de propagación en el medio influyen directamente sobre el alcance de la sal en el estuario y su concentración, y la finalidad del proyecto reside principalmente en determinar la posición de la intrusión salina, que se define precisamente como un límite de concentración.

Como se mostrará más adelante, los valores escogidos son $40 \text{ m}^2/\text{s}$ para la viscosidad y difusividad horizontal, $0 \text{ m}^2/\text{s}$ para la viscosidad y difusividad vertical, y 0 para la longitud en la escala de Ozmidov.

Por último, pese a que no constituye un parámetro físico, sino más bien uno numérico, es importante considerar la elección del intervalo de tiempo de cálculo en la simulación. En este sentido, no debe olvidarse que la relación entre la discretización espacial y temporal del dominio no puede ser cualquiera, sino que viene impuesta por lo que se conoce como condición de estabilidad de Courant, que puede representarse matemáticamente por la siguiente expresión.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{|v \pm c|}$$

Donde Δt es el intervalo de tiempo, Δx representa el tamaño de celda y v y c son, respectivamente, la velocidad y celeridad de la onda.

La experiencia demuestra que valores del número de Courant por debajo de 10 mantienen la estabilidad en la resolución de las ecuaciones. Por ello, se ajusta el intervalo de tiempo hasta que el valor del número de Courant quede por debajo de este límite, lo cual puede realizarse fácilmente en la interfaz “Quickin” de Delft, llegándose a la elección de 1,5 segundos.

3.2.2.6 Puntos de control

Por último, en vistas a realizar un mejor análisis de los resultados, se disponen puntos de control (observation points) a lo largo del eje del estuario, separados entre sí una distancia de 1 kilómetro. Adicionalmente, se coloca una sección de control ubicada en la abertura del estuario, con el fin de facilitar el cálculo del prisma de marea, que será necesario para evaluar la estratificación en el estuario a través del número de Richardson.

3.2.3 Análisis de sensibilidad

Tal y como se adelantó en el apartado anterior, la calibración del modelo comprende dos fases. En primer lugar, la selección del tamaño óptimo de malla que permita obtener resultados con suficiente precisión y sin abusar del tiempo de computación. Por otra parte, la selección de los parámetros físicos que consigan reflejar las condiciones hidrodinámicas reales del estuario.

3.2.3.1 Elección de la malla de cálculo

Para llevar a cabo el proceso de selección del tamaño de malla de entre los tres propuestos (3x3x3, 3x7 y 3x5) se han efectuado tres simulaciones en 2D (cada una con un tamaño de malla distinto) que permitan visualizar la hidrodinámica del estuario de forma individual y comparar sus diferencias. Las características principales de estos modelos son las que se muestran a continuación.

- Dos días de duración, del 22 al 24 de febrero.
- Modelo de batimetría descrito en el apartado 3.2.2.2.
- Intervalo de tiempo: 0,05 minutos.
- Condición inicial de water level cero en todos los puntos.
- No se considera la presencia de sal.
- Condiciones de contorno descritas en el apartado 3.2.2.3, salvo la correspondiente al contorno fluvial, para el que se introduce una condición de descarga de 500 m³/s.
- Factor de Manning 0.02. Viscosidad horizontal 1 m²/s.
- Cinco puntos de control, cercanos a la desembocadura del río, que se utilizarán como referencias en la comparativa de resultados.

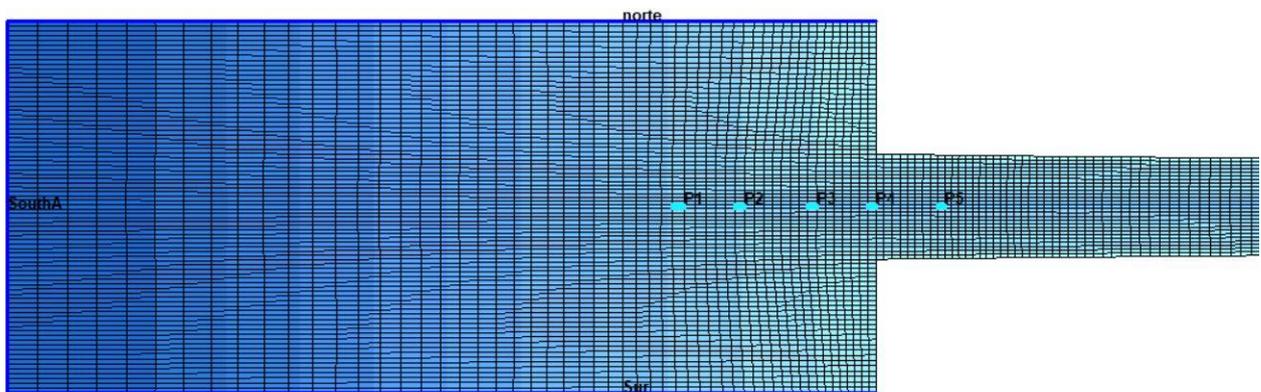


Figura 3.9 Puntos de control en el análisis de sensibilidad de la malla

Como puede apreciarse, algunos de los parámetros introducidos no se corresponden con los descritos en el apartado anterior. Esto se debe a que el análisis del tamaño de malla es previo al de selección de parámetros físicos y posteriores mejoras. No obstante, el interés de estas simulaciones no reside en los resultados en sí mismos sino en su comparativa por lo que a igualdad de condiciones, estos parámetros son válidos para el objetivo que se persigue.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos para la evolución temporal del nivel y la velocidad en los puntos de control antes mencionados. Como puede observarse, tras un breve intervalo de tiempo en el que existe ruido numérico, la hidrodinámica experimenta el comportamiento esperado: tanto el nivel como la velocidad en los 5 puntos experimentan un movimiento oscilatorio propio de la dinámica litoral en la que prácticamente se encuentran, alcanzándose los valores máximos en pleamar y los mínimos en

bajamar, que distan entre sus consecutivos el tiempo correspondiente al periodo intramareal (12,42 horas). A su vez, la pendiente de la velocidad es positiva en llenante y negativa en vaciante.

A simple vista puede observarse que los resultados son prácticamente idénticos en los tres casos, difiriendo levemente la velocidad en el punto 1.

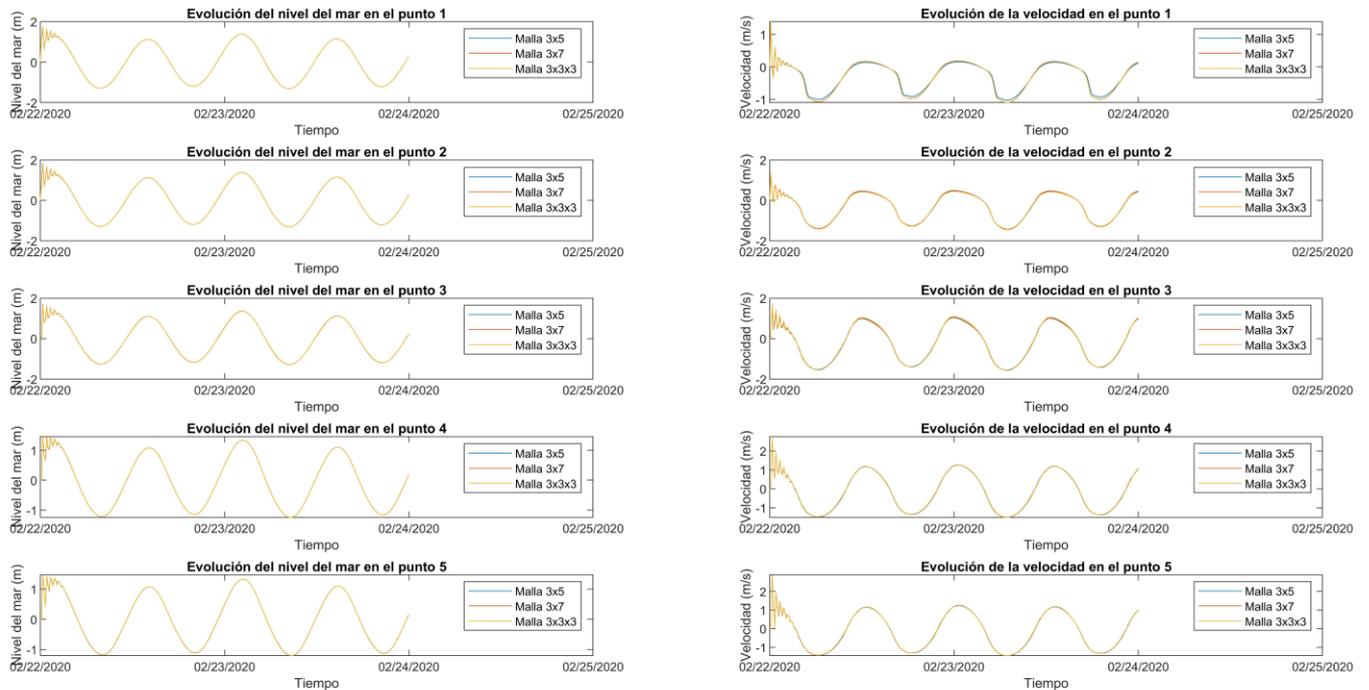


Figura 3.10 Comparativa de nivel y velocidad en el análisis de sensibilidad de la malla

No obstante, tal y como se ha mencionado, la importancia de estas simulaciones no reside en el resultado concreto sino en su comparación, por lo que se procede al cálculo de la diferencia porcentual de niveles y velocidades entre mallas en cada uno de los puntos de control, obteniéndose los siguientes resultados.

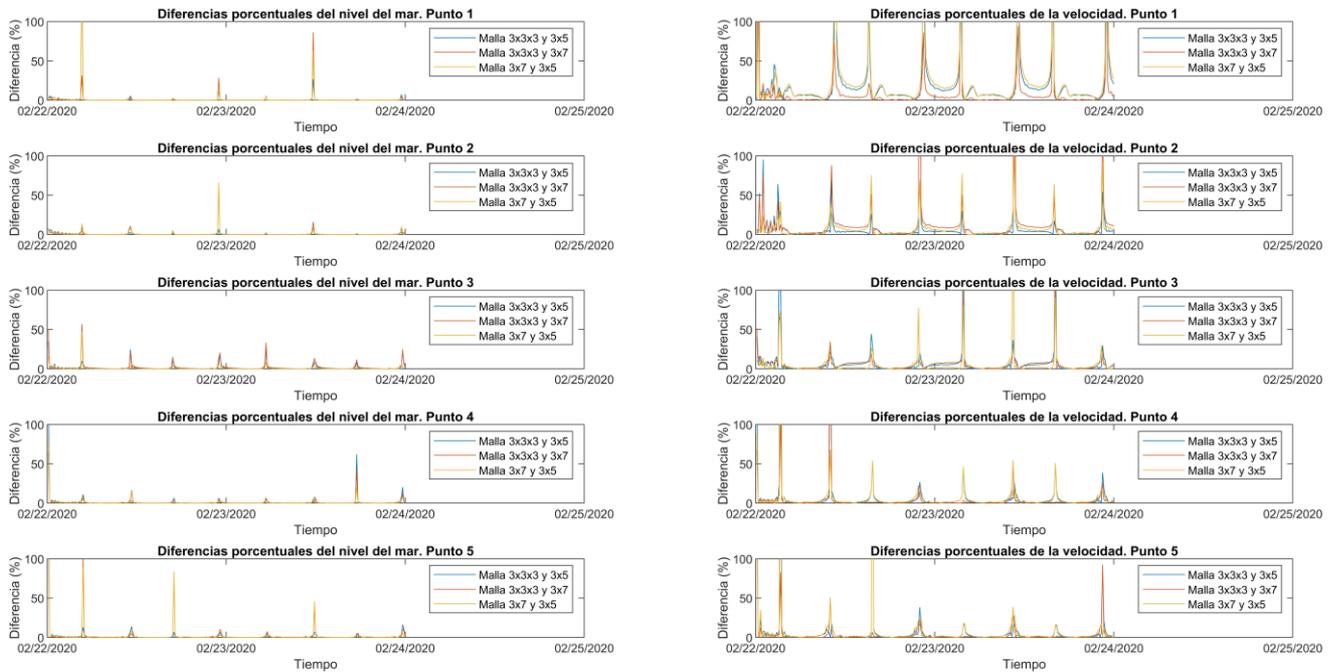


Figura 3.11 Diferencias porcentuales entre los resultados del análisis de sensibilidad de la malla

En vistas a lo anterior, se aprecian diferencias porcentuales de nivel (columna de la izquierda) prácticamente nulas entre todas las mallas y en todos los puntos, alcanzándose valores elevados únicamente en los instantes en los que el nivel pasa por el eje de abscisas, lo cual se debe a dividir por un valor cercano a cero.

De la misma forma, las diferencias entre los valores de velocidad son prácticamente inapreciables, aunque algo mayores si se comparan con las del nivel. Esto se aprecia especialmente en el punto más adentrado en el mar (punto 1), en el que se llegan a alcanzar diferencias del orden del 25%. No obstante, se observa un comportamiento decreciente de la variación conforme nos desplazamos hacia aguas arriba en el estuario, siendo elevados los valores únicamente en el paso de la velocidad por cero.

Se asume pues, que las variaciones que se producen en el modelo cambiando únicamente la resolución de la malla son muy poco significativas, por lo que se decide emplear la de mayor tamaño (3x5), optimizando el tiempo de cálculo en cada simulación que se realice.

3.2.3.2 Análisis de parámetros físicos

La segunda parte del análisis de sensibilidad del modelo consiste en ajustar el valor de los parámetros físicos. Éstos son, principalmente, seis:

- Coeficiente de rugosidad, representado por el factor de Manning.
- Coeficientes de difusividad y viscosidad horizontal. En el manual del usuario de Delft se indica que estos parámetros pueden tomar valores comprendidos entre 0 y 100 m²/s en el caso de la viscosidad y entre 0 y 1000 m²/s en el de difusividad, si bien es necesario efectuar sobre ellos un proceso de calibración. Adicionalmente, recomienda emplear valores comprendidos entre 1 y 10 cuando el tamaño de las mallas es de decenas de metros y entre 10 y 100 cuando el tamaño de las mallas es mayor. Siguiendo esta directriz, los coeficientes a tantear deberán formar parte del segundo intervalo.
- Coeficientes de difusividad y viscosidad vertical. A diferencia de los dos anteriores, la dependencia no es con el tamaño de la malla sino con el modelo de turbulencia. Siendo idénticos los límites entre los que se pueden encontrar los valores, el manual recomienda en este caso emplear valores de 10⁻⁶ m²/s, si bien en estuarios estratificados debe tomarse entre 10⁻⁴ y 10⁻³ m²/s.
- Longitud de escala de Ozmidov. En caso de no activarse este parámetro, como es el caso, se mantiene el valor de cero para este coeficiente.

Tras estas orientaciones se decide llevar a cabo el siguiente grupo de simulaciones con el fin de comparar el efecto que provoca la variación de cada uno de estos parámetros sobre la distribución de salinidad en el

estuario.

Tabla 3 Modelos para el análisis de sensibilidad de los parámetros físicos

Modelos	Coefficiente de fricción	Parámetros de difusividad y viscosidad horizontal (m ² /s)	Parámetros de difusividad y viscosidad vertical (m ² /s)
001	0.06	40	0
002, 003, 004	0.002, 0.004, 0.008	40	0
005, 006	0.006	10, 100	0
007, 008	0.006	40	10 ⁻⁶ , 10 ⁻³

Se establece como modelo de referencia el denominado “001”, en el que los parámetros coinciden con los de otros estudios realizados sobre este mismo estuario. El segundo grupo de modelos tiene como objetivo valorar el efecto de la rugosidad del lecho, por lo que sufre variaciones en este parámetro y mantiene inalterados el resto. De la misma forma, el tercer grupo de simulaciones persigue cuantificar el efecto de la difusividad y viscosidad horizontal y, el cuarto, el de la difusividad y viscosidad vertical.

Con respecto al resto de argumentos de entrada, destaca la introducción de la tercera dimensión en el modelo, la presencia de salinidad y el establecimiento de la condición inicial mediante un archivo .ini, de manera que se distinguen inicialmente tres zonas: desde la boca del estuario hasta el límite litoral se establece una concentración salina de 36 psu, desde el kilómetro 50 hasta el límite aguas arriba la concentración es nula y en la zona intermedia se distribuye de forma lineal.

Al igual que ocurría en el análisis del tamaño de malla, esta condición inicial no coincide con la definitiva del modelo descrito en el apartado 3.2.2.4 pero, dado que no interesa el resultado sino su variación, a igualdad de condiciones entre las simulaciones las diferencias esperadas serán las mismas, por lo que se consideran válidas para analizar la sensibilidad de los parámetros.

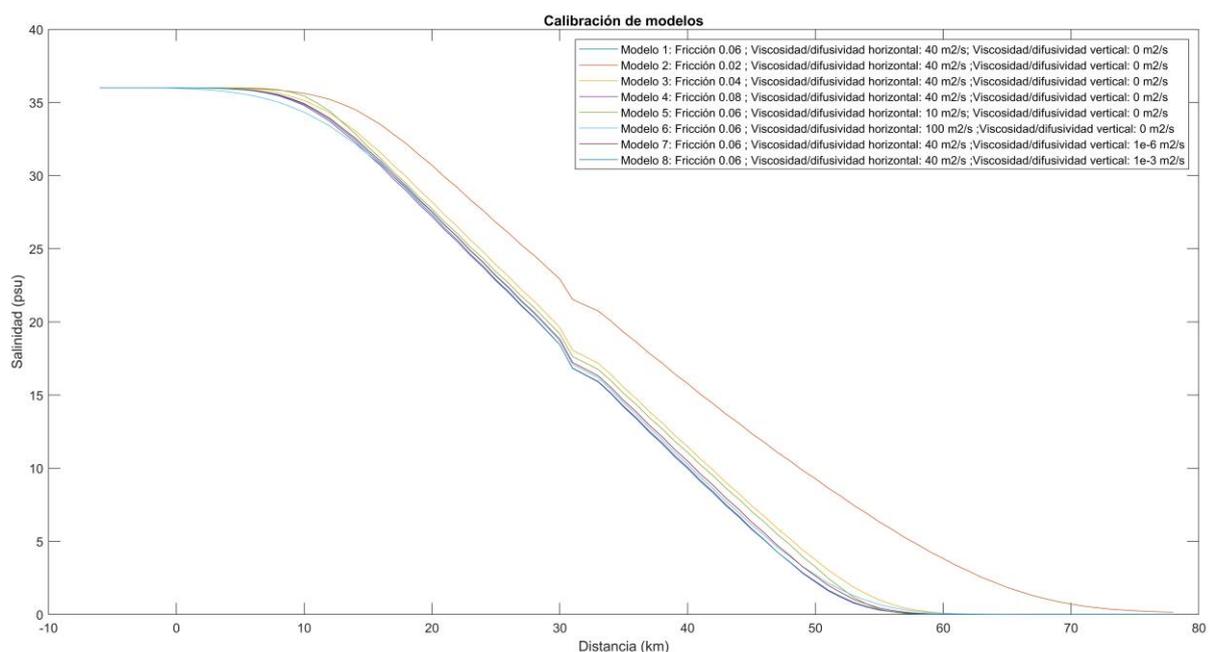


Figura 3.12 Distribución de salinidad en el eje del estuario para los modelos de calibración

Como puede observarse en la gráfica anterior, cuanto mayor es el coeficiente de fricción, menor es la intrusión que experimenta el estuario y la concentración que se alcanza en una determinada posición del eje del mismo. Esto se debe en gran medida a la disipación que proporciona la fricción sobre la onda de marea, que impide su avance y favorece el flujo de agua dulce procedente de la descarga.

Los coeficientes de difusividad y viscosidad tanto horizontal como vertical parecen mostrar, sin embargo, una menor influencia en el modelo (curvas prácticamente superpuestas en algunos casos), lo cual puede corroborarse en vistas a la siguiente gráfica, en la que se muestran las diferencias porcentuales de salinidad a lo largo del estuario para los modelos descritos anteriormente.

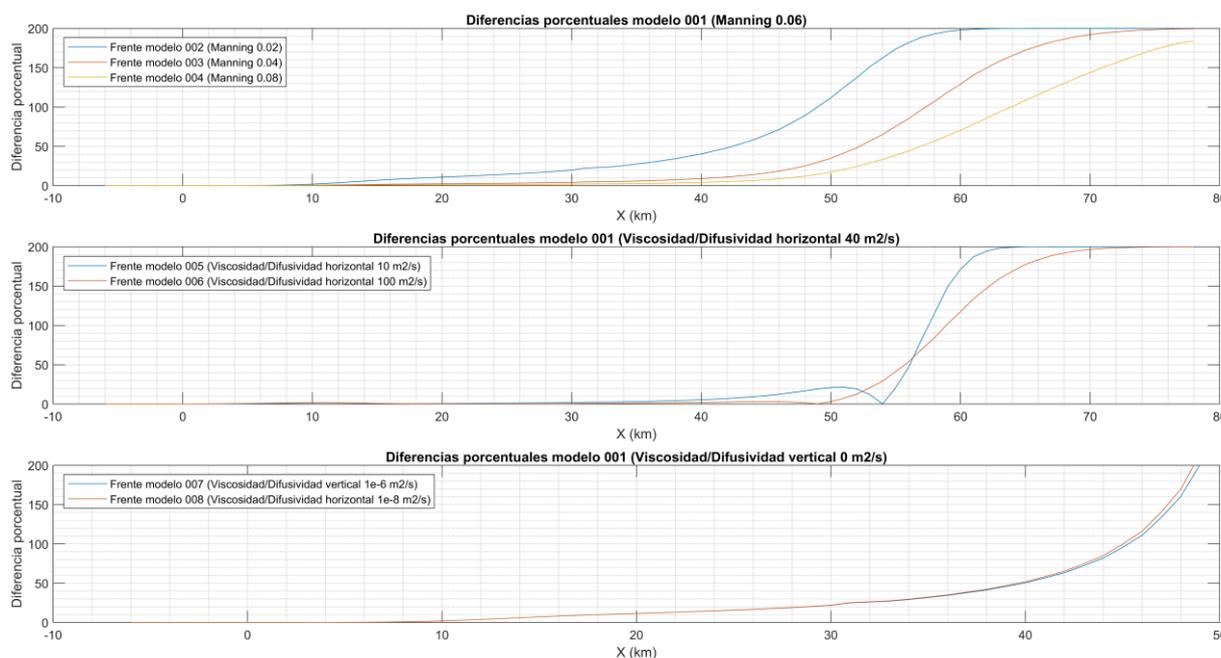


Figura 3.13 Diferencias porcentuales de salinidad entre modelos

La primera de las representaciones hace referencia a la comparación entre los modelos del primer grupo, en los que el parámetro variante es la fricción. En ella se observan variaciones inferiores al 10% en la parte baja del estuario, las cuales se llegan a incrementar hasta en más del 100% en el entorno del kilómetro 50 si se compara con una rugosidad tres veces más pequeña y en un 40% si la fricción se reduce a la mitad.

Se trata indudablemente del parámetro de mayor influencia en el modelo, teniendo en cuenta que las variaciones porcentuales de los modelos de comparación de parámetros difusivos (representaciones segunda y tercera) alcanzan valores elevados únicamente en la parte alta del estuario, en la que el aumento exponencial de la curva se justifica al estar dividiendo por un valor de concentración salina prácticamente nula.

3.3 Definición de simulaciones

En este apartado se procede a definir y describir brevemente las simulaciones realizadas sobre el modelo finalmente construido, que permitirán obtener conclusiones acerca de la influencia de la descarga fluvial sobre la distribución salina en el estuario.

Concretamente, se abordarán dos estudios distintos. En primer lugar, se analizará la influencia de la construcción de la presa de Alqueva sobre la intrusión y estratificación en el estuario en régimen ordinario.

Por otra parte, se estudiará la respuesta del sistema actual (tras la construcción de la presa) en régimen extremal ante avenidas de distinto periodo de retorno, lo cual se traduce en la aplicación de una serie de hidrogramas en la cabeza del estuario.

La generación de dichos hidrogramas se realiza mediante el método de transformación lluvia-caudal basado en el hidrograma adimensional SCS, en el cual se expresan los caudales en función del caudal pico y los tiempos en función del tiempo de pico.

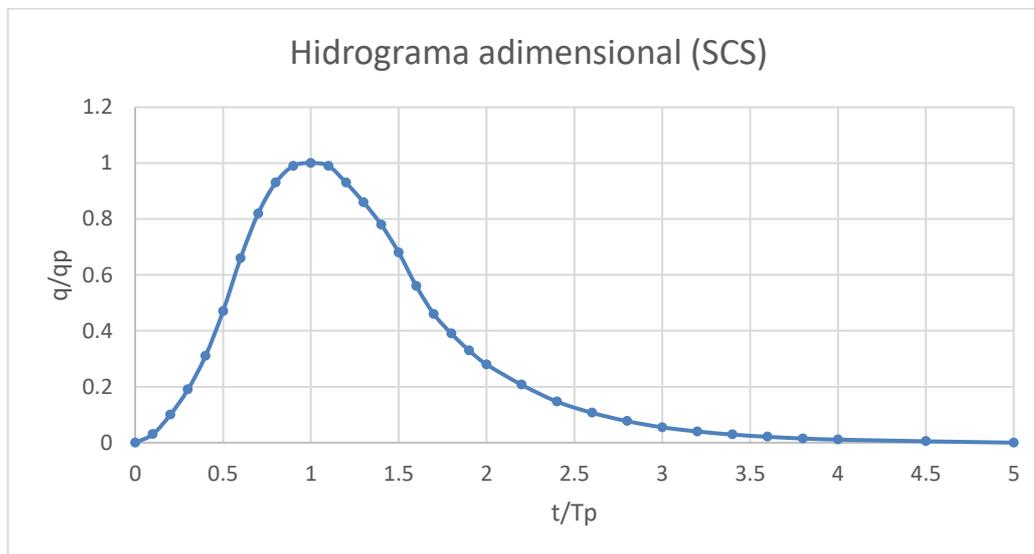


Figura 3.14. Hidrograma adimensional SCS.

Calculando ambos parámetros y aplicándolos, respectivamente, a los ejes de ordenadas y abcisas se obtiene el hidrograma de caudal asociado a un cierto periodo de retorno. En este caso, se han empleado caudales punta (Q_p) de 500, 1000 y 2500 m³/s y un tiempo pico en cada hidrograma que responde a la siguiente expresión, obtenida de forma experimental. En el caso de que el resultado de la fracción fuera inferior a dos días, se considerará este umbral para determinar el tiempo de pico (López-Ruiz et al., 2020).

$$T_p = 0.2 \cdot \frac{Q_p - 1307}{179.5}$$

Cabe comentar que la duración obtenida mediante el producto del eje de abcisas del hidrograma adimensional y el tiempo de pico corresponde a la duración estricta del hidrograma, si bien en las simulaciones se ha añadido un tiempo de dos días previo al inicio del hidrograma y de quince días posterior al fin del mismo. Esto persigue fundamentalmente dos objetivos. El primero, que el ruido numérico inicial del modelo no afecte a la descarga y, el segundo, poder determinar el tiempo de resalinización, entendiéndolo por el mismo tiempo que debe transcurrir desde la punta del hidrograma para que el estuario recupere las condiciones iniciales asociadas a su caudal base.

3.3.1 Simulación de las condiciones previas a la construcción de la Presa de Alqueva

Esta primera simulación se caracteriza principalmente por tener asociada una descarga constante de 150 m³/s, valor que se corresponde con el caudal medio normal existente en el río Guadiana antes de la construcción de la presa de Alqueva, ubicación que a día de hoy marca el límite del estuario.

Con el fin de poder analizar la variabilidad de la intrusión asociada a mareas vivas y muertas, se elabora una simulación de tres meses de duración, desde el 29/02/2020 hasta el 29/05/2020.

En la siguiente figura se muestra la evolución del nivel del mar en la desembocadura del estuario durante el tiempo de simulación. Como puede observarse, el registro comienza durante el transcurso de una marea muerta, tras la que se recogen varios ciclos completos de marea (seis de marea viva y seis de marea muerta, aproximadamente). La mayor amplitud de nivel tiene lugar durante la primera marea viva, en la que se

alcanzan valores de 1.7 metros en pleamar y de -1.1 en bajamar.

Considerando el caso opuesto, los niveles mínimos ocurren durante el transcurso de la tercera marea muerta, con niveles que oscilan con una amplitud de 0.6 metros respecto al nivel medio del mar. La mayor desigualdad diurna observable es de 0.25 metros.

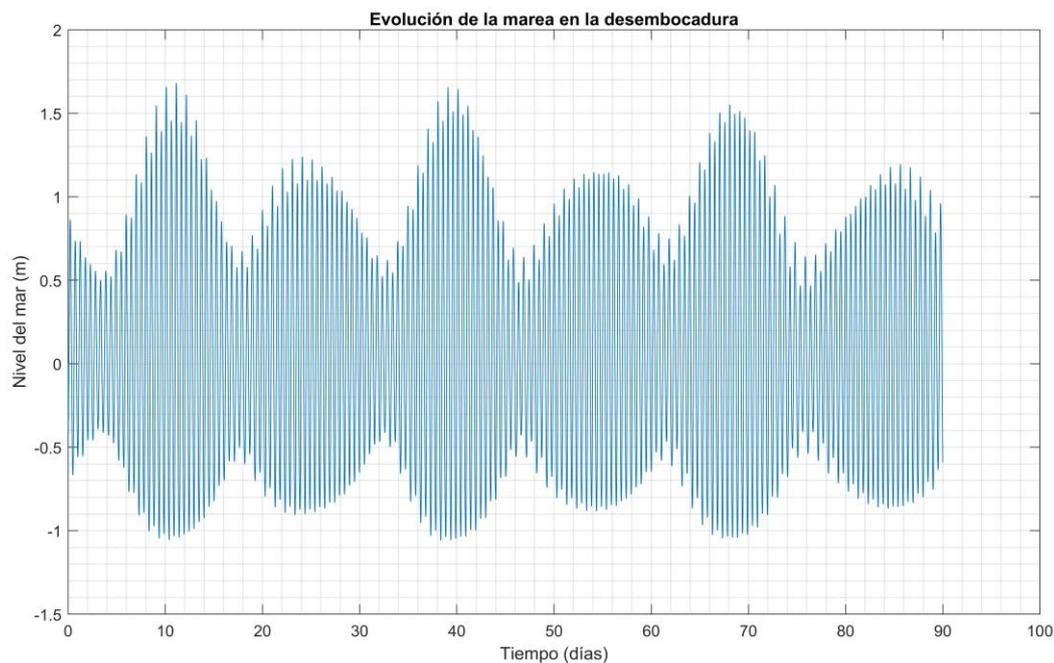


Figura 3.15 Evolución del nivel del mar ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.3.2 Simulación de las condiciones posteriores a la construcción de la Presa de Alqueva

Se trata de la simulación central del estudio, pues es la que se empleará como base para realizar las comparativas con los hidrogramas en régimen extremal. En ella se introduce una descarga constante de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal que corresponde al valor de flujo de paso normal permitido por la presa de Alqueva.

Esta simulación es distinta a la empleada para obtener la condición inicial del modelo. Concretamente, es la misma sustituyendo la condición inicial primigenia por la finalmente obtenida para todos los modelos.

En este caso, se ha seleccionado una duración igual a la mayor de entre las correspondientes a las simulaciones de hidrogramas de avenida, siendo ésta la asociada a un caudal punta de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Así, el modelo se inicia el 29/02/2020 y finaliza el 23/03/2020 a las 15:30 horas, siendo la duración total exacta de 23 días, 15 horas y 30 minutos.

En la siguiente ilustración se muestra la evolución del nivel del mar durante este periodo de tiempo. Como puede observarse los resultados son análogos a los obtenidos anteriormente, por lo que la reducción de la descarga provocada por la presa parece no ser suficiente como para alterar la hidrodinámica en la desembocadura.

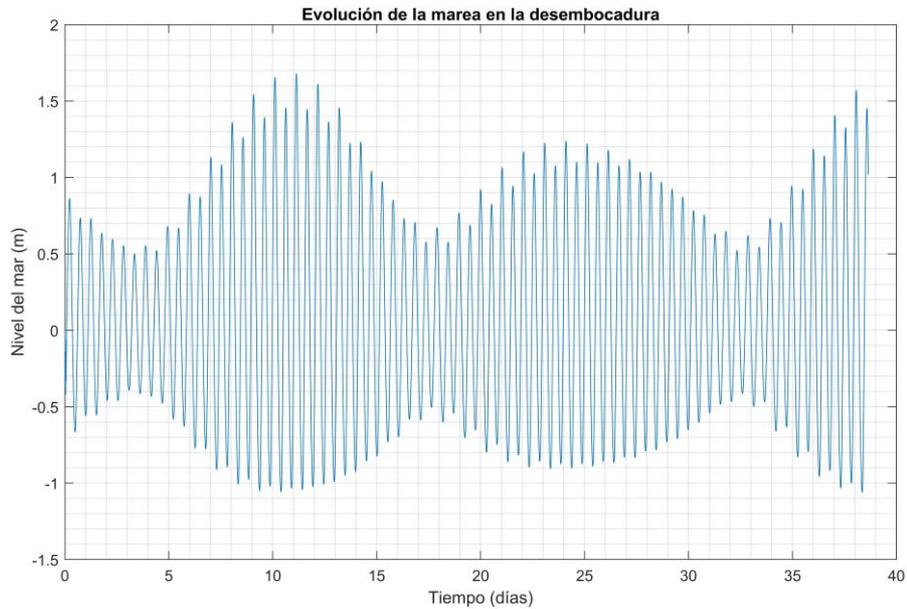


Figura 3.16 Evolución del nivel del mar ($Q= 50 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.3.3 Simulación en régimen extremal. Hidrograma de caudal punta de $500 \text{ m}^3/\text{s}$

La primera de las simulaciones en régimen extremal está caracterizada por un hidrograma cuyo caudal punta asciende a $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Su elaboración se realiza siguiendo el proceso descrito al inicio de este apartado, siendo el primer paso el cálculo del tiempo pico del hidrograma. Dado que la fracción obtenida a través de la fórmula experimental es inferior a dos días se opta por tomar este umbral, resultando un tiempo pico de 0.4 días.

El hidrograma obtenido a partir del adimensional, el caudal pico y el tiempo pico se alarga en el tiempo dos días antes del inicio y quince después del fin, siendo los valores de caudal en ambos instantes de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Los valores intermedios se obtienen por interpolación lineal.

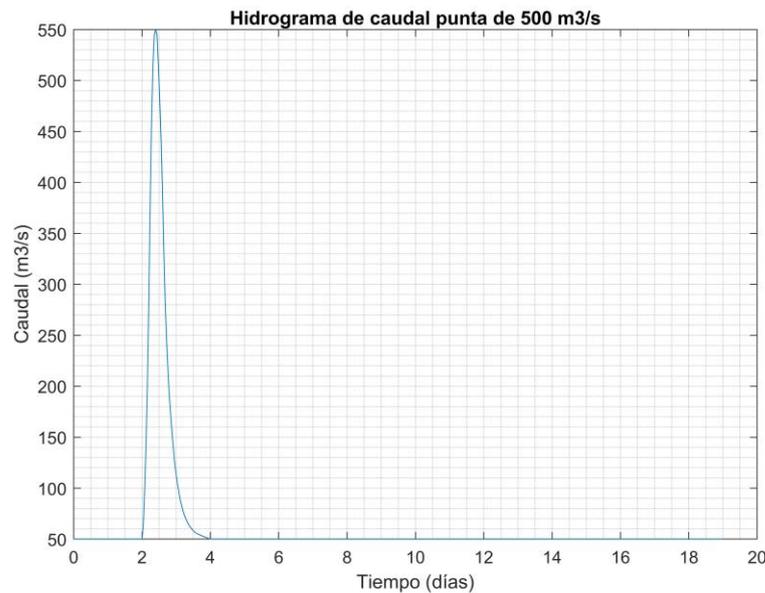


Figura 3.17 Hidrograma de caudal de punta $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa el pico en $550 \text{ m}^3/\text{s}$, dado que se trata de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ sobre el caudal base ($50 \text{ m}^3/\text{s}$).

La duración de la simulación se adapta a la del hidrograma, siendo ésta de 19 días. Comienza, al igual que el resto, el 29/02/2020 y finaliza el 19/03/2020.

En la siguiente ilustración se muestra la evolución del nivel del mar en la desembocadura durante el tiempo de simulación. Como puede observarse, la simulación comienza durante el transcurso de una marea muerta, alcanzándose un nivel mínimo de 0.5 metros tras 3.5 días. Posteriormente, el nivel asciende debido a la ocurrencia de una marea viva, llegando a un máximo de 1.7 metros sobre el nivel medio del mar. En los últimos instantes de la simulación puede verse el comienzo de una nueva marea muerta.

Por otra parte, se observa una amplitud de 0.9 metros en marea muerta y de 2.7 metros en marea viva. La desigualdad diurna (diferencia de nivel entre dos pleamares consecutivas) es aproximadamente de 0.05 metros en marea muerta y de 0.2 metros en marea viva.

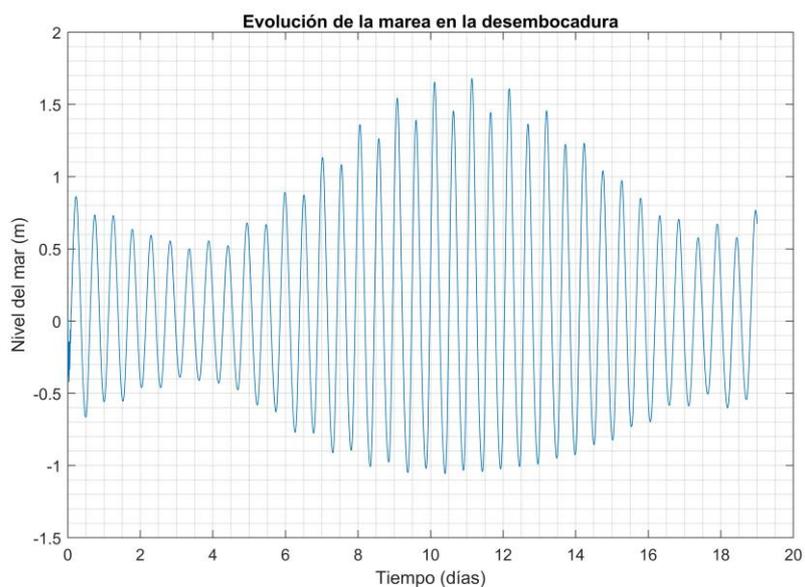


Figura 3.18 Evolución del nivel del mar ($Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$). .

En vistas a los resultados de velocidad en la desembocadura (dirección x), se concluye que la descarga no es suficiente como para anular el régimen de llenante (no hay inversión de velocidad). No obstante, si genera mayores velocidades (en módulo) en situación de vaciante que en llenante, siendo la diferencia aproximada entre ambas de 0,1 m/s.

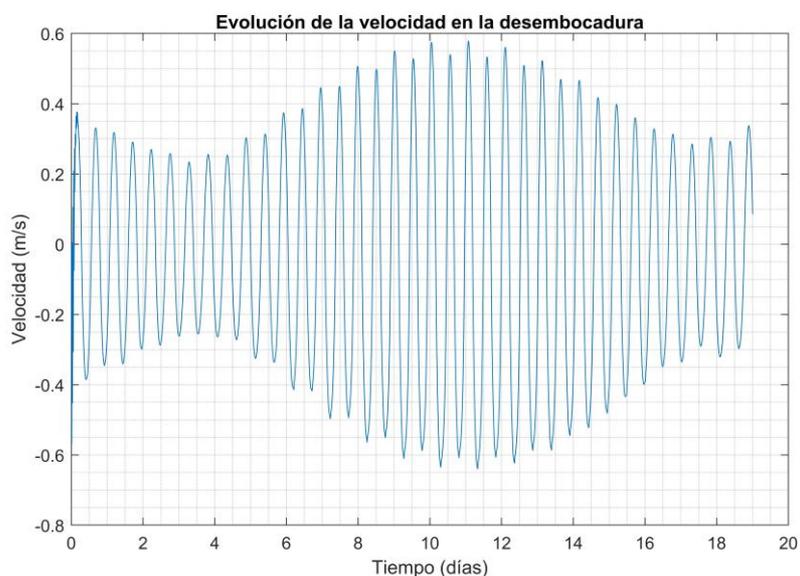


Figura 3.19 Velocidad en la desembocadura ($Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.3.4 Simulación en régimen extremal. Hidrograma de caudal punta de 1000 m³/s

La siguiente simulación en régimen extremal está caracterizada por un hidrograma cuyo caudal punta asciende a 1000 m³/s. Su elaboración se realiza, nuevamente, siguiendo el proceso descrito al inicio de este apartado, siendo el primer paso el cálculo del tiempo pico del hidrograma. Dado que la fracción obtenida a través de la fórmula experimental es inferior a dos días, se opta por tomar este umbral, resultando un tiempo pico de 0.4 días.

El hidrograma obtenido a partir del adimensional, el caudal pico y el tiempo pico se alarga en el tiempo dos días antes del inicio y quince después del fin, siendo los valores de caudal en ambos instantes de 50 m³/s. Los valores intermedios se obtienen por interpolación lineal.

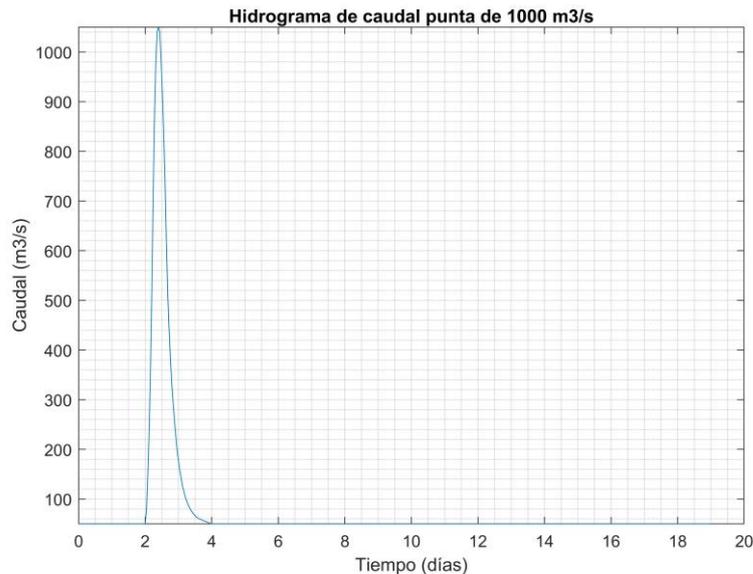


Figura 3.20 Hidrograma de caudal de punta 1000 m³/s. Se observa el pico en 1050 m³/s, dado que se trata de 1000 m³/s sobre el caudal base (50 m³/s).

La duración de la simulación coincide con la de la anterior, dado ambos hidrogramas presentan la misma duración. Por tanto, el análisis abarca desde el 29/02/2020 hasta el 19/03/2020.

En la siguiente ilustración se muestra la evolución del nivel del mar en la desembocadura. Como puede observarse, la simulación comienza durante el transcurso de una marea muerta, alcanzándose un nivel mínimo de 0.5 metros tras 3.5 días. Posteriormente, el nivel asciende debido a la ocurrencia de una marea viva, llegando a un máximo de 1.7 metros sobre el nivel medio del mar. En los últimos instantes de la simulación puede verse el comienzo de una nueva marea muerta.

Por otra parte, se observa una amplitud de 0.9 metros en marea muerta y de 2.7 metros en marea viva. La desigualdad diurna (diferencia de nivel entre dos pleamares consecutivas) es aproximadamente de 0.05 metros en marea muerta y de 0.2 metros en marea viva.

Puede apreciarse que los resultados son análogos a los obtenidos para la descarga de 500 m³/s. Esto demuestra que la descarga fluvial no tiene influencia en la desembocadura del estuario por lo que la hidrodinámica está gobernada por la marea astronómica.

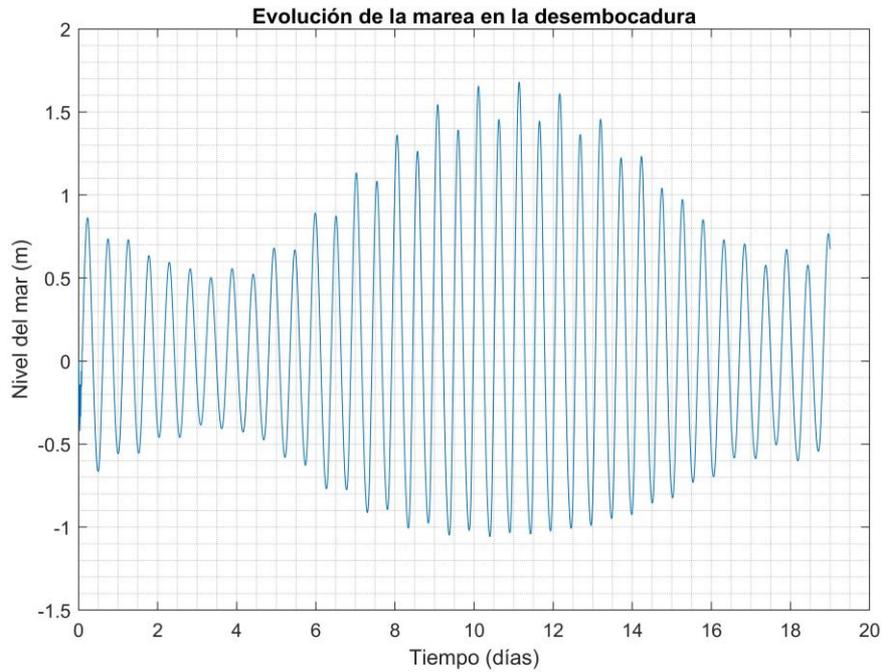


Figura 3.21 Evolución del nivel del mar ($Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

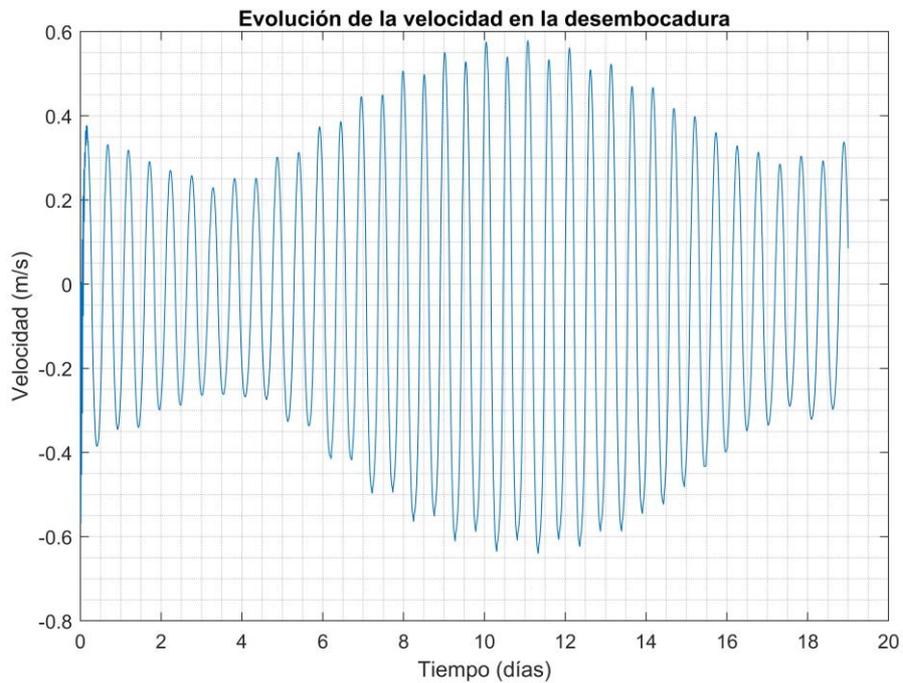


Figura 3.22 Velocidad en la desembocadura ($Q= 1000 \text{ m}^3/\text{s}$)

3.3.5 Simulación en regimen extremal. Hidrograma de caudal punta de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$

Se trata de la simulación de descarga de mayor envergadura, siendo el caudal punta del hidrograma $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. En este caso, la duración del hidrograma es de 6.64 días por lo que, añadiendo el tiempo previo y posterior al mismo, resulta una simulación de 23.64 días. Por tanto, se establece el comienzo en la misma fecha de referencia, 29/02/2020, y finaliza el 23/03/2020 a las 15:30 horas.

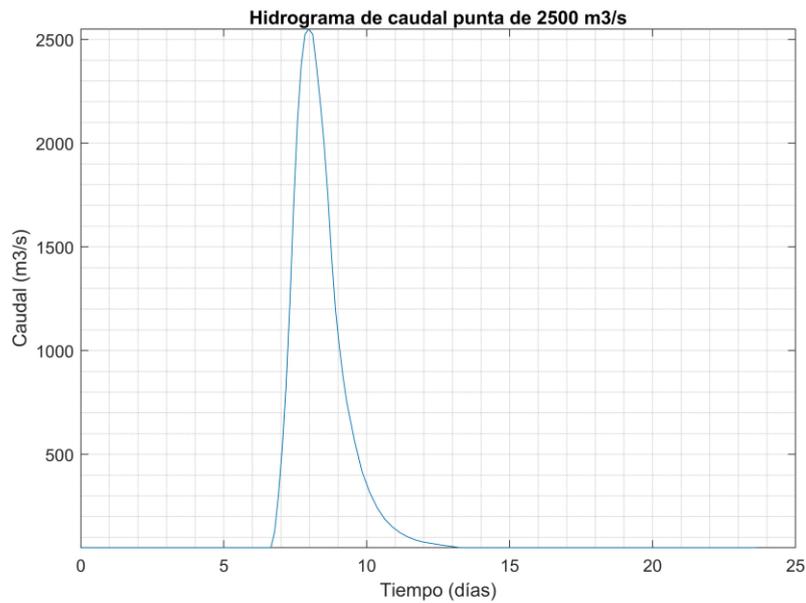


Figura 3.23 Hidrograma de caudal de punta 2500 m³/s. Se observa el pico en 2550 m³/s, dado que se trata de 2500 m³/s sobre el caudal base (50 m³/s).

En cuanto al análisis del nivel en la desembocadura, se observan en este caso dos mareas muertas y dos mareas vivas (la segunda incompleta). Cabe destacar que se alcanzan amplitudes máximas de 2.7 metros y mínimas de 0.9 metros. También se observan niveles de menor amplitud en bajamar durante la punta de la descarga del hidrograma.

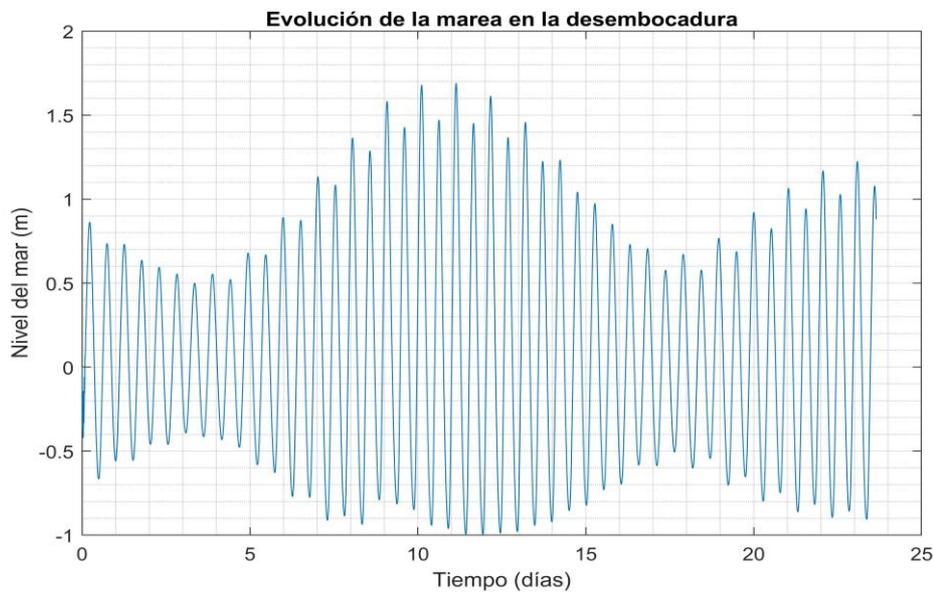


Figura 3.24 Evolución de la marea ($Q=2500 \text{ m}^3/\text{s}$).

En el caso de la velocidad en la desembocadura, se aprecia la influencia de la descarga en los instantes de mayor valor de caudal en el hidrograma (cercano al octavo día), que atenúa la velocidad en llenante y la incrementa en vaciante, llegándose a alcanzar valores de 0.7 m/s.

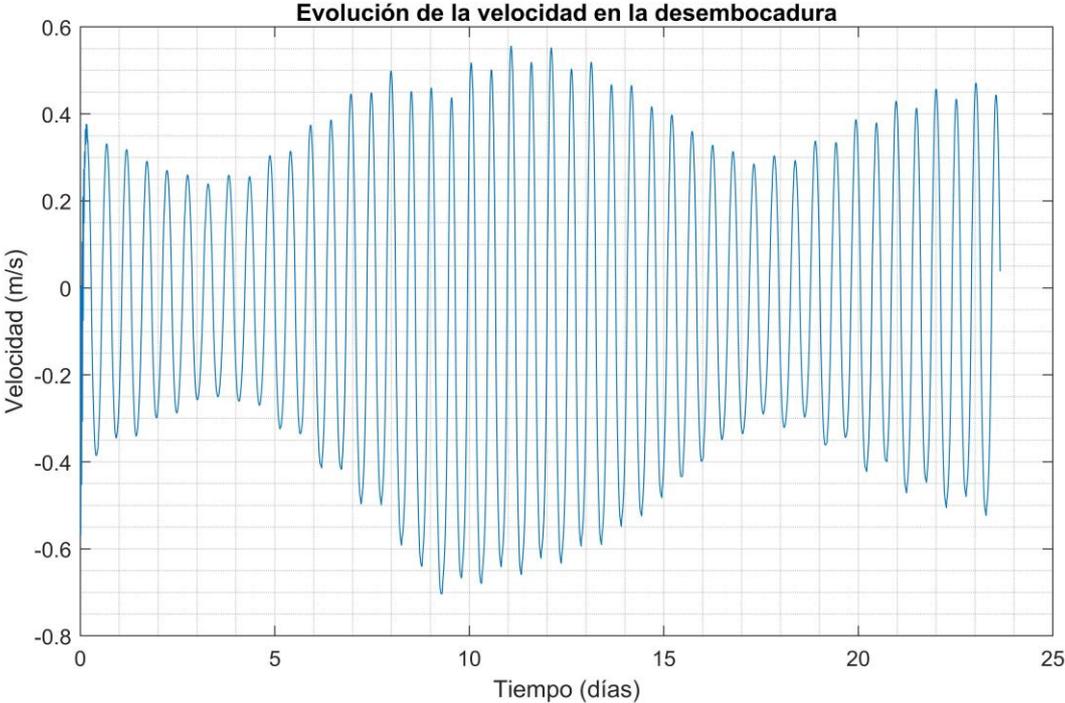


Figura 3.25 Velocidad en la desembocadura (Q=2500 m³/s).

4 RESULTADOS

En este apartado se recogen los resultados obtenidos de las simulaciones detalladas en el apartado anterior, así como su discusión e interpretación.

4.1 Condiciones medias. Influencia de la construcción de la Presa de Alqueva

En el año 2004 se construyó en el Alentejo (Portugal) la ya citada presa de Alqueva que, desde su construcción, ha permitido un aprovechamiento hidráulico para regadío y producción de energía.

La realización de esta obra ha supuesto una reducción de la descarga del río Guadiana en condiciones medias de 150 a 50 m³/s lo cual afecta a la distribución de la salinidad en el estuario en régimen ordinario.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la intrusión salina comparando respecto al nivel y la velocidad en la boca del estuario para ambas descargas. La duración corresponde a 20 días, por lo que se recoge una marea muerta, una marea viva y parte de la siguiente marea muerta.

Pese a que se ha comentado en apartados anteriores, se recuerda que se ha considerado la intrusión salina como la posición longitudinal en la que la concentración de sal es de 3.6 psu.

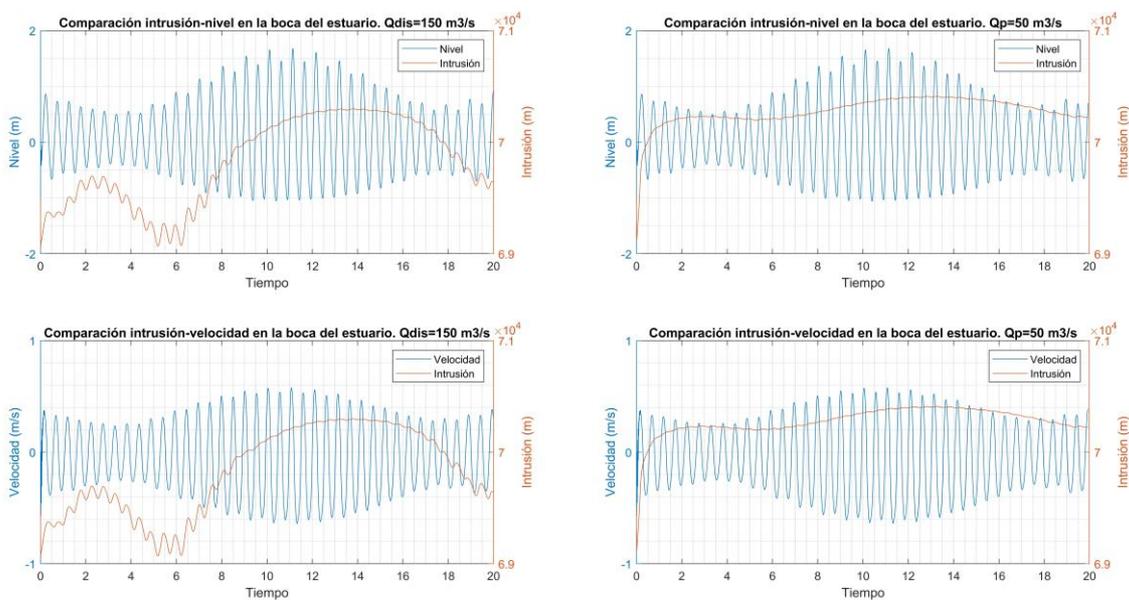


Figura 4.1 Comparación intrusión-nivel e intrusión velocidad en condiciones previas y posteriores a la Presa de Alqueva.

En primer lugar, se observa en ambos casos un carácter doblemente periódico en la oscilación de la intrusión, que se manifiesta debido a la doble periodicidad asociada a la marea, tanto a nivel intramareal (pleamares y bajamares, de 12.42 horas de periodo) como intermareal (mareas vivas y muertas, de 15 días de periodo).

Como puede verse, la variación semidiurna es más acentuada en el caso de la descarga mayor, especialmente durante el transcurso de la marea muerta; en el caso opuesto, la variación semidiurna es difícilmente perceptible. Esto puede ser fruto del elevado valor de fricción seleccionado durante la fase de análisis de estabilidad del modelo, que provoca que las variaciones de nivel y velocidad y, consecuentemente de la salinidad, aguas arriba sean muy reducidas.

Dado que la descarga fluvial en la condición de contorno es constante, es el comportamiento de la dinámica litoral el que gobierna el problema. De esta forma, se observan avances mayores del frente salino aguas arriba

en el estuario durante marea viva (cuando el nivel y la velocidad de la marea son mayores) y menores durante marea muerta (cuando el nivel y la velocidad de la marea son menores).

Teóricamente podría intuirse que la posición mínima de la cuña salina se produjese durante la mínima bajamar en marea muerta y, la posición máxima, durante la máxima pleamar en marea viva. No obstante, se observa que los valores pico no están verticalmente alineados sino que existe entre ellos una cierta diferencia de fase.

Para la descarga de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ se observa una diferencia de 1.75 días ($3T+3/4\pi$) entre la mínima bajamar y la mínima intrusión y de 2 días ($3T+4/5\pi$) entre la máxima pleamar y la máxima intrusión. Esto demuestra que llevando a cabo un registro a través de mareógrafos (el de Cacula, por ejemplo), se podrán predecir las posiciones límite de la cuña salina tan sólo conociendo los instantes en los que el nivel del mar es máximo o mínimo.

Comparando el efecto de ambas descargas, se observa en la siguiente figura un comportamiento también predecible. A igualdad de condiciones respecto al régimen litoral, la descarga de mayor envergadura, que supone una mayor entrada de agua dulce en el estuario, provoca una oscilación de la intrusión confinada entre posiciones del eje más cercanas a la desembocadura, lo cual se traduce en un retroceso del frente salino.

Concretamente, se han registrado para esta descarga posiciones que oscilan entre el kilómetro 69.069 y el 70.318 (referidos a la boca del estuario, a 7500 m del contorno aguas abajo del modelo), resultando una longitud total de transición de 1.249 kilómetros.

Por el contrario, la descarga correspondiente a la situación media actual del estuario ($50 \text{ m}^3/\text{s}$) supone una menor oposición al ascenso de la sal, por lo que la oscilación se produce en torno a posiciones más altas, concretamente, entre los kilómetros 70.196 y 70.410. Esto da como resultado una longitud de transición algo menor a 215 metros.

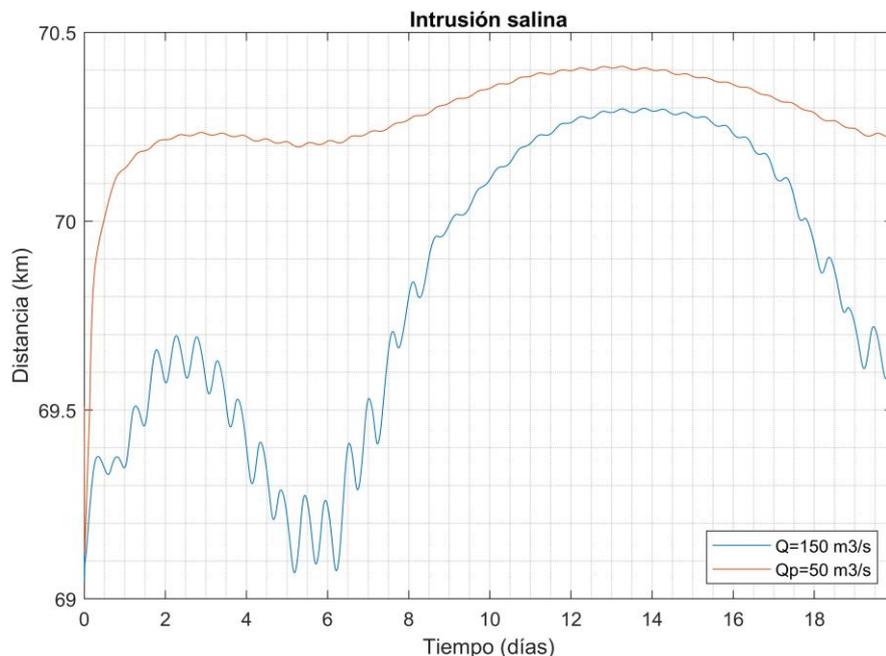


Figura 4.2 Comparación de la influencia de la presa sobre la intrusión salina.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la intrusión salina más allá de un ciclo de marea, observándose claramente el carácter doblemente periódico comentado anteriormente.

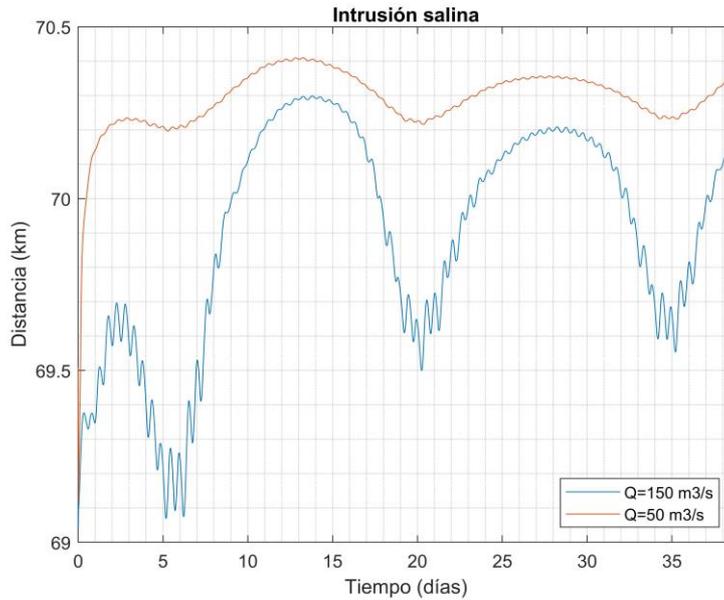


Figura 4.3 Evolución de la intrusión durante 3 ciclos de marea.

Se concluye por tanto que la construcción de la Presa de Alqueva y su consecuente reducción de la descarga fluvial ha provocado un avance en el frente salino, de manera que la intrusión oscila entre valores máximos y mínimos mayores, pero con una menor amplitud.

Por último, se aprecia que las descargas introducidas en el modelo provocan la salinización prácticamente completa del estuario. Esto se debe en gran medida a la geometría empleada en el análisis, que juega un papel favorable para el ascenso de la marea, dejando que la disipación de la onda tan solo puede producirse debido a la fricción con el cauce (se han anulado todo tipo de cambios de alineación en planta, etc.) y, aún habiendo seleccionado un coeficiente elevado, no se ha conseguido mantener la transición en torno a los valores habituales que ocurren en el estuario real.

En cuanto al análisis de la distribución salina, se representa en la siguiente figura la evolución de la concentración de sal a lo largo del eje del estuario en la capa intermedia, acompañada de la variación de nivel y velocidad. En el cuarto panel se refleja la comparativa entre salinidad en superficie, capa intermedia y fondo para una sección localizada en la parte alta del estuario (kilómetro 73).

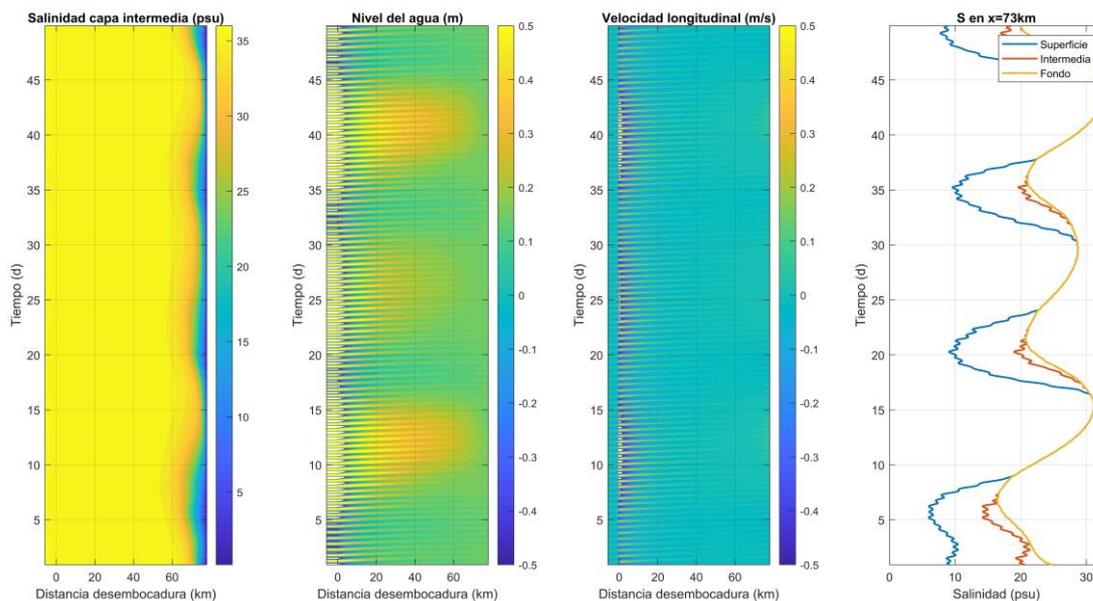


Figura 4.4 Distribución salina ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$).

Los resultados demuestran un comportamiento periódico de la concentración de sal cuya variación se localiza, dado el carácter reducido de la descarga, en la parte alta del estuario (a partir del kilómetro 60, aproximadamente). Puede observarse que, tras el paso de mareas vivas, (franja anaranjada en las gráficas de nivel y velocidad) la salinidad prácticamente alcanza su valor máximo (36 psu) a lo largo de todo el estuario. Por el contrario, mareas muertas permiten una mayor participación de la descarga fluvial, provocando un descenso en la concentración de sal que adquiere valores intermedios entre 0 y 30 psu, según la posición.

Analizando el resultado del cuarto panel se observa que, durante el transcurso de mareas vivas, la salinidad es la misma tanto en la capa superficial como en la intermedia y en el fondo (curvas superpuestas), es decir, la distribución en la sección transversal vendría dada por una recta vertical, estando la columna de agua bien mezclada. Justamente lo contrario ocurre en periodos de mareas muertas, en los que se observa una clara diferencia entre la concentración en la capa superior (de menor magnitud) y en el fondo (menos alterada), estando la columna de agua estratificada.

Dado que se está trabajando con una descarga constante, la justificación de la estratificación debe realizarse atendiendo al régimen de marea. Cuando se trata de una marea viva, el aumento de nivel y velocidad de la misma provoca una reducción en la influencia de la descarga (podría extrapolarse a que existe una descarga menor en el estuario) por lo que se reducen la turbulencia y agentes de mezcla, resultando un estuario de tipología verticalmente homogénea (no estratificado). Si, por el contrario, se analiza la ocurrencia de una marea muerta, puede afirmarse que se produce un aumento en la componente asociada a la descarga (extrapolable a una descarga mayor) por lo que se favorece la mezcla y se induce un perfil en la vertical correspondiente al de un estuario estratificado o parcialmente estratificado.

Este comportamiento puede cuantificarse haciendo uso de algunos de los parámetros definidos en el apartado 2.3, concretamente, a través del parámetro de estratificación (S_p) y el número de Richardson. Para este último, se ha empleado tanto el resultado proporcionado por el programa de cálculo como el que se obtendría haciendo uso de la ecuación propuesta por Savenije. Los resultados se muestran en la siguiente figura.

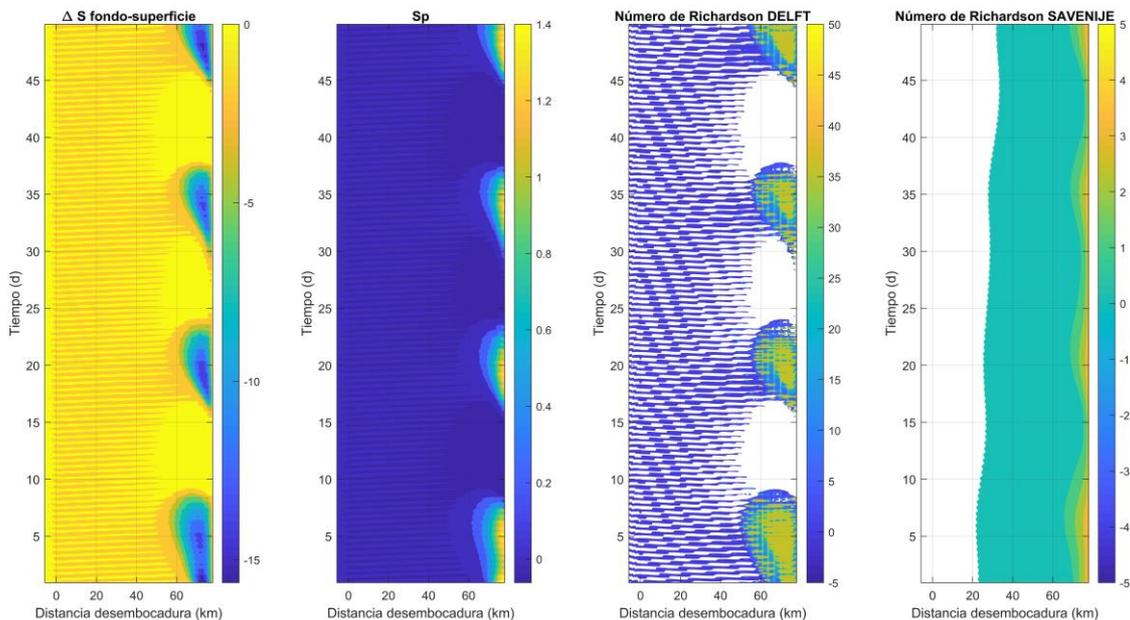


Figura 4.5 Estratificación ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$).

En consonancia con el razonamiento anterior, se observan valores pico del parámetro de estratificación en los periodos de marea muerta, dado que la diferencia entre superficie y fondo alcanza sus valores máximos. A través de este parámetro puede concluirse que se produce estratificación cuando los valores superan el 10%, lo

cual ocurre aproximadamente a partir del kilómetro 70 y únicamente ante la presencia de mareas muertas.

En estas mismas zonas se producen los valores pico del número de Richardson. Del valor proporcionado por el modelo de Delft puede concluirse que la estratificación se produce, es estable (coeficientes positivos) y su causa reside en la mezcla por turbulencia.

Respecto a los resultados procedentes de la expresión propuesta por Savenije (2012), la conclusión es exactamente la misma, dado que la estratificación se considera en el momento en que se registran valores comprendidos entre 0.1 y 0.8.

4.2 Análisis en régimen extremal ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$)

Los resultados expuestos en el apartado anterior revelan que cuanto mayor es la descarga fluvial, menores (más cercanos a la desembocadura) son los límites entre los que oscila la intrusión salina y mayor es la longitud afectada por la descarga (amplitud de oscilación).

En la siguiente figura se muestran los resultados de intrusión obtenidos para la descarga de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal punta junto con los correspondientes a la situación actual en el estuario, con el fin de analizar la influencia de la avenida sobre la distribución de salinad.

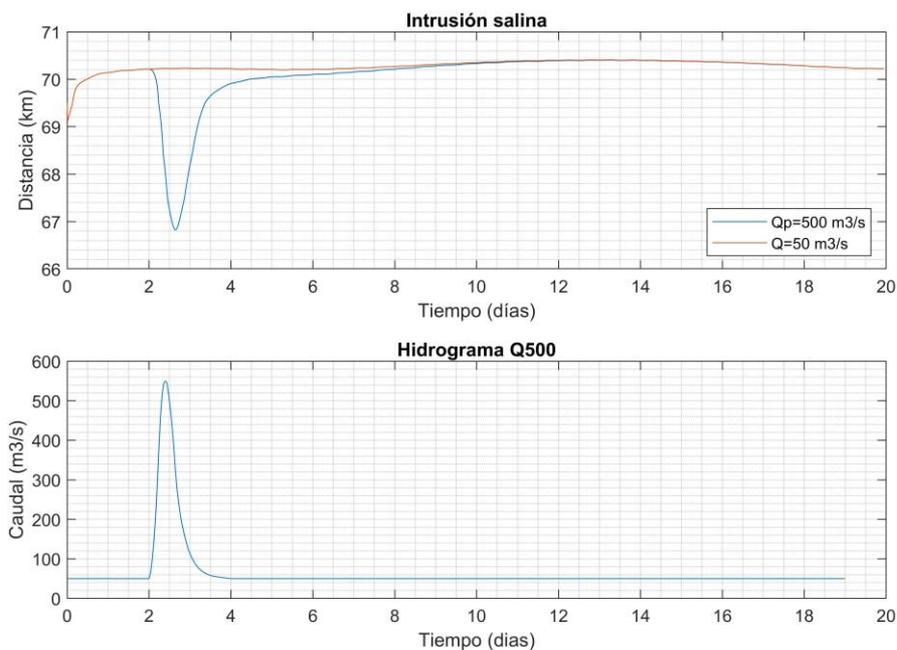


Figura 4.6 Intrusión ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para analizar los resultados puede dividirse la gráfica en tres zonas, que se corresponden con las tres ramas presentes en el hidrograma de caudal. La primera de ellas abarca los dos primeros días de simulación, en los que el hidrograma se encuentra en una rama de caudal constante e igual a $50 \text{ m}^3/\text{s}$. En estas condiciones, la intrusión se encuentra en los límites propios de las condiciones medias del estuario actual.

A medida que el caudal de la descarga aumenta, la componente asociada a la misma cobra cada vez una mayor importancia respecto a la marea, de manera que el límite de intrusión salina comienza a retraerse, alcanzando su valor mínimo tras 2.5 días de simulación. El desfase con respecto a la punta del hidrograma es tan solo de 0.25 días.

En este caso, la posición mínima de la intrusión se produce en el kilómetro 66.8, mientras que la máxima ocurre, al igual que en la descarga de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, en el kilómetro 70.4. Por diferencia entre ambas se obtiene una

longitud de transición de 3.6 kilómetros, siendo 1.25 km la obtenida para la descarga de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (incremento del 97 %) y de 215 metros la correspondiente a la condición media actual (incremento del 177%).

Una vez pasada la punta del hidrograma (tercera zona), la descarga fluvial comienza a decrecer y, consecuentemente, se produce la resalinización del estuario. El tiempo transcurrido entre el punto de intrusión mínima y la recuperación de las condiciones iniciales (tiempo de resalinización) es aproximadamente de 9 días.

Por último, se observa la pérdida del carácter periódico de la intrusión durante el transcurso de la avenida, por lo que se concluye que el problema está gobernado por la descarga fluvial. Cuando ésta cesa, comienza a visualizarse la oscilación a nivel intermareal, mientras que las variaciones semidiurnas, aún en la cola del hidrograma, no se manifiestan con suma claridad.

En cuanto al análisis de la distribución salina, se representa en la siguiente figura la evolución de la concentración de sal a lo largo del eje del estuario en la capa intermedia, acompañada de la variación de nivel y velocidad. En el cuarto panel se refleja la comparativa entre salinidad en superficie, capa intermedia y fondo para una sección localizada en la parte alta del estuario (kilómetro 70).

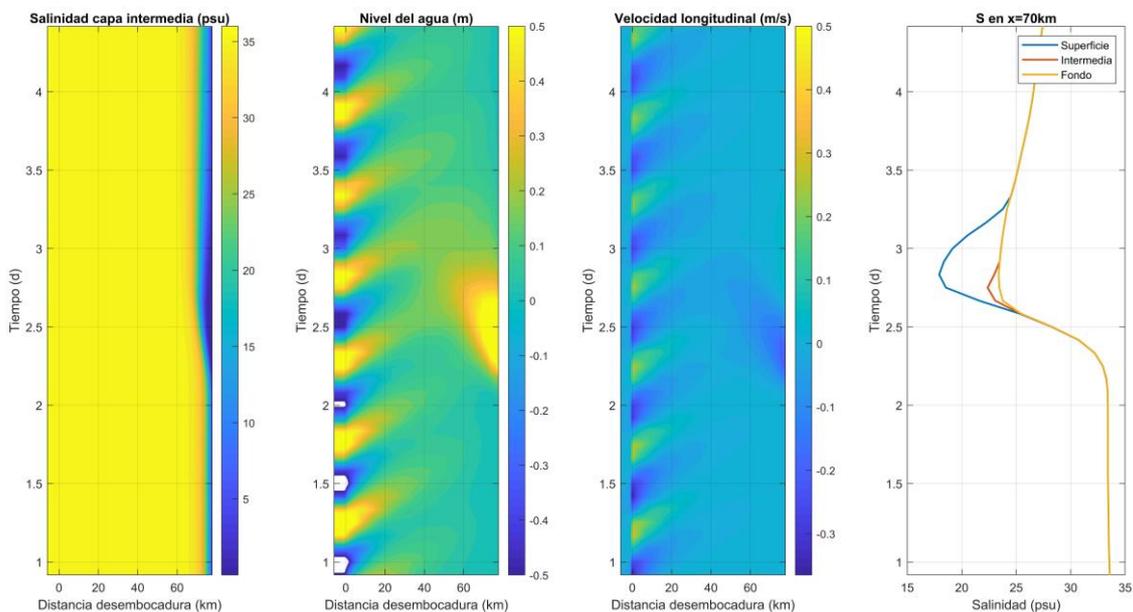


Figura 4.7 Distribución salina ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Como se mencionó anteriormente, no se manifiesta el carácter oscilatorio de la marea en la distribución de salinidad por lo que la concentración en la capa intermedia es aproximadamente constante en el periodo previo a la llegada de la avenida, independientemente de la existencia de pleamar o bajamar.

La llegada de la punta de la avenida provoca un retroceso del frente salino, alcanzándose concentraciones cercanas al agua dulce en una franja mayor del estuario, y una longitud de transición que se extiende hasta el kilómetro 70.

Durante este tiempo, se produce un incremento del nivel en el estuario entre 0.1 y 0.5 metros y un aumento (en valor absoluto) de la velocidad, que alcanza los 0.2 m/s. De hecho, se registran instantes en la simulación en los que el sentido de recorrido del agua es prácticamente íntegro hacia la desembocadura (velocidad menor que cero).

Es durante este periodo de mayor variación de nivel y velocidad cuando se producen las mayores variaciones de salinidad, lo cual concuerda perfectamente con la ecuación empleada en el modelo para el transporte de sustancias conservativas, cuyos términos advectivos recogen el producto de la velocidad y el nivel por la

concentración.

Visto de otro modo, el aumento de la descarga fluvial genera turbulencia y favorece la mezcla de las aguas por lo que comienzan a verse variaciones entre la salinidad de la capa superficial y el fondo, induciéndose la estratificación en la parte alta del estuario.

Nuevamente, este comportamiento puede cuantificarse haciendo uso del parámetro de estratificación y el número de Richardson, lo cual se refleja en la siguiente figura.

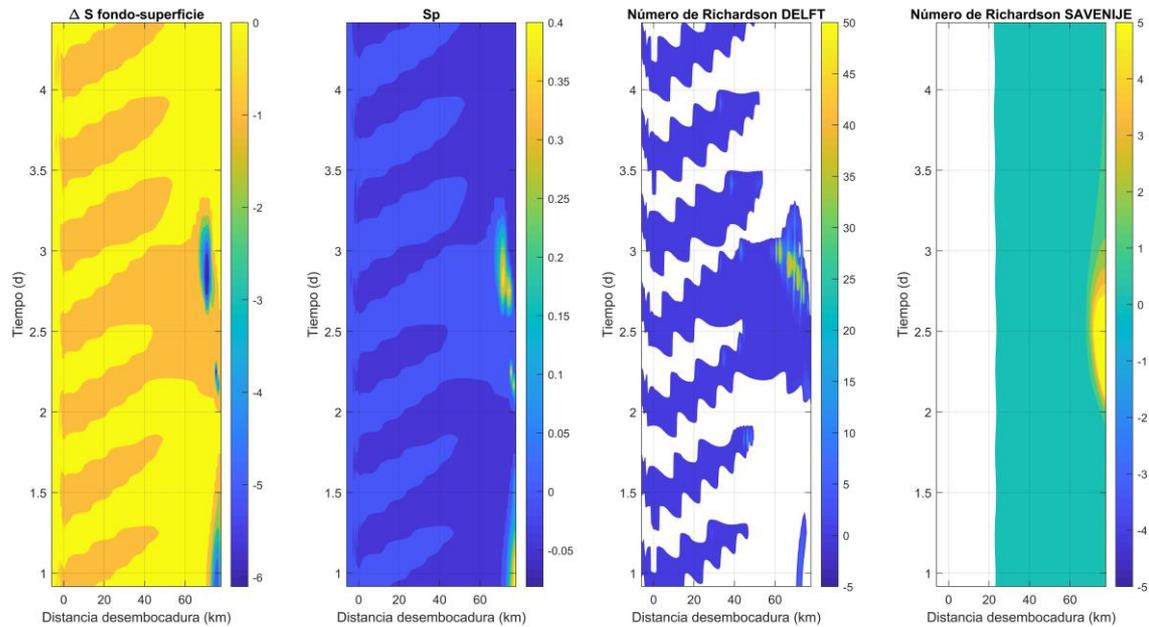


Figura 4.8 Estratificación ($Q_p=500 \text{ m}^3/\text{s}$).

En vistas a los resultados del parámetro de estratificación, se observa que este fenómeno ocurre justo después de la punta del hidrograma (tras los 2.5 días) y que, en este caso, el mayor valor de la descarga produce variaciones más bruscas entre la superficie y el fondo, de forma que el S_p llega a alcanzar valores de hasta el 40%.

En cuanto al número de Richardson, se respalda en ambos casos el resultado obtenido para el S_p , que apunta hacia una estratificación estable entre los kilómetros 60 y 80. Siendo precisos, el número de Richardson proporcionado por Delft predice una estratificación que se extiende algo más hacia aguas abajo en comparación con la de los otros dos parámetros, pero si coincide con la anterior en que el fenómeno perdura unos 0.5 días. Transcurrido este tiempo, el caudal de la descarga se reduce lo suficiente como para que la llegada de la siguiente marea viva provoque la recuperación del carácter verticalmente homogéneo.

En lo anterior difiere ligeramente el resultado obtenido para el número de Richardson según Savenije, en el que la estratificación ya comienza a producirse a partir del segundo día, que es justo el instante en el que comienza la rama de ascenso en el hidrograma. No debe olvidarse que el valor de la descarga aparece en el numerador de la expresión de este coeficiente y que el umbral que predice la estratificación se establece tan solo en 0.8, por lo que pequeños aumentos de la descarga se inclinan hacia un estuario estratificado. De hecho, la ocurrencia del fenómeno se extiende en el tiempo hasta alcanzados los 3.5 días, en los que el caudal vuelve a adquirir el valor base ($50 \text{ m}^3/\text{s}$).

Se concluye, por tanto, que el aumento de la descarga fluvial induce mayores variaciones de nivel y velocidad en el estuario, lo cual provoca variaciones en la distribución de salinidad más señaladas. Por otra parte, la existencia de secciones estratificadas requiere de un cierto equilibrio entre la descarga fluvial y la marea por lo que, a medida que aumenta la descarga, la estratificación se hace notar en zonas más cercanas a la

desembocadura. En la parte alta del estuario, sin embargo, se observan transiciones bruscas entre 36 y 0 psu, de forma que cambia la concentración de sal, pero se mantiene el carácter verticalmente homogéneo.

4.3 Análisis en régimen extremal ($Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$)

Continuando con la misma estructura, se muestra en la siguiente figura el resultado de la intrusión correspondiente a una avenida de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal punta, comparado con el de la situación actual en el estuario.

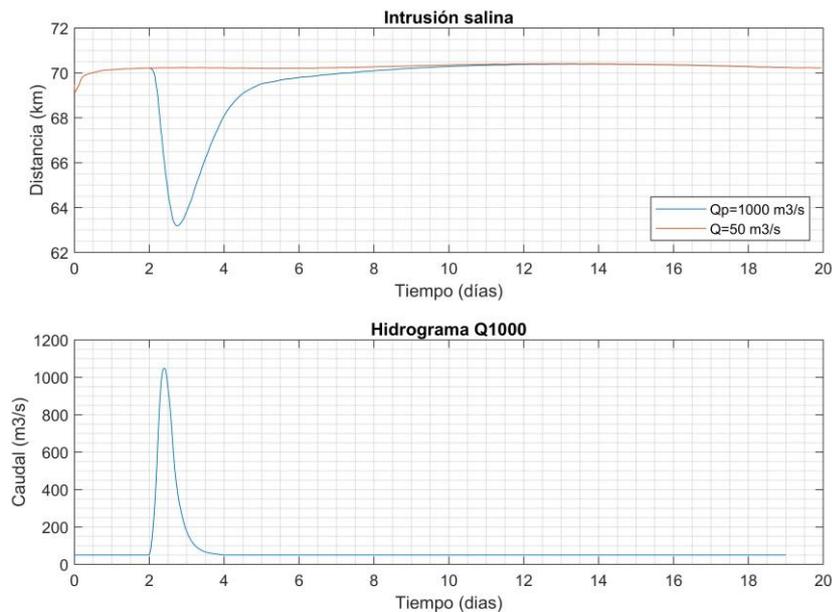


Figura 4.9 Intrusión ($Q_p= 1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para analizar los resultados puede dividirse nuevamente la gráfica en tres zonas, que se corresponden con las tres ramas presentes en el hidrograma de caudal. La primera de ellas abarca los dos primeros días de simulación, en los que el hidrograma se encuentra en una rama de caudal constante e igual a $50 \text{ m}^3/\text{s}$. En estas condiciones, la intrusión se encuentra en los límites propios de las condiciones medias del estuario actual.

A medida que el caudal de la descarga aumenta, la componente asociada a la misma cobra cada vez una mayor importancia respecto a la marea, de manera que el límite de intrusión salina comienza a retraerse, alcanzando su valor mínimo tras 2.75 días de simulación. El desfase con respecto a la punta del hidrograma es tan solo de 0.25 días.

En este caso, la posición mínima de la intrusión se produce en el kilómetro 63.2, mientras que la máxima ocurre, al igual que en la descarga de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, en el kilómetro 70.4. Por diferencia entre ambas se obtiene una longitud de transición de 7.2 kilómetros, siendo 3.6 km la obtenida para la descarga de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (incremento del 100%), 1.25 km la obtenida para la descarga de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (incremento del 476 %) y de 215 metros la correspondiente a la condición media actual (incremento del 3248%).

Una vez pasada la punta del hidrograma (tercera zona), la descarga fluvial comienza a decrecer y, consecuentemente, se produce la resalinización del estuario. El tiempo transcurrido entre el punto de intrusión mínima y la recuperación de las condiciones iniciales (tiempo de resalinización) es, al igual que en el caso anterior, de 9 días. Esto muestra que la resalinización del estuario se produce a mayor velocidad, dado que en el mismo tiempo ha resalinizado una longitud dos veces mayor.

Por último, se observa nuevamente la pérdida del carácter periódico de la intrusión durante el transcurso de la avenida, manteniéndose aproximadamente constante en la cola del hidrograma. Bien cierto es que la variación para descargas de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ es reducida, pero tras el paso de la avenida es prácticamente inapreciable.

En cuanto a la distribución salina, se incorporan los resultados análogos a los apartados anteriores para esta nueva avenida de mayor envergadura.

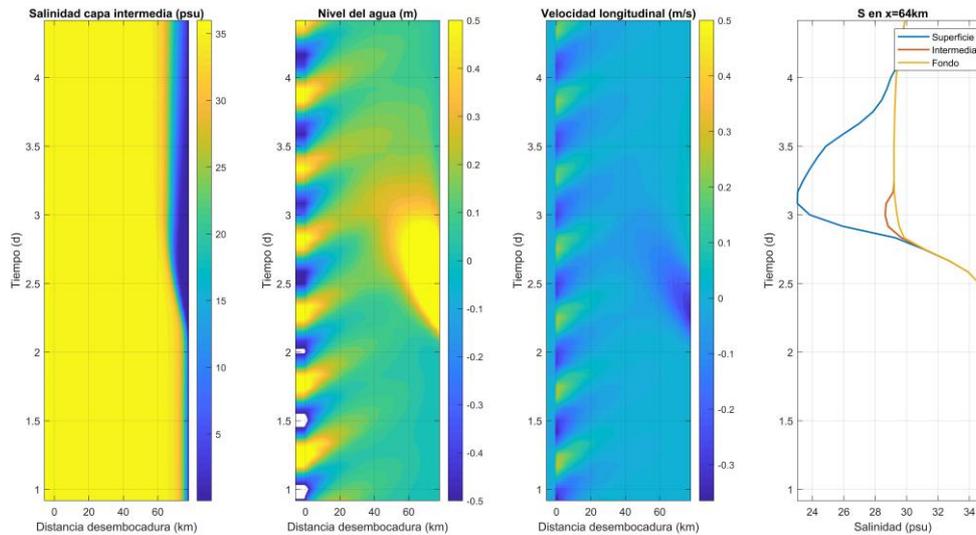


Figura 4.10 Distribución salina ($Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Al igual que ocurría en el caso anterior, no se manifiesta el carácter oscilatorio de la marea en la distribución de salinidad por lo que se observa, en primera instancia, una concentración en la capa intermedia aproximadamente constante.

La llegada de la punta de la avenida provoca un retroceso del frente salino, alcanzándose concentraciones cercanas al agua dulce en una franja mayor del estuario y una longitud de transición que se extiende hasta las inmediaciones del kilómetro 60. Puede observarse que cuanto mayor es la descarga, mayor es la anchura de la banda de concentración nula, es decir, mayor es la zona del estuario con agua completamente dulce.

Durante el transcurso de la descarga se producen aumentos del nivel y la velocidad en el estuario algo mayores que en el caso anterior, afectando a una mayor longitud y durante un mayor periodo de tiempo. Esto se traducirá en mayores variaciones de salinidad, tal y como se verá a continuación.

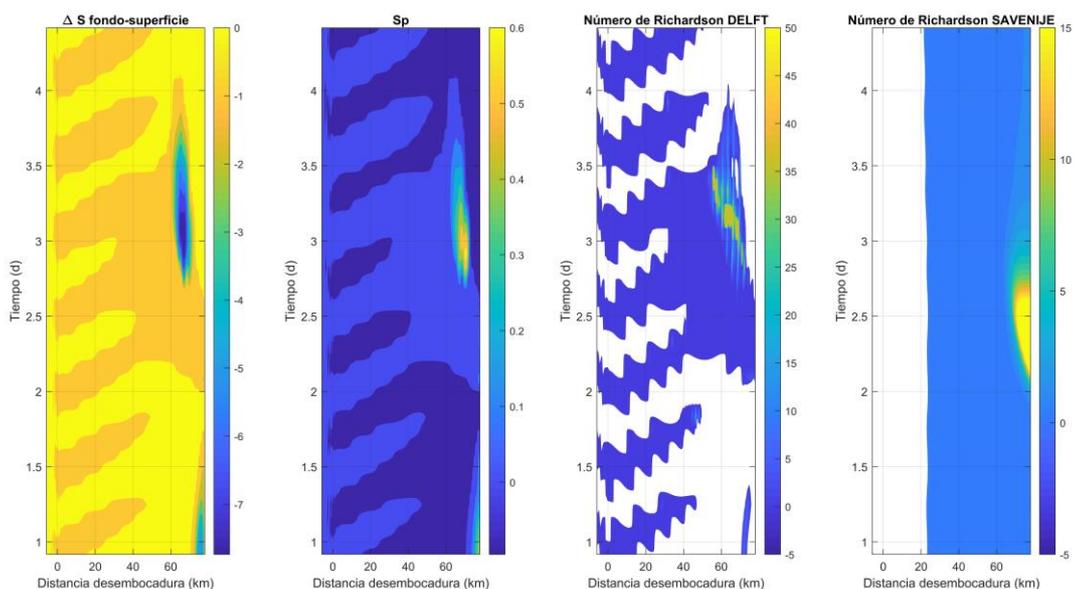


Figura 4.11 Estratificación ($Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$).

En vistas a los resultados del parámetro de estratificación, se observa que este fenómeno ocurre después de la punta del hidrograma (aunque con un mayor desfase) y que, en este caso, el aumento de la descarga produce variaciones aún más bruscas entre la superficie y el fondo, de forma que el Sp llega a alcanzar valores de hasta el 60%. Esto se debe a las mayores variaciones de nivel y velocidad en el estuario.

En cuanto al número de Richardson, se respalda en ambos casos el resultado obtenido para el Sp , que apunta hacia una estratificación estable entre los kilómetros 60 y 70. Nuevamente se repite el resultado obtenido en el apartado anterior, de forma que el número de Richardson proporcionado por Delft predice una estratificación más extensa en el estuario (hasta el kilómetro 57) pero de la misma duración (aproximadamente 1 día).

En cuanto al Richardson obtenido con la expresión del Savenije, vuelve a manifestarse una alta sensibilidad a la variación de la descarga, de manera que la estratificación ya se produce poco después del segundo día de simulación. Además, los valores más elevados se concentran en la parte alta del estuario y no exactamente en la zona reflejada por el resto de coeficientes. Esto genera una cierta desconfianza hacia este parámetro conforme va aumentando la magnitud de la descarga, pues parece que el valor alto del número de Richardson no está asociado a una estratificación real sino simplemente a un valor elevado en la descarga fluvial.

Comparando los resultados de esta descarga con los del apartado anterior, se reafirma que descargas de mayor envergadura provocan variaciones de salinidad más bruscas que, por otra parte, se producen en posiciones cada vez más cercanas a la desembocadura. Además, el tiempo que perdura la estratificación es cada vez mayor, dado que los caudales presentes en el hidrograma son, en general, cada vez mayores, favoreciéndose un proceso de mezcla cada vez más costoso de superar por el avance de la marea.

4.4 Análisis en régimen extremal ($Q_p=2500 \text{ m}^3/\text{s}$)

Por último, se muestran los resultados de la descarga de mayor envergadura de entre las estudiadas, que corresponde con una avenida de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal punta.

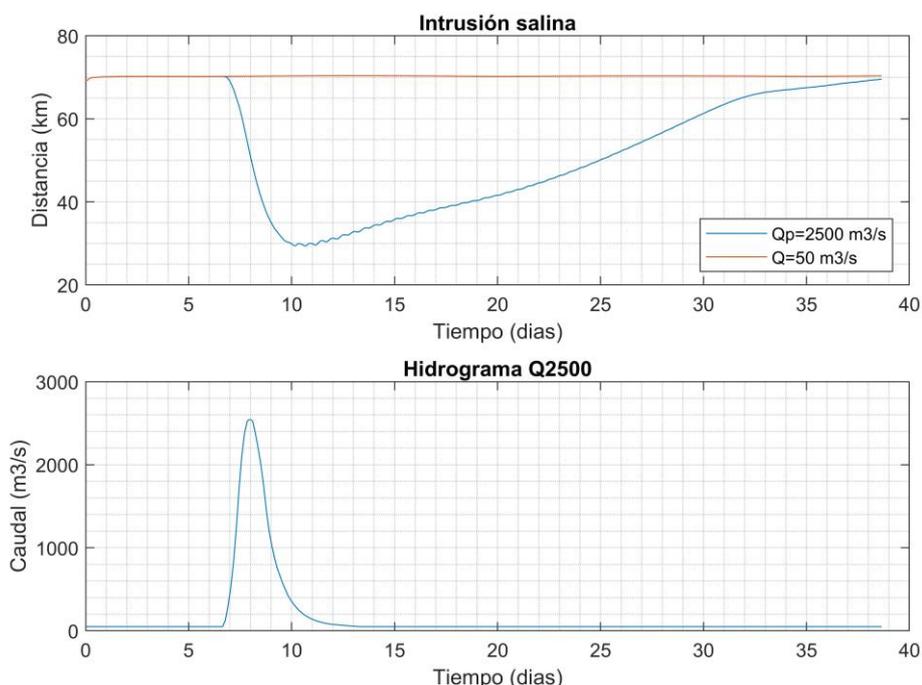


Figura 4.12 Intrusión ($Q_p=2500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Al igual que ocurría en los casos anteriores, a medida que el caudal asciende por la rama del hidrograma, el límite de intrusión salina comienza a retraerse, alcanzando su valor mínimo tras 10 días de simulación. El desfase con respecto a la punta del hidrograma es, en este caso, de 2 días.

Se observa por tanto que, a medida que aumenta el caudal punta de la descarga, la intrusión alcanza cada vez

valores más cercanos a la desembocadura y su desfase es mayor con respecto a la punta del hidrograma.

En este caso, la posición mínima de la intrusión se produce en el kilómetro 29.4, mientras que la máxima ocurre, al igual que en la descarga de 50 m³/s, en el kilómetro 70.4. Por diferencia entre ambas se obtiene una longitud de transición de 41 kilómetros, mientras que la obtenida para la descarga de 1000 m³/s era tan solo de 7.2 km. Esto supone un incremento del 470% y manifiesta que la relación entre la intrusión mínima y la descarga es claramente no lineal.

Una vez pasada la punta del hidrograma la descarga fluvial comienza a decrecer y, consecuentemente, se produce la resalinización del estuario. El tiempo transcurrido entre el punto de intrusión mínima y la recuperación de las condiciones iniciales (tiempo de resalinización) es de 29 días. Nótese como este valor se incrementa considerablemente con respecto a los escenarios anteriores dada la amplia longitud de salinización que debe recuperar su carácter inicial.

En cuanto a la distribución salina, se incorporan los resultados análogos a los de los apartados anteriores.

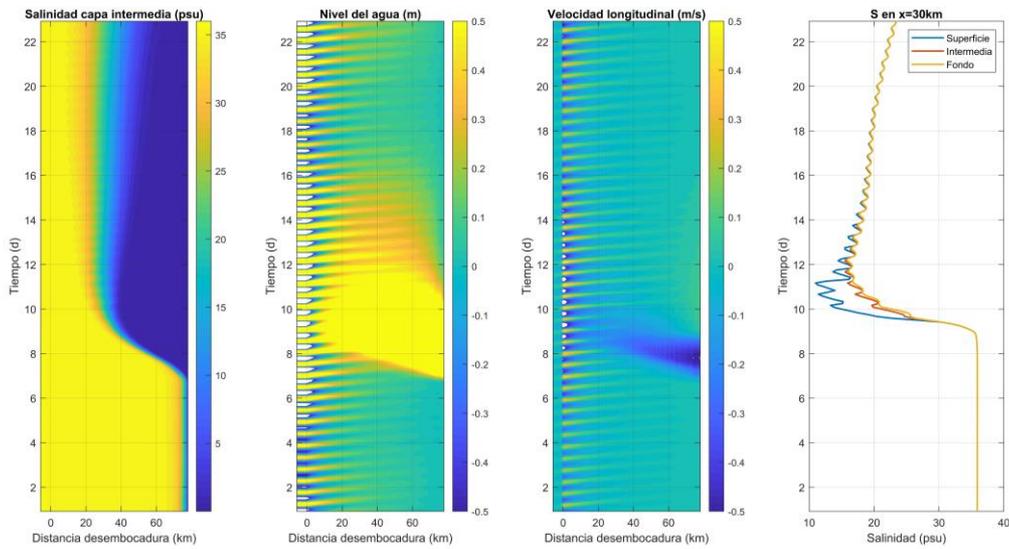


Figura 4.13 Distribución salina ($Q_p= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$).

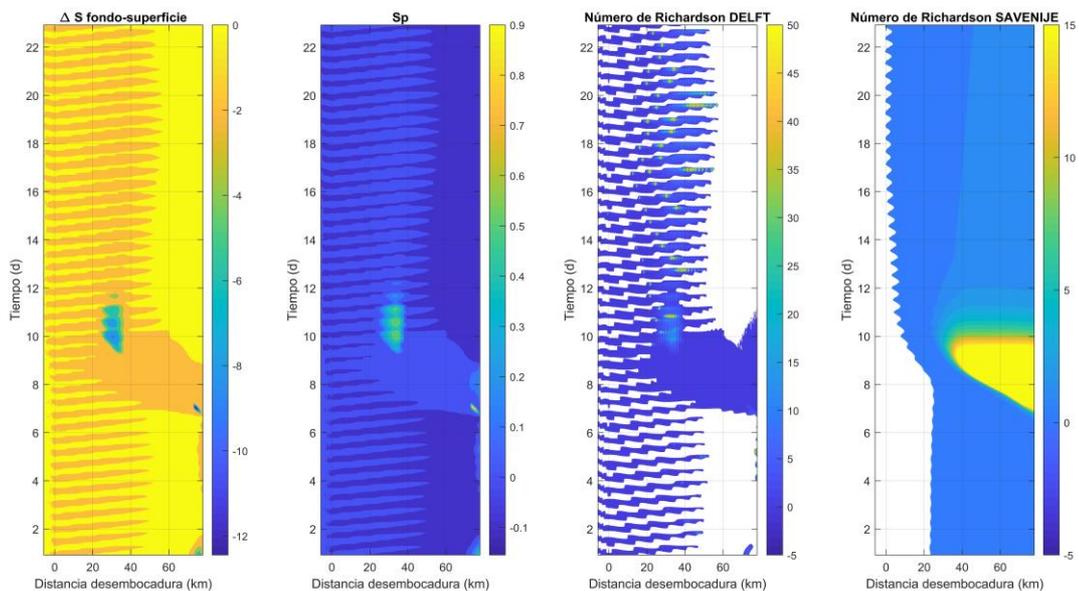


Figura 4.14 Estratificación ($Q_p= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$).

En vistas a los resultados, se observa que descargas de 2500 m³/s provocan que prácticamente todo el estuario abandone el carácter salino que se manifestaba en los escenarios anteriores, dado que la concentración de sal es inferior a 36 psu incluso más allá del kilómetro 10, estando localizada la boca del estuario en el 7.5. Más aún, en el instante de intrusión mínima, se registra una concentración de sal nula que desciende aguas abajo hasta el kilómetro 40.

En estas circunstancias, las variaciones de nivel alcanzan sus valores máximos en prácticamente todo el estuario durante más de 4 días y existen instantes en los que la velocidad es plenamente vaciante, anulando la descarga fluvial la llenante que genera la marea.

Como se mencionó en apartados anteriores, descargas de gran envergadura provocan un fuerte incremento de la magnitud del vector velocidad, de manera que la turbulencia generada va dejando un estuario verticalmente homogéneo de concentración nula en su parte alta. A partir de una cierta distancia en la que la descarga puede “competir” con la marea se manifiesta la estratificación. En este caso, esta zona se encuentra comprendida entre los kilómetros 20 y 30 y en ella se registran variaciones de salinidad representadas por un Sp del 60%, que además se mantiene, aproximadamente, durante dos días. Coincide nuevamente la estratificación señalada con la proporcionada por el número de Richardson del modelo, que alcanza valores positivos y cercanos a 35 aunque no durante el mismo periodo de tiempo, dado que en este caso se observan picos locales durante las bajamares posteriores a la punta del hidrograma.

Llama ciertamente la atención el valor local de estratificación que se produce en torno al séptimo día de simulación, que se corresponde con el inicio de la rama ascendente del hidrograma, y que deja un pico del parámetro de estratificación del 90%. No obstante, en esta zona el número de Richardson es ligeramente positivo (en torno a 3) por lo que podría afirmarse que no se trata de una estratificación estable.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las simulaciones en régimen extremal, que sirve de base para extraer algunas de las conclusiones que se expondrán en el siguiente apartado.

Tabla 4 Resumen de resultados

Parámetro		Simulación		
		Q=500 m ³ /s	Q=1000 m ³ /s	Q=2500 m ³ /s
Intrusión	Tiempo de intrusión mínima (días)	2.5	2.75	10
	Desfase punta hidrograma (días)	0.25	0.25	2
	Posición mínima (km respecto origen)	66.8	63.2	29.4
	Posición máxima (km respecto origen)	70.4	70.4	70.4
	Longitud de salinización (km)	3.6	7.2	41
	Tiempo de resalinización (días)	9	9	29
Estratificación	Instante de inicio de estratificación (días)	2.5	2.75	9.5
	Duración de la estratificación (días)	0.5	1	2
	Franja estratificada	En torno al km 70	km 60-70	km 25-35
	Sp (%)	40	60	60
	Número de Richardson máximo (Delft)	~35	~35	~35
	Número de Richardson máximo (Savenije)	~5	~15	~15

5 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

5.1 Conclusiones

Conocida la importancia de los estuarios aluviales en el mundo actual, la investigación se centra en analizar la distribución de salinidad en el estuario del río Guadiana en función de la descarga fluvial presente en el mismo, centrándose el estudio principalmente en torno a la intrusión salina y la estratificación.

Se entiende por intrusión salina la posición del eje del estuario en la cual la salinidad alcanza valores de 3.6 o 1.8 psu. En este trabajo, se ha optado por seleccionar el primer umbral. Se trata, por tanto, de una variable espacial longitudinal.

La estratificación, sin embargo, hace referencia a la forma del perfil vertical de concentración en cada sección, por lo que se trata de una variable espacial transversal de la que se estudia su variación vertical.

Su consideración permite distinguir entre estuarios verticalmente homogéneos, caracterizados por zonas de mezcla total y, por tanto, sin diferencias en la vertical, y estuarios estratificados, en los que las secciones no presentan un único valor de salinidad en la vertical.

La existencia de una u otra tipología está fuertemente vinculada a la descarga fluvial presente en el río. De esta forma, valores elevados favorecen el proceso de mezcla y dan lugar a estuarios estratificados. La posición de la estratificación dependerá de la propia descarga y se localizará más cerca de la desembocadura cuando la descarga sea de mayor envergadura. Cuando, por el contrario, la descarga es reducida, por ejemplo, en época estival, la tendencia es a formar un estuario verticalmente homogéneo.

Durante el estudio, se han llevado a cabo dos tipos de análisis. En primer lugar, se ha realizado una comparación de las condiciones medias (régimen normal) previas y posteriores a un hito de gran relevancia: la construcción de la Presa de Alqueva. Esta obra supuso una reducción en la descarga media del río de 150 a 50 m³/s, provocando una redistribución salina en el estuario que, aún dependiendo de las condiciones de la marea astronómica, apunta hacia una mayor longitud salinizada en el mismo, lo cual influye directamente sobre cada uno de los sectores que se nutren del agua de este entorno (regadíos, recarga de acuíferos, consumo, etc.). Como consecuencia de este efecto debe llevarse a cabo un replanteo de la distribución de usos en la cuenca.

Por otra parte, se han analizado las variaciones de salinidad provocadas por tres avenidas distintas, cuyos hidrogramas de caudal, obtenidos por el método SCS, presentan puntas de 500, 1000 y 2500 m³/s, respectivamente. El objetivo principal en este caso es determinar la posición de la cuña salina, definiendo sus límites, la longitud de salinización y el tiempo de resalinización. Por otra parte, se busca encontrar el tipo de distribución presente en el estuario, así como sus causas, tiempo de permanencia y localización.

Para ello se hace uso de dos parámetros principales: el parámetro de estratificación, que refleja la diferencia porcentual entre la concentración de sal en superficie y fondo, y el número de Richardson, que establece un balance entre la energía de la descarga y la asociada a la marea astronómica.

La obtención de resultados precisa de la elaboración de un modelo numérico tridimensional a través del software Delft 3D, cuya geometría se ajusta a la definición de lo que se conoce como estuario ideal. Este entorno se caracteriza por una forma en planta cuyas márgenes responden a una función exponencial y un perfil longitudinal de profundidad aproximadamente constante.

Una vez generado el dominio espacial, deben definirse las condiciones iniciales y de contorno.

Las condiciones iniciales establecidas en el modelo se corresponden con la distribución de sal en el estuario asociada a la posición de equilibrio de la descarga actual en condiciones medias.

Las condiciones sobre los cuatro contornos del modelo son distintas en función del tipo de forzamiento a

imponer, que debe responder a una condición real. Así, se ha establecido un forzamiento de marea astronómica en el contorno litoral, dos contornos tipo Neumann en las rectas perpendiculares a las líneas batimétricas y uno de tipo water level en el contorno fluvial. Fruto de la obtención de mejores resultados en el modelo, las descargas fluviales consideradas en cada caso se han introducido de forma externa.

Para que un modelo sea válido y permita obtener los mismos resultados que se obtendrían mediante ensayos de campo, debe ser sometido a un análisis de estabilidad. En este sentido se han llevado a cabo dos comprobaciones.

En primer lugar, se ha analizado el tamaño óptimo de malla, con el fin de obtener resultados numéricamente estables (acordes además con la discretización temporal del dominio) en un tiempo de computación razonable. Debe tenerse en cuenta que se han realizado simulaciones de hasta varios meses de duración, por lo que prima la eficiencia de cálculo. Para este análisis se presentaron tres alternativas de malla distintas, concluyéndose que la de menor resolución era, afortunadamente, válida para realizar las simulaciones.

Por otra parte, se ha llevado a cabo una comparación de los resultados obtenidos para la distribución salina a lo largo del eje en función del valor que toman los principales parámetros físicos del modelo, que son la fricción y la viscosidad y difusividad en el eje horizontal y vertical.

Formalizando el modelo con cada uno de estos argumentos de entrada y modificando la duración y tipo de descarga se generan las simulaciones cuyos resultados permiten extraer las siguientes conclusiones:

- La construcción de la Presa de Alqueva y su consecuente reducción de la descarga fluvial ha provocado un avance en el frente salino, de manera que la intrusión oscila entre valores máximos y mínimos mayores, pero con una menor amplitud.
- El estudio de la estratificación en condiciones medias está gobernado por los ciclos de marea, de forma que a nivel intermareal se obtiene estratificación en la parte alta del estuario durante mareas muertas, mientras que el estuario se vuelve verticalmente homogéneo durante las mareas vivas.
- El análisis de la intrusión en régimen extremal demuestra que cuanto mayor es la descarga, mayores son el tiempo que tarda en alcanzarse la intrusión mínima, el desfase con respecto a la punta del hidrograma, la longitud de salinización y el tiempo de resalinización.
- El análisis de la estratificación en régimen extremal demuestra la estratificación del estuario en todos los casos. No obstante, a medida que la descarga es mayor, mayor es la franja afectada, más próxima es la estratificación respecto a la desembocadura y mayor es el tiempo que tarda en desaparecer.
- En vistas a la distribución salina en la capa intermedia, valores mayores de la descarga tienden a generar una zona de transición en la que se identifica un mayor número de bandas de distinta concentración. En las simulaciones de descarga reducida, en cambio, el perfil longitudinal se asocia al representado en el apartado 2.3 para una tipología estratificada, con la discrepancia de que el modelo predice la sección de cambio de salinidad a una mayor distancia de la desembocadura de la esperada, cuyas causas se asocian a la geometría y la fricción.
- La zona estratificada coincide con la de intrusión mínima y el tiempo que tardan ambas en alcanzarse es prácticamente el mismo. A su vez, este tiempo es aproximadamente el mismo o algo posterior al instante del tiempo pico del hidrograma. Esto se debe a que en el límite de intrusión existe una cierta presencia simultánea de agua dulce y salada que se manifiesta a través de secciones transversales con variación de concentración en la vertical, favorecida por los procesos de mezcla derivados del gradiente de densidad.

5.2 Futuras líneas de trabajo

El estudio llevado a cabo deja algunos frentes abiertos por los que puede continuar la investigación en el futuro. Algunos de ellos son los que se resumen a continuación.

- Establecimiento de mejoras en la geometría del estuario. La aproximación a un estuario ideal facilita en gran medida la elaboración del modelo, pero requiere forzar otros parámetros para que los resultados obtenidos sean, en la medida de lo posible, acordes a la situación real. En este sentido, destaca el hecho de que la geometría seleccionada es siempre favorable al ascenso de la marea, dado que se anula cualquier tipo de obstáculo, por lo que se obtienen distribuciones de sal anormalmente cercanas al inicio del estuario. Para reducir este fenómeno, se ha introducido un coeficiente de fricción excesivo.
- En consonancia con el apartado anterior, análisis del coeficiente de fricción y establecimiento de un valor acorde al estuario del río.
- Estudio hidrológico de la cuenca, de forma que pueda deducirse el régimen de lluvias responsable de la generación de los hidrogramas de caudal empleados, así como determinar el periodo de retorno de las avenidas y, con ello, la probabilidad de que se produzcan en el estuario cada uno de los resultados obtenidos.
- Simular descargas idénticas a las realizadas, pero de mayor duración, con el fin de analizar el posible retorno de las variaciones intermareales e intramareales asociadas a la intrusión.
- Estudio de hidrogramas de caudal de puntas mayores a las analizadas en vistas a obtener un posible escenario de estuario con concentración de sal nula en todos los puntos. Cálculo del tiempo de permanencia del escenario y tiempo de resalinización. Análisis de la posible formación de un estuario parcialmente estratificado.
- Introducir forzamientos adicionales, tales como el viento o el oleaje.

REFERENCIAS

- Díaz, D. (2019). Análisis morfodinámico de la desembocadura del río Guadiana. TFM Máster I.C.C.P., ETSI Universidad de Sevilla.
- Deltares (2016). Delft3D Flow: User Manual. Deltares
- Fischer, H., List, E., Koh, R., Imberger, J., Brooks, N., 1979. Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, New York.
- Garel, E., & Cai, H. (2018). Effects of Tidal-Forcing Variations on Tidal Properties Along a Narrow Convergent Estuary. *Estuaries and Coasts*, 41(7), 1924–1942.
- Garel, E., & D’Alimonte, D. (2017). Continuous river discharge monitoring with bottom-mounted current profilers at narrow tidal estuaries. *Continental Shelf Research*, 133(October 2016), 1–12.
- Haralambidou, K., Sylaios, G., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean microtidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90(4), 174–184.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 883–915.
- López-Ruiz, A., Garel, E., & Ferreira, Ó. (2020). The Effects of High River Discharges on the Morphodynamics of the Guadiana ebb-tidal delta. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 558.
- Perales-Valdivia, H., Sanay-González, R., & Valle-Levinson, A. (2018). Effects of tides, wind and river discharge on the salt intrusion in a microtidal tropical estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 24, 400–410.
- Savenije, H. H. G. (2012). Salinity and tides in alluvial estuaries, 2nd completely revised edition: salinityandtides.com. Open Access, 163.