

# Estudio de la circulación secundaria en el tramo bajo e intermedio en el Estuario del Guadalquivir

Miguel Ángel Reyes Merlo,  
Tutor: D. Manuel Díez Minguito.

*Grupo de Dinámica Flujos Ambientales, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía – Universidad de Granada, Edificio CEAMA, Avda. del Mediterráneo, s/n, 18006, Granada, Spain.*

---

## Abstract

En este Trabajo Fin de Máster se estudia la circulación secundaria en el tramo bajo e intermedio del estuario del Guadalquivir, tanto en régimen de aguas bajas como de avenidas. Del análisis de los procesos que originan esta circulación se desprende que los mecanismos más relevantes son aquellos relacionados tanto con la advección del flujo lateral y longitudinal como con la fricción interna y de los contornos, en donde los efectos de la rotación de la Tierra pasan a desempeñar un papel secundario. Los resultados indican que la dinámica y la morfología del tramo superior condicionan decisivamente la circulación secundaria en el tramo bajo, a pesar de estar influenciada por otro tipo de procesos derivados de una mayor estratificación.

---

## 1. Introducción

El estuario del Guadalquivir constituye uno de los espacios naturales y socioeconómicos más rico y diverso de Andalucía. Debido a su especial interés, entre los años 2008 y 2011 se realizó un exhaustivo estudio para pronosticar y diagnosticar los efectos de las distintas actuaciones humanas que en él se desarrollan (Ruiz and Losada, 2010). Para este fin se desplegó, en determinados puntos a lo largo del canal principal del estuario, una extensa red de monitorización en tiempo real (RMTR) (Figura 1) capaz de medir variables hidrodinámicas y biogeoquímicas (Navarro et al., 2011). A partir del amplio conjunto de datos generados y de otras mediciones previas, se han elaborado diversos estudios que nos han servido para entender, entre otros, la propagación de la onda de marea (Díez-Minguito et al., 2012); la distribución espacio-temporal de la salinidad; los mecanismos generadores del transporte de sal en aguas bajas, y la variación del alcance de la intrusión salina en función del caudal de agua dulce descargado por la presa de cabecera (Díez-Minguito et al., 2013). A pesar de que estos trabajos se han basado, principalmente, en el análisis de la dinámica longitudinal, también apuntan a la circulación secundaria como un importante agente morfodinámico a considerar. De hecho, hay suficientes evidencias que la señalan como generadora de celdas de recirculación en la sección (Ruiz and Losada, 2010)

o como condicionante que interviene en procesos de mezcla, a pesar de la estrechez del canal principal, mediante la reducción de la dispersión longitudinal en el tramo bajo del estuario (Díez-Minguito et al., 2013). Otros estudios que revisten gran interés, y que nos ayudan a tener una visión completa del comportamiento y funcionamiento del estuario del Guadalquivir, están relacionados con el estado trófico del estuario (Navarro et al., 2012), el intercambio térmico de energía entre la plataforma continental y el estuario (García-Lafuente et al., 2012), o con la manera en cómo los sedimentos del río contribuyen a los eventos de extrema turbidez (Contreras and Polo, 2012).

La circulación lateral, comúnmente denominada secundaria, se define como aquella que es normal al flujo longitudinal. Típicamente, la fuerza de esta corriente suele ser un 10% inferior a la de la corriente longitudinal [Valle-Levinson (2010); Lerczak and Rockwell Geyer (2004)]. Aunque esto pueda hacer pensar que su influencia es mínima en la dinámica, hay que tener en cuenta que esta corriente es la encargada de transportar importantes gradientes transversales de velocidad, concentración de sal, turbidez y otras sustancias, mucho mayores que los respectivos gradientes longitudinales (Chant and Wilson, 1997). Por todo ello, este tipo de circulación afecta en los estuarios, sustancialmente, a la dinámica longitudinal, estabilidad de las márgenes, morfodinámica, transporte longitudinal de sedimentos,

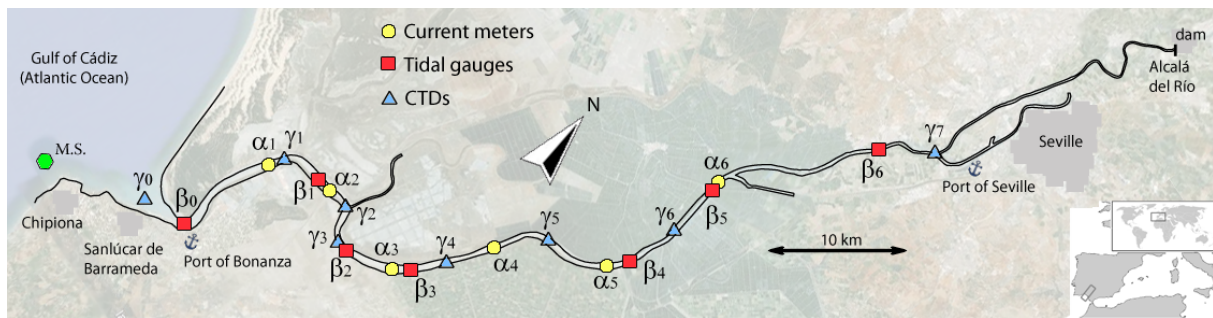


Figura 1: Localización de la red de monitorización a tiempo real en el estuario del Guadalquivir, incluyendo la ubicación de la estación meteorológica (hexágono verde) en la plataforma continental de Chipiona. La RMTR está compuesta por seis correntímetros (círculos amarillos), siete mareógrafos (cuadrados rojos) y ocho sondas de calidad ambiental (triángulos azules). El Brazo de la Torre es el caño que confluye con el canal principal en  $\gamma_2$ .

renovación de las masas de aguas y otros aspectos relacionados con la calidad de las aguas (Elston, 2005). Por tanto, el objetivo general del trabajo fin de máster es profundizar en el conocimiento de la circulación secundaria en el tramo bajo e intermedio del estuario del Guadalquivir. Para ello, se han cumplido los siguientes objetivos específicos: *i*) Cuantificación de la circulación secundaria en relación a la circulación longitudinal mediante números adimensionales; empleando los datos de la RMTR tanto en régimen de aguas bajas como de avenidas y *ii*) Inferencia de la circulación secundaria en los tramos bajo e intermedio, estudiando los principales mecanismos de circulación a través de la ecuación de conservación de momento transversal a escala promedio mareal.

Los datos de los que se dispone provienen de medidas puntuales en distintas secciones (Figura 1) y no de transectos en una sección determinada. Aún así, debe considerarse que el registro temporal que se tiene es bastante amplio (casi tres años de información), lo que da una visión completa de la evolución temporal de la circulación estuarina.

La estructura del trabajo es la que se detalla a continuación: presentación del área de estudio en la Sección 2; exposición de materiales y método en la Sección 3; estudio de los mecanismos que originan la circulación secundaria, tanto en aguas bajas como en avenidas, en la Sección 4, cuya visión en conjunto se discute en la Sección 5. El trabajo se termina con las conclusiones y las futuras líneas de investigación, Secciones 6 y 7 respectivamente.

## 2. Área de Estudio

El del Guadalquivir es un estuario positivo, templado y bien mezclado en condiciones normales, que desem-

boca en el Golfo de Cádiz (Figura 1). Se trata de un estuario mesomareal, en donde la constituyente armónica más energética es la semidiurna  $M_2$  con un período  $T_{M_2}=12.42$  horas. Su cauce natural se ha visto altamente modificado durante los últimos dos siglos, mediante cortas, trabajos de dragado u ocupación de los llanos mareales. El canal principal de navegación tiene 110 km de longitud, con anchos que varían desde los 800 m en desembocadura hasta los 150 m de cabecera y con una profundidad media de, aproximadamente, 7 m.

De acuerdo con el comportamiento de la onda de marea, el estuario se puede dividir en tres tramos para su estudio (Díez-Minguito et al., 2012): bajo (los primeros 20 km aprox.), intermedio (hasta el km 45 aprox.) y alto. En el primero, a la entrada del estuario, la fricción domina sobre la convergencia (hiposíncrono). En el tramo intermedio la convergencia del cauce y la fricción se equilibran (síncrono). Aguas arriba de este tramo la onda de marea es quasi-estacionaria, al dominar la reflexión en la presa de cabecera (hipersíncrono). La presa de Alcalá del Río, situada en la cabecera del estuario, desempeña un papel muy significativo en la dinámica del sistema, ya que regula en torno al 80% de los aportes de agua dulce que circulan en el estuario; situándose por debajo de los  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  alrededor del 85% de los días del año. De acuerdo con el caudal de descarga de agua dulce  $Q_d$ , se distinguen los siguientes regímenes: *i*) aguas bajas  $Q_d < 40 \text{ m}^3/\text{s}$ ; *ii*) avenidas  $Q_d > 400 \text{ m}^3/\text{s}$ , y *iii*) transición, con valores intermedios entre los anteriores. Es en el régimen de aguas bajas cuando el estuario se encuentra bajo el dominio de los efectos mareales (Díez-Minguito et al., 2012).

La caracterización básica de la hidrodinámica estuarina se puede acometer mediante la clasificación propuesta por Hansen and Rattray (1966). Está basada en el cálculo de dos parámetros adimensionales: *i*) parámetro

de circulación y *ii*) parámetro de estratificación. El parámetro de circulación se define como la razón entre la velocidad superficial  $u_s$  y la velocidad promediada en la columna de agua  $U_{col}$ . En los estuarios bien mezclados o con un débil flujo neto entrante, este parámetro es cercano a la unidad. En cambio, en aquellos estuarios en donde haya un importante intercambio de masas de agua,  $U_{col}$  será pequeño. Cuanto mayor sea el parámetro de circulación, mayor será la circulación baroclina. Respecto al parámetro de estratificación, éste se define como la ratio de la diferencia de salinidad del fondo con respecto a la superficie  $\delta s$  entre la salinidad media de la sección  $S_0$ . Lo normal es que este parámetro sea inferior a la unidad. Cuanto menor sea la estratificación, menor será el parámetro de estratificación. Las distintas regiones que nos permite identificar el diagrama son *i*) Tipo 1, sin estructura vertical en el flujo, *ii*) Tipo 2, en donde se desarrolla circulación baroclina; dándose en 2a situaciones con mayor mezcla y en 2b las fuertemente estratificadas y *iii*) Tipo 3, en donde la circulación gravitacional es máxima. Cuanto más cerca de la región Tipo 3, mayor será el transporte advectivo del flujo de sal; y cuanto más cerca de la región Tipo 1, mayor será el transporte difusivo.

En el Guadalquivir se ha elaborado este diagrama en base a las localizaciones de los correntímetros, tanto para régimen de aguas bajas como de avenidas. Una vez obtenidos los valores en cada ciclo mareal, se promedia para que los resultados queden más claros, como se ilustra en la Figura 2. Se observa que los tramos bajo y medio poseen un mayor parámetro de estratificación durante avenidas que en aguas bajas. Además, como comportamiento general, el parámetro de circulación es mayor cuanto más cerca estemos de la desembocadura. Este incremento se nota especialmente durante el régimen de avenidas en el instrumento más próximo a la desembocadura, lo que está relacionado con un incremento de la circulación baroclina. Si analizamos el tramo superior, su posición en el diagrama (menor parámetro de estratificación y circulación) es consistente con su situación respecto a la presa de cabecera (menores estratificación e intercambio de masas de agua). En régimen de aguas bajas, el estuario se encuentra en la región 2a. En régimen de avenidas, pasa de la 3b y 2b en el tramo bajo e intermedio hasta la 2a en el tramo superior. Los resultados presentados en este diagrama hacen necesario que se tenga que llevar a cabo una división en nuestro estudio, según nos encontremos en régimen de aguas bajas o de avenidas.

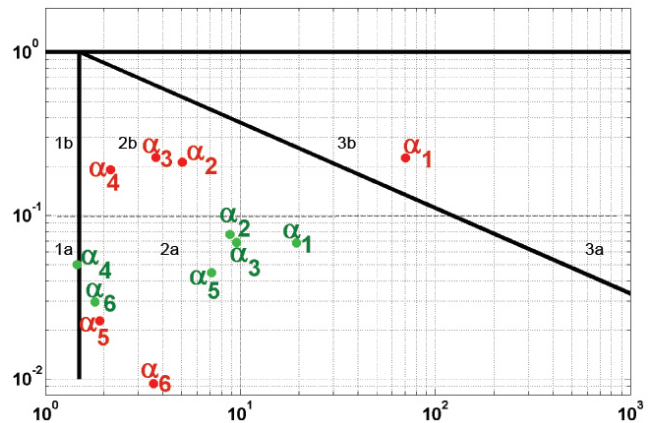


Figura 2: Diagrama de Hansen and Rattray (1966) con la localización de los correntímetros (Figura 1) de los distintos tramos. Durante el régimen de aguas bajas (puntos color verde) el estuario se encuentra bien mezclado (Tipo 2a), mientras que en avenidas (puntos color rojo) los tramos bajo e intermedio están más estratificados (Tipo 3b y 2b)

### 3. Materiales y Método

#### Materiales

La RMTR estuvo desplegada entre los años 2008 y 2011 a lo largo del curso principal del estuario y la plataforma continental de Chipiona. La instrumentación instalada en el interior del estuario se distribuyó tal y como se muestra en la Figura 1. El nivel del mar se registró con diez mareógrafos (indicados con  $\beta$ 's), que almacenaban la información de la sobre elevación de la lámina de agua cada diez minutos. La velocidad de la corriente se ha obtenido a partir de seis correntímetros ( $\alpha$ 's), registrando valores en toda la columna de agua cada quince minutos. La conductividad, temperatura y turbidez, entre otros, se ha registrado mediante ocho estaciones de calidad ambiental ( $\gamma$ 's) con un periodo de muestreo de treinta minutos. El punto kilométrico 0 está situado en  $\gamma_0$ . El programa de monitorización se completó con: datos diarios de descarga desde la presa de cabecera de Alcalá del Río, proporcionados por la Agencia Andaluza del Agua; datos de viento medidos por la estación meteorológica situada en la plataforma continental de Chipiona, y datos de elevaciones y corrientes registrados en el Puerto de Bonanza, suministrados por Puertos del Estado.

Para identificar la corriente secundaria se transforman los datos de velocidad este y norte a corrientes longitudinales y transversales respecto a la sección. Para ello, se proyectan dichas corrientes conforme a la orientación del cauce en el punto de estudio. Estos valores nos servirán para, a continuación, establecer la proyección definitiva de las corrientes según estemos

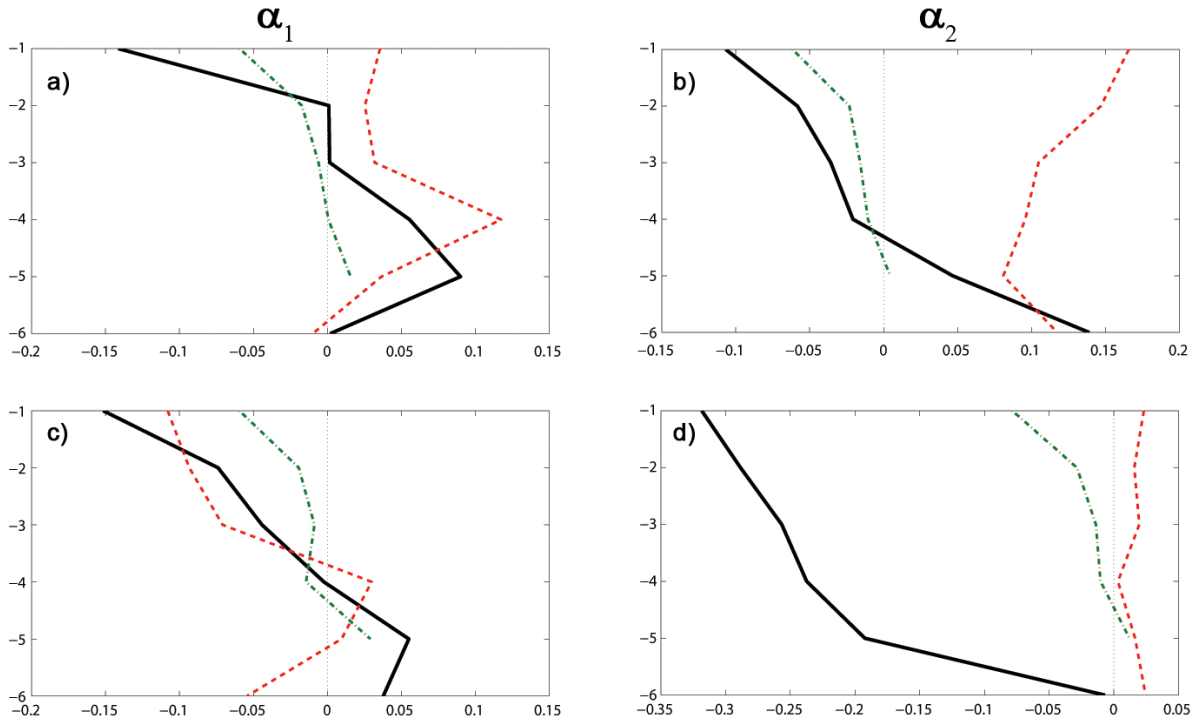


Figura 3: Perfiles promedio de velocidad (m/s) frente a profundidad (m) en los correntímetros  $\alpha_1$  (Paneles a y c) y  $\alpha_2$  (Paneles b y d), durante régimen de aguas bajas (Paneles a y b) y de avenidas (Paneles c y d). En la corriente longitudinal (trazo color negro) los valores positivos se dirigen hacia aguas arriba. En la corriente transversal (trazo color rojo discontinuo) los valores positivos se dirigen hacia la margen derecha (sección vista desde desembocadura hacia cabecera). En la corriente vertical (trazo color verde discontinuo) los valores positivos se dirigen hacia la superficie libre. No hay datos de corriente vertical a la profundidad de 6 m.

en fase llenante o vaciante dentro del ciclo de marea. Para este fin, se hace uso de las rosas de corriente calculadas en cada instrumento. El presente estudio se centra en el análisis de los correntímetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , que identifican el tramo inferior y medio, cuyos puntos kilométricos (desde la desembocadura) son 14.3 y 20.8, respectivamente. Las principales escalas de trabajo son promedios mareales de período  $T_{M2}=12.42$  horas, y las de mareas vivas-muertas dentro del régimen de aguas bajas (del 30-Jul-2008 al 05-Sep-2008). Respecto al régimen de avenidas, durante el tiempo que estuvo desplegada la red de monitorización se registraron dos picos de descarga, que son los que sirven de base a nuestro análisis. Mientras que en una hay datos de corrientes, pero no de salinidad ni de densidad (del 04-Feb-2009 al 11-Feb-2009), en la otra ocurrió justo lo contrario (del 18-Abr-2008 al 25-Abr-2008). El comienzo de la avenida en la que hay datos de corriente coincide con marea muerta; mientras que en la que hay datos de salinidad y densidad lo hace con marea viva.

A la hora de interpretar determinados aspectos relacionados con la evolución de las márgenes, se incluye

el análisis de las imágenes del vuelo fotogramétrico de 1956 con otras tomadas vía satélite más actuales (año 2010). El objetivo es estudiar las posibles implicaciones morfológicas en la circulación, mediante la observación de una escala temporal superior a la que nos ofrece la RMTR.

#### Método

Para conocer los mecanismos que originan la circulación secundaria, debemos examinar la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, que en coordenadas polares y referida a la sección transversal queda como [Kalkwijk and Booij (1986); Valle-Levinson (2010)]:

$$\underbrace{\frac{\partial u_n}{\partial t}}_1 + \underbrace{u_s \frac{\partial u_n}{\partial s}}_2 + \underbrace{f u_s}_3 - \underbrace{\frac{u_s^2}{R}}_4 + \underbrace{g \frac{\partial \eta}{\partial n}}_5 = \underbrace{-\frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial n} dz}_6 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial u_n}{\partial z} \right)}_7 \quad (1)$$

En donde  $s$ ,  $n$  y  $z$  son las coordenadas longitudinal (*streamwise*), transversal (*normal*) y vertical, respectivamente. De esta manera,  $u_n$  es la corriente lateral,  $u_s$  la corriente longitudinal,  $f$  el parámetro de Coriolis,  $R$  el radio de curvatura del flujo,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\eta$  la sobreelevación de la lámina de agua,  $\rho$  la densidad y  $N_z$  la viscosidad de remolino. Los distintos términos representan: (1) variación local de la corriente transversal, (2) aceleración advectiva de la corriente transversal debida a la corriente longitudinal, (3) aceleración de Coriolis, (4) aceleración centrífuga, (5) gradiente barotrópico de presiones, (6) gradiente baroclino de presiones y (7) gradiente vertical de tensiones. A partir de esta formulación son muchos los autores [Chant and Wilson (1997); Lerczak and Rockwell Geyer (2004); Valle-Levinson (2010)] que coinciden en que los principales mecanismos que pueden originar la circulación secundaria son tres: advección diferencial (originada por el gradiente baroclino de presiones), los efectos de la rotación terrestre (aceleración de Coriolis) y la curvatura del flujo (aceleración centrífuga). Como se desarrolla a lo largo del trabajo, no se dispone de la suficiente información para resolver cada término de la Ecuación 1. La manera de suplir esta deficiencia es mediante el escalado de la ecuación de momento (Apéndice A). Del análisis dimensional resultan los números adimensionales de Ekman ( $E_k$ ) y Rossby ( $Ro$ ), que nos muestran la importancia relativa de los términos de fricción y advección frente a la aceleración de Coriolis. A parte de éstos, se estudian otros que nos ayudan a identificar los mecanismos que condicionan la hidrodinámica transversal en el estuario [(Valle-Levinson (2011); Winant (2008)].

La importancia relativa entre rotación y circulación residual se estudia con la fricción vertical de escala  $\delta$ , que se define como  $\delta = \sqrt{2N_z/\omega H^2}$ , en donde  $\omega$  es la frecuencia de la marea y  $H$  la profundidad de la columna de agua. La anchura dinámica del sistema se representa a través del número de Kelvin  $Ke = B/R_i$ , en donde  $B$  es la mitad de la anchura de la sección y  $R_i$  el radio interno de deformación. Por último, se analiza el número de Reynolds estuarino  $Re = Ro/Ek$ .

## 4. Resultados

### 4.1. Régimen de Aguas Bajas

Se analizan los perfiles promedio de velocidad longitudinal, transversal y vertical. La Figura 3 (Paneles a y b) muestra los correspondientes al tramo inferior  $\alpha_1$  y medio  $\alpha_2$ . En ambos aparatos se ve cómo el promedio de la velocidad transversal en superficie es del mismo

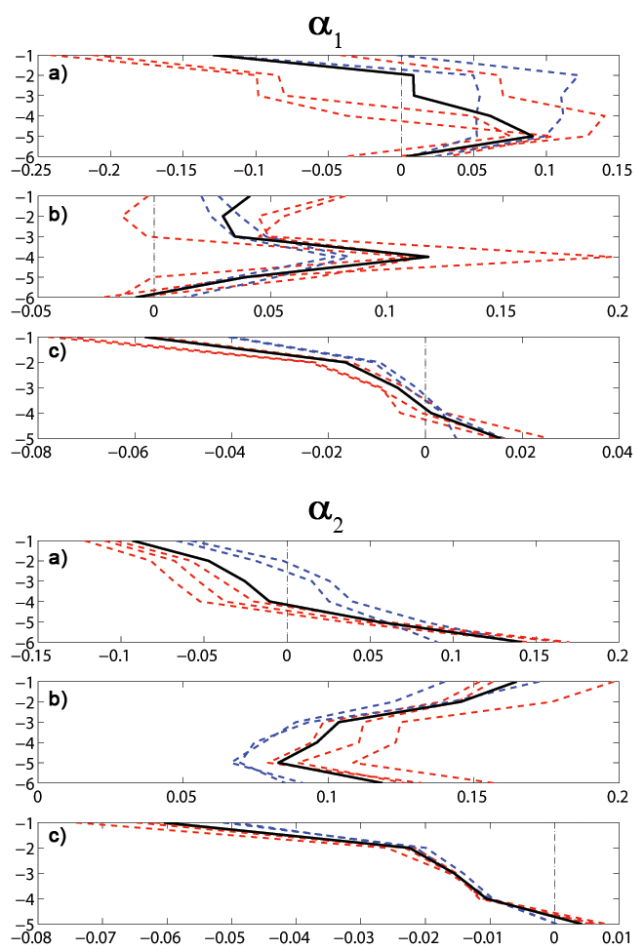


Figura 4: Perfiles promedio de velocidad (m/s) frente a profundidad (m) en  $\alpha_1$  (Paneles superiores) y  $\alpha_2$  (Paneles inferiores). Corrientes longitudinal (Panel a), transversal (Panel b) y vertical (Panel c) en mareas vivas (trazo color rojo discontinuo) y muertas (trazo color azul discontinuo).

orden de magnitud que la longitudinal ( $O \sim 0.1m/s$ ); mientras que la velocidad vertical es inferior a ambas ( $\sim 0.05m/s$ ). En  $\alpha_1$  todas estas velocidades tienden a ser nulas en el fondo, mientras que en  $\alpha_2$  sólo lo es la componente vertical. Para los dos instrumentos, la velocidad transversal no experimenta cambio de signo en profundidad, mientras que la longitudinal y transversal sí lo sufren.

A continuación se estudian estos perfiles en respuesta a los ciclos de mareas vivas y muertas (Figura 4), debido a la importancia que estas variaciones ejercen sobre la dinámica estuarina (Elston, 2005) y en particular en la del estuario del Guadalquivir (Díez-Minguito et al., 2012). El comportamiento es sensiblemente diferente dependiendo de la ubicación. Respecto al



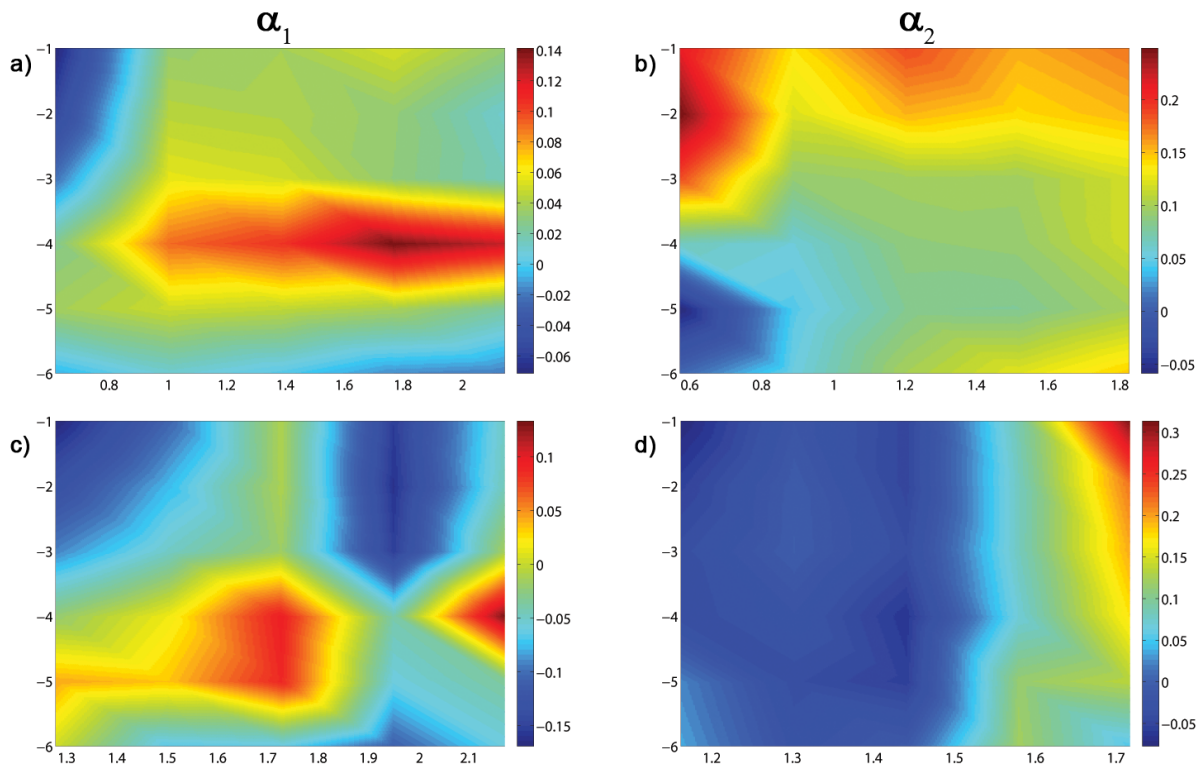


Figura 5: Corriente transversal (m/s) frente a profundidad (eje y, m) y carrera de marea (eje x, m) en los correntímetros  $\alpha_1$  (Paneles a y c) y  $\alpha_2$  (Paneles b y d) durante régimen de aguas bajas (Paneles a y b) y de avenidas (Paneles c y d). Los valores positivos de corriente se dirigen hacia la margen derecha (sección vista desde desembocadura hacia cabecera). La intensidad de la corriente se indica en la barra de cada panel.

aparato  $\alpha_1$ , las corrientes transversal y vertical disminuyen en toda la columna de agua en mareas muertas. No ocurre así con la velocidad longitudinal, que disminuye en superficie y aumenta en profundidad, exhibiendo el típico perfil baroclino de velocidad (Officer et al., 1976). Este efecto en la corriente longitudinal puede estar relacionado con una mayor estratificación durante este período.

En  $\alpha_2$  las corrientes longitudinal, transversal y vertical disminuyen en mareas muertas. En esa misma figura (Panel inferior a, Figura 4), se observa cómo el punto de velocidad nula de la corriente longitudinal se encuentra más próximo a la superficie durante mareas muertas. Siguiendo el esquema clásico de circulación propuesta por Officer et al. (1976) e incluyendo una variación lineal de la densidad con respecto a la profundidad (Apéndice B), este comportamiento en la corriente longitudinal se puede explicar por un aumento de la estratificación durante mareas muertas. Esta variación en la componente longitudinal de velocidad entre ciclos de mareas vivas-muertas en  $\alpha_2$  también se puede apreciar en la circulación transversal, como se indica

en la Figura 5 (Panel b), en donde se representa la carrera de marea frente a la velocidad transversal en toda la columna de agua (Chant, 2002). Más en concreto, para el correntímetro  $\alpha_2$  del que estamos hablando, se distingue una celda de circulación con un giro horario (mirando hacia cabecera) en mareas muertas, con carreras de marea de hasta 0.9 m. Con valores superiores, este esquema no se conserva. En  $\alpha_1$  no se distingue una estructura clara, si bien a la profundidad de 4 m las corrientes presentan un máximo de velocidad independientemente del valor de la carrera.

Para profundizar en este estudio de la circulación secundaria se deben analizar, en la medida que los datos nos lo permiten, los principales mecanismos que intervienen en su formación, a saber: la curvatura del flujo, la advección diferencial y los efectos de la rotación terrestre.

#### Curvatura en el flujo

La curvatura en el flujo afecta considerablemente a la circulación secundaria. El típico esquema helicoidal resulta en un flujo superficial hacia el exterior de la curva

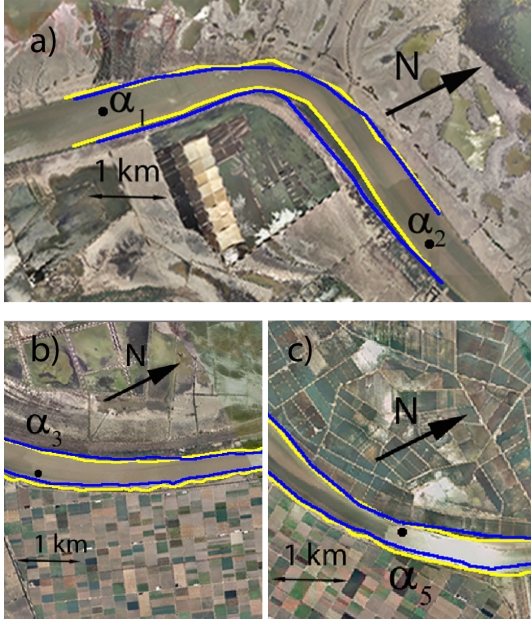


Figura 6: Panel a): Tramo curvo entre  $\alpha_2$  y  $\alpha_1$ , con un radio de curvatura de 2600 m. Paneles b) y c): Tramos curvos correspondientes a los correntímetros  $\alpha_3$  y  $\alpha_5$ , respectivamente. La línea azul muestra la situación en el año 1956 y la amarilla la actual. Elaboradas a partir de ortofotos del Instituto Geográfico Nacional.

y hacia el interior en el fondo [Geyer (1993); Valle-Levinson (2010)]. Si entra en juego el gradiente de densidad, la circulación será mayor o menor dependiendo del grado de estratificación en el tramo curvo (Lerczak and Rockwell Geyer, 2004).

El estudio de la circulación en un tramo curvo se puede acometer a través de la Ecuación 1. Considerando fluido homogéneo, promediando en la columna de agua y despreciando la tensión del viento en superficie, se tiene (Kalkwijk and Booij, 1986):

$$u_s \frac{\partial u_n}{\partial s} = \frac{u_s^2 - \bar{U}_s^2}{R} - f(u_s - \bar{U}_s) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial u_n}{\partial z} \right) - \frac{\tau_b}{\rho H} \quad (2)$$

En donde  $\bar{U}_s$  es la velocidad longitudinal promediada en la sección y  $\tau_b$  la tensión tangencial en el fondo, expresada como  $\tau_b = \rho C_D \bar{U}_s |\bar{U}_s|$ , con un valor de  $C_D = 2.5 \cdot 10^{-3}$  (Díez-Minguito et al., 2012). En un principio, los correntímetros  $\alpha_3$  y  $\alpha_5$  son candidatos para el estudio de la Ecuación 2 ya que se encuentran en pleno tramo curvo. Comparado la situación actual de las márgenes con la que aparece en el vuelo fotogramétrico de 1956 (Figura 6, Paneles b) y c), se observa cómo el exterior de las curvas se ha erosionado significativamente en estos 50 años, migrando las márgenes en esta dirección. Si bien el perfil promedio de velocidad de  $\alpha_3$  puede ser

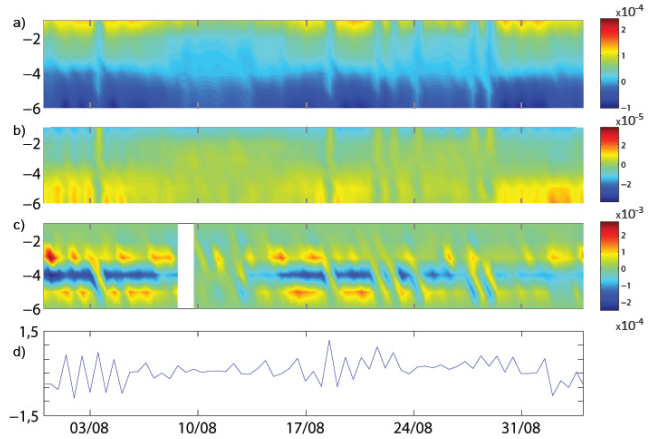


Figura 7: Balance transversal de momento en el tramo curvo, representado por los términos centrífugos (Panel a), de Coriolis (Panel b), de intercambio viscoso turbulento (Panel c) y de fricción (Panel d). El espacio en blanco en el Panel c se debe a la obtención de valores fuera de rango de  $N_z$ .

coherente con el esquema de circulación helicoidal, el de  $\alpha_5$  no. Esto puede deberse a la posición relativa que ocupan los instrumentos dentro de la sección, con  $\alpha_3$  situado cerca del exterior de la curva y con  $\alpha_5$  más próximo al interior. No obstante, la ubicación de estos correntímetros, muy distante del tramo bajo, hace que su análisis quede fuera del objetivo de este trabajo.

Así pues, se estudia la dinámica del tramo curvo existente entre  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  (Figura 6, Panel a). Cada uno de los términos de la Ecuación 2 se ha calculado numéricamente en *cada instante* (período de muestreo) promediando, posteriormente, en un ciclo de marea. El valor de  $N_z$  en el tramo curvo se ha cogido como el correspondiente al del  $\alpha_2$ , además de asumirse constante en la columna de agua. El resultado es el que se ilustra en la Figura 7. El término más importante es el que representa el flujo vertical de intercambio de momento por fricción ( $O \sim 10^{-3}$ ). A éste le sigue el de la aceleración centrífuga y el de la tensión tangencial en el fondo ( $O \sim 10^{-4}$ ). El efecto de Coriolis es inferior al resto ( $O \sim 10^{-5}$ ), tal y como indica el número de Rossby en la curva ( $\sim 1$ ) (Chant, 2002). Respecto al término que representa la aceleración centrífuga, aunque su orden de magnitud es coherente con el de otros estudios (Elston, 2005), su importancia relativa no es tan grande como la morfología de las márgenes habría hecho esperar. Esto puede deberse tanto a la sensibilidad de los resultados a la hora de estimar  $N_z$  y  $C_D$  [Geyer (1993); Chant and Wilson (1997); Elston (2005)] como a los efectos de escala derivados del promedio que estamos realizando (promedio mareal).

No obstante, el término advectivo resultante va a tener un comportamiento similar al que introduce el término viscoso. Este efecto puede ser el responsable de que, en el  $\alpha_1$ , se registren los picos de velocidad transversal y longitudinal a la profundidad de  $\sim 4$  m (Figuras 3 y 7), aunque este hecho también pueda estar relacionado con la existencia de corrientes de turbidez. De esta manera, se observa cómo la circulación secundaria, a través de la inclusión de los términos advectivos en la ecuación de momento, afecta decisivamente a la estructura del campo de velocidades aguas abajo del tramo curvo (Chant and Wilson, 1997). Sin embargo, en este análisis se ha dejado de lado tanto los efectos de la estratificación como la inclusión del término baroclino transversal de presiones (miembro 6 Ecuación 1) del que hablamos a continuación.

El que la corriente tienda a ser más rápida en la parte central del canal que en las márgenes genera un gradiente de salinidad dentro de una sección. Este mecanismo de escala intramareal es de los más influyentes en la circulación secundaria, conocido como advección diferencial. Si bien no se puede construir este campo de densidades dentro de una sección con los datos disponibles, como se hace en otros trabajos (Lacy et al., 2003), sí podemos estudiar sus efectos en la distribución de las velocidades dentro de la misma (Figura 8). Durante la fase de llenante, el agua de la parte central viaja más rápido y con mayor salinidad que la de las márgenes. Sin embargo, este agua más densa tiende a hundirse, siendo reemplazada por la de las márgenes. Así pues, se forman unas celdas de circulación convergente en superficie. Lo contrario ocurre durante la fase vaciante, con celdas divergentes en superficies. Por ver este fenómeno, se muestran en este trabajo algunos resultados preliminares de una campaña de transectos realizada en el Guadalquivir (Figura 8) en Junio de 2012. Se trata de una sección situada dentro de un tramo curvo, cercana a  $\gamma_3$  (Figura 1) y cuya duración fue de  $\sim 7$  horas, registrando una fase de llenante entera y parte de la vaciante. Acorde con la fecha de la toma de datos, se supondrá que la medida se hizo en régimen de aguas bajas. Aunque se esté estudiando un tramo curvo, en donde la circulación secundaria se ve condicionada por diversos mecanismos (Sección 4.1), somos capaces de apreciar, durante un corto intervalo de tiempo, la formación de estas celdas de circulación. Mucha información queda pendiente de obtener a partir de los datos de esta campaña, esperando que aporten un nuevo conocimiento acerca de la circulación estuarina tal y como se han hecho en otros trabajos [Chant (2002); Lacy et al. (2003); Elston (2005)]

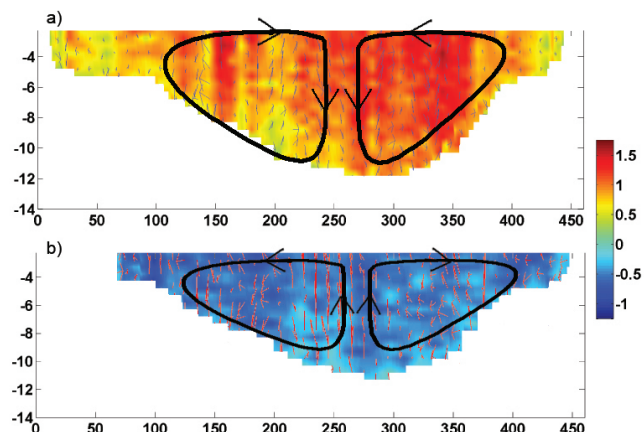


Figura 8: Sección en tramo curvo durante un instante en fase llenante (Panel a) y vaciante (Panel b). Profundidad y longitud en metros. Intensidad de la velocidad en m/s. Las flechas (azul y rojo) indican la composición de las velocidades transversal y vertical. Durante fase llenante, se aprecia la convergencia en superficie, mientras que en vaciante se observa divergencia (flechas negras).

#### Rotación terrestre

El estudio global de la rotación abarca la interacción de Coriolis tanto con la circulación secundaria como con el gradiente de densidad (Ecuación 1). Esta aceleración de Coriolis produce asimetría en la distribución de la circulación dentro de la sección, desviando la trayectoria de las masas de agua hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Sur.

De acuerdo con Valle-Levinson (2011), la influencia de la rotación terrestre sobre la circulación estuarina viene condicionada por la batimetría, ya sea tanto por la profundidad como por la anchura dinámica. Para este estudio es necesario evaluar la importancia de la fricción, que se hace a través del término de viscosidad turbulenta  $N_z$ . Siguiendo la formulación de Reyes-Merlo et al. (2013), para situaciones de mezcla completa, sin tensión originada por el viento de superficie y permitiendo el movimiento horizontal en el fondo, se ha calculado la viscosidad turbulenta para el período de aguas bajas. Aunque sean valores relativamente bajos ( $O \sim 10^{-3}$ ), son un buen indicativo de la tendencia de esta fricción a lo largo del estuario. Los resultados promediados en aguas bajas de la Tabla 1 muestran cómo esta viscosidad disminuye cerca de la desembocadura, lo que estaría relacionado con una mayor estratificación de la columna de agua.

La importancia relativa entre rotación y circulación residual viene dada, principalmente, por la fricción de escala en vertical  $\delta$ ; que indica el tamaño de la columna de agua que se ve influenciada por la fricción y cuyos



	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
$Nz_{ab}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$6.9 \cdot 10^{-4}$
$Nz_{av}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$
$\delta_{ab}$	0.52	0.58	0.61	0.57	0.44	0.45
$\delta_{av}$	0.23	0.33	0.23	0.37	0.44	0.14
$Ek_{ab}$	0.22	0.27	0.30	0.26	0.16	0.16
$Ek_{av}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$8.7 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$
$Ke_{ab}$	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.26
$Ke_{av}$	0.14	0.15	0.16	0.22	0.59	0.41
$Ro_{ab}$	4.3	3.6	0.6	2.2	6.8	0.3
$Ro_{av}$	4.6	11	6.0	6.7	17	6.8
$Re_{ab}$	20	13	2.1	8.4	44	1.6
$Re_{av}$	105	123	141	61	108	439

Tabla 1: Valores promediados de viscosidad turbulenta  $Nz$ , fricción de escala vertical  $\delta$ , Ekman  $Ek$ , Kelvin  $Ke$ , Rossby  $Ro$  y Reynolds estuarino  $Re$  para régimen de aguas bajas  $ab$  y de avenidas  $av$ .

valores se indican en la Tabla 1. Este parámetro es mayor en el tramo medio, siendo levemente inferior tanto en cabecera como en desembocadura. Si bien los valores de fricción moderada ( $\delta \sim 0.5$ ) en el estuario indican que Coriolis puede contribuir en la creación de celdas de circulación dentro la sección, es difícil encontrar en la naturaleza casos en donde las corrientes residuales se vean mayormente dominadas por los efectos de la rotación terrestre. Por ejemplo, aunque nos encontremos en cuencas anchas y profundas (i.e. Fiordos), los mecanismos de circulación se verán más condicionados por el viento o el gradiente de densidad (Valle-Levinson, 2011).

Siguiendo con Coriolis, para comparar la rotación y los flujos originados por gradientes de densidad, se deben estudiar dos números adimensionales: Ekman  $Ek$  y Kelvin  $Ke$ . Las distintas combinaciones de estos números pueden aportar valiosa información sobre la distribución del flujo dentro de la sección. Cuando la fricción es baja ( $Ek \sim 0.001$ ) la estructura del flujo será bicapa para cuencas dinámicamente estrechas ( $Ke < 1$ ) y con gradiente lateral en cuencas dinámicamente anchas ( $Ke > 1$ ). Cuanto más estrecha es la cuenca, menor será el efecto de la rotación en la circulación longitudinal pero sí podrá influir en la circulación secundaria. Para valores intermedios de fricción ( $Ek \sim 0.1$ ), el flujo es principalmente bicapa; más asimétrico cuanto mayor es  $Ke$ . Esto significa que, a más anchura, más se hacen notar los efectos de la rotación. Para valores altos de fricción ( $Ek \geq 1$ ), la circulación es fundamentalmente de gradiente lateral independientemente del ancho; es decir, sin que la aceleración de Coriolis intervenga en los mecanismos de circulación. Como se desprende de los resultados de la Tabla 1; durante el período de aguas bajas nos encontramos con un estuario dinámicamente estrecho ( $Ke \sim 0.1$ ) y con valores intermedios de fricción ( $Ek \sim 0.2$ ). De hecho, es la situación en la que se enmarca gran parte de los estuarios; donde

el patrón de circulación longitudinal es bicapa (Valle-Levinson, 2011).

El último punto a estudiar con respecto a Coriolis consiste en analizar la influencia que las corrientes residuales (representadas por los términos advectivos en la ecuación de conservación de momento) tienen sobre la circulación longitudinal y lateral que se genera por gradientes de densidad. Para ello se analiza el número de Reynolds estuarino  $Re$ . En este caso, la importancia relativa de la fricción con respecto a la advección puede evaluarse a través del esquema desarrollado por Cheng and Valle-Levinson (2009). La advección es más importante ( $Re > 1$ ) cuando la fricción es pequeña (bajo  $Ek$ ) y la cuenca es profunda y estrecha ( $H/B > \sim 0.01$ ), con valores altos de  $Ro$ ; resultando en perfiles bicapa. La fricción dominará sobre la advección cuando se dé la situación contraria, ( $Re < 1$ ), ( $H/B < \sim 0.003$ ) y alto valor de  $Ek$ , produciéndose perfiles de gradiente lateral. Coriolis tendrá mayor influencia cuando  $Ro$  y  $Ek$  sean pequeños. Siendo el del Guadalquivir un estuario estrecho y, de acuerdo con los valores intermedios de  $Ek$  y altos de  $Ro$  ( $Ro \sim 4$ ) y  $Re$  ( $Re \sim 10$ ), la advección lateral domina sobre la fricción, jugando Coriolis un papel secundario dentro de la ecuación de balance de momento. El papel que desempeña esta advección es doble: incrementar la circulación lateral y la circulación gravitacional. No obstante, esta relación entre advección y fricción se cree que puede cambiar dependiendo de donde nos encontremos, tal y como se ha tratado en el tramo curvo.

#### 4.2. Régimen de avenidas

Para estudiar el régimen de avenidas, se siguen básicamente los mismos pasos que para el régimen de aguas bajas (Sección 4.1). Los resultados se obtienen a partir del estudio de dos descargas. Señalar que, mientras una comienza en marea muerta y se registran valores de densidad pero no de corriente, en la otra

sucede justo lo contrario. Aún así, se puede suponer un comportamiento promedio similar durante ambas avenidas ya que recogen la variabilidad muertas-vivas, dado que su duración aproximada es de 7 días. Por tanto, cuando se calculan ciertos números adimensionales y otros parámetros de interés promediados en este régimen, se asumirá que la corriente, densidad y salinidad pertenecen a una misma descarga.

Los perfiles promedios de velocidad para el tramo medio y bajo son los correspondientes a la Figura 3 (Paneles c y d). Como se puede observar, la magnitud de la corriente longitudinal y transversal es prácticamente la misma en superficie en  $\alpha_1$ , tanto para período de aguas bajas como de avenidas ( $O \sim 0.1m/s$ ); aunque el sentido de la velocidad transversal cambia en casi toda la columna de agua. En fondo, las corrientes son no nulas ( $\sim 0.05m/s$ ), comportamiento distinto del observado en el régimen de aguas bajas. En el tramo intermedio representado por el correntímetro  $\alpha_2$  la magnitud de la corriente longitudinal aumenta considerablemente en superficie durante avenidas ( $\sim 0.3m/s$ ), mientras que la corriente transversal se anula prácticamente en toda la columna de agua. Las velocidades verticales, para ambos aparatos, siguen el mismo comportamiento que en régimen de aguas bajas. El cambio que experimenta tanto el perfil longitudinal como transversal de velocidad en  $\alpha_2$  cuando se pasa del régimen de aguas bajas a avenidas puede deberse a la influencia del caño mareal (Brazo de la Torre, Figura 1) situado aguas arriba. En aguas bajas, la circulación de este caño afectaría más a la dinámica del canal principal (mayor magnitud en la circulación transversal en  $\alpha_2$ ), siendo menos significativa durante avenidas.

Respecto a la relación existente entre velocidad y carrera de marea (Figura 5), en  $\alpha_1$  parecen distinguirse dos celdas de circulación (giro antihorario en superficie y horario en profundidad, mirando hacia cabecera) hasta un valor de carrera de 1.7 m. En el correntímetro  $\alpha_2$  no llega a formarse ninguna celda de circulación; aunque sí se distingue un drástico cambio en el sentido de las corrientes del perfil transversal, pasando de ser negativo a positivo con un valor de carrera de marea de 1.5 m.

Para estimar los efectos de la fricción a través de  $N_z$  no se puede seguir el mismo procedimiento que para el período de aguas bajas, ya que no cumplen una hipótesis básica de partida como la estacionariedad de la corriente dentro del ciclo mareal. El correcto cálculo de  $N_z$  en el período de avenidas debe incluir los efectos de la estratificación, lo que se hace a través de un factor de corrección (Dyer, 1997). El nuevo valor de la viscosidad está relacionado con la del período de aguas bajas

$N_0$  (sin estratificación) según la siguiente expresión:

$$N_z = N_0 (1 + 10R_{ig})^{-1/2}$$

En donde  $R_{ig}$  es el número adimensional de Richardson de gradiente  $R_{ig} = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} / \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$ ; que representa el cociente de las fuerzas estabilizadoras por estratificación entre las desestabilizadoras introducidas por el gradiente de velocidades. Los valores de viscosidad en avenidas (Tabla 1) son menores en el tramo bajo (efecto de la estratificación) y mayores conforme más nos adentramos en el tramo medio-alto. También son menores en el tramo más alto, debido a una considerable disminución del gradiente de velocidad en el perfil de corriente (perfil casi vertical de velocidades).

La ratio entre rotación y circulación residual viene dada a través de la fricción de escala vertical  $\delta$ . Como se desprende de la Tabla 1, los valores son menores en avenidas ( $\delta \sim 0.2$ ) que en aguas bajas. Esto podría provocar una mayor influencia de Coriolis en la circulación longitudinal, aunque no tan relevante en la transversal. Respecto a la relación de la rotación terrestre con los flujos originados por el gradiente de densidad, se analizan los números de Ekman y Kelvin, incluidos en la Tabla 1. Los valores bajos de  $Ek$  ( $Ek \sim 5 \cdot 10^{-2}$ ) y  $Ke$  ( $Ke \sim 0.1$ ) en tramo bajo y desembocadura (por efecto de la estratificación, principalmente) están en consonancia con la existencia de un flujo bicapa. La interacción entre circulación residual, gradientes de densidad y rotación, se evalúa con el número de Reynolds estuarino ( $Re \sim 100$ ) y de Rossby ( $Ro \sim 8$ ), recogidos en la Tabla 1. El bajo valor de  $Ek$ , y los altos valores de  $Ro$  y  $Ke$  parecen indicar que la advección lateral juega un papel crucial en la circulación secundaria.

El análisis de la curvatura del flujo y su influencia en la circulación secundaria no se ha podido acometer por la falta de datos dentro del período de estudio (desfase temporal entre datos de velocidad y de densidad). Lo mismo sucede con la advección diferencial.

Señalar que en régimen de avenidas la circulación secundaria puede ser más sensible al efecto de la estratificación. El papel que desempeña esta estratificación puede ser tanto el de potenciar la circulación secundaria (condiciones de baja estratificación) como el de disminuirla (condiciones de alta estratificación) (Valle-Levinson, 2010).

## 5. Discusión de Resultados

El análisis de las series temporales muestra una variación en el comportamiento de la circulación secun-

daria dependiendo de si nos encontramos en régimen de aguas bajas o de avenidas.

Durante aguas bajas, las velocidades transversales son del mismo orden que las longitudinales. Se aprecian celdas de circulación en el tramo medio en mareas muertas; aunque éstas tienden a desaparecer cuando la carrera de marea aumenta. Durante avenidas, mientras que en el tramo medio se reducen sustancialmente las corrientes transversales, no ocurre así en el tramo bajo, en donde siguen siendo del mismo orden que las longitudinales. Es más, los resultados parecen indicar la existencia de dos celdas de circulación en el tramo bajo durante avenidas. Estas celdas desaparecen cuando la carrera de marea es mayor, al igual que en otros estuarios (Chant, 2002). Además, del comportamiento de los perfiles de corriente se desprende que la influencia de los caños mareales puede ser significativa en la dinámica durante el período de aguas bajas, pasando a ser menos relevante durante avenidas. Esto podría explicar la disminución de la corriente transversal en el correntímetro  $\alpha_2$  en dicho régimen. Para intentar comprender este comportamiento en la circulación secundaria, se han analizado los principales mecanismos que la originan: curvatura en el flujo, advección diferencial y rotación terrestre.

Si bien en ambos tramos la influencia de Coriolis puede ser no despreciable, parece que son otros los mecanismos más relevantes en la formación de las corrientes laterales, tales como la advección lateral y la fricción. Este hecho se ha podido contrastar tras el estudio de los efectos de la curvatura en el flujo en un tramo curvo entre  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , durante el régimen de aguas bajas. Un balance de la ecuación de momento entre aceleración centrífuga, Coriolis y fricción muestra cómo ésta última condiciona la estructura de la circulación transversal, muy por encima de los demás mecanismos. Esto resulta en que los términos advectivos son no nulos, lo que explicaría la estructura del campo de velocidades en  $\alpha_1$ , situado relativamente lejos de la curva (Geyer, 1993).

Aunque no se disponen de los suficientes datos para acometer este mismo análisis en avenidas, para proceder de forma similar se debería incluir, en el balance anterior, un nuevo término derivado de la estructura del campo de densidades: la advección diferencial. A pesar de que los estudios confirman que la circulación secundaria disminuye fruto de una mayor estratificación [Chant and Wilson (1997); Valle-Levinson (2010)], tal y como sucede en el  $\alpha_2$ ; no ocurre así en  $\alpha_1$ , en donde se generan, incluso, dos celdas de circulación. Esto nos hace pensar que, a pesar del incremento en la estratificación durante avenidas, el considerable aumento de la

corriente longitudinal aguas arriba de  $\alpha_1$  (tal y como se registra en  $\alpha_2$ ) y la existencia del tramo curvo propician que los términos advectivos que generan la circulación secundaria sigan siendo más importantes que el gradiente baroclino de presiones, que tendería a disminuirla.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la estructura de la circulación secundaria en el tramo bajo e intermedio del estuario del Guadalquivir en función del régimen de aguas bajas y de avenidas. Para ello se han empleado los datos provenientes de la red de monitorización que estuvo desplegada a lo largo del canal principal durante un período de tres años.

Del campo de velocidades se desprende que la circulación transversal es del mismo orden que la longitudinal en régimen de aguas bajas. Además, esta circulación transversal en el tramo bajo exhibe un comportamiento similar durante avenidas, a pesar de que una mayor estratificación tendería a disminuirla. Los datos también señalan, indistintamente del tramo, la existencia de celdas de circulación que se destruyen para altos valores de carrera de marea.

El estudio de los mecanismos que están detrás de esta circulación secundaria muestra que el tramo bajo viene altamente condicionado por el campo de velocidades del tramo intermedio, en donde tanto los términos advectivos del flujo lateral y longitudinal como la fricción desempeñan un papel crucial.

## 7. Trabajo Futuro

Para profundizar en el conocimiento adquirido acerca de la circulación secundaria se propone la elaboración de transectos transversales durante un ciclo completo de marea, tal y como se hace en otros trabajos (Lacy et al., 2003). Para mejorar el cálculo de  $N_z$  se pueden tener en cuenta otros aspectos en su deducción, como la inclusión de un gradiente de densidad en la sección (Ecuación B.3) o el efecto de la tensión tangencial de viento. Otra manera de completar el estudio de la circulación secundaria deriva del análisis de la dinámica a escala intramareal (fase de llenante y vaciante), en donde se caracterizarían mejor algunos mecanismos relevantes, como la advección diferencial (Lerczak and Geyer, 2004). Con toda esta información y a partir del presente estudio, el fin último es la elaboración de un modelo hidrodinámico completo, que nos ayude en la gestión y toma de decisiones en el estuario del Guadalquivir y que pueda ser adaptado a otros estuarios de similares características. En el Guadalquivir, los

aspectos de interés estarían relacionados con la erosión de las márgenes, el desarrollo de la actividad agrícola y el efecto de los dragados periódicos sobre la circulación estuarina, llevados a cabo por el puerto de Sevilla en el canal principal de navegación.

## 8. Agradecimientos

El estudio está financiado por el MICINN (CTM2009-10520) y por la JA (P09-TEP-4630) y por el convenio de colaboración entre el CSIC (Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía) y las Universidades de Granada y Córdoba, bajo los auspicios de la Autoridad Portuaria de Sevilla. Este trabajo también está financiado por el *Microproyecto #61 CEIBiotic*.

Con un carácter más personal, quisiera dar las gracias a mi tutor D. Manuel Díez Minguito por saber entenderme, aconsejarme y guiarme en muchos aspectos, inmejorablemente, durante todo este tiempo. También quisiera acordarme de mi familia y amigos, que han sabido comprenderme y ayudarme para que este trabajo saliera adelante.

## Apéndice A. Análisis dimensional

La ecuación de conservación de cantidad de movimiento, en coordenadas cartesianas y empleando la aproximación de Boussinesq es, en notación vectorial:

$$\frac{D\bar{V}}{Dt} = \frac{\nabla p}{\rho} - 2\bar{\Omega} \wedge \bar{V} + \bar{g} + \frac{\nabla \bar{\tau}}{\rho} \quad (\text{A.1})$$

En donde las fuerzas por unidad de masa sobre la partícula fluida son: gradientes de presión  $\nabla p/\rho$ ; fuerza de Coriolis  $2\bar{\Omega} \wedge \bar{V}$ , siendo  $\bar{\Omega}$  la velocidad angular de la Tierra;  $\bar{g}$  la aceleración de la gravedad y  $\nabla \bar{\tau}/\rho$  los esfuerzos viscosos. Haciendo uso del promediado de Reynolds y símil turbulento, se puede desarrollar la ecuación anterior para la coordenada  $x$  resultando como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fV \\ &+ N_h \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + N_z \left( \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

en donde  $(U, V, W)$  es el campo de velocidades;  $\rho$  la densidad;  $f$  el parámetro de Coriolis  $f = 2\Omega \sin(\phi)$ , siendo  $\phi$  la latitud, y  $N_h, N_z$  los coeficientes horizontal y vertical de viscosidad turbulenta, respectivamente. Haciendo un escalado de la ecuación anterior, en donde el superíndice \* nota la variable adimensional

y el subíndice  $c$  el valor característico de dicha variable, a partir de la Ecuación A.2 se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{U_c}{t_c} \frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U_c \frac{U_c}{x_c} U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V_c \frac{U_c}{y_c} V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} + W_c \frac{U_c}{z_c} W^* \frac{\partial U^*}{\partial z^*} &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{p_c}{x_c} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + fV_c V^* + N_h \left( \frac{U_c}{x_c^2} \frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} + \frac{U_c}{y_c^2} \frac{\partial^2 U^*}{\partial y^{*2}} \right) &+ \\ &+ N_z \left( \frac{U_c}{z_c^2} \frac{\partial^2 U^*}{\partial z^{*2}} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

En el estudio de la física oceanográfica (Stewart, 2004), es común suponer:

$$(x_c \sim y_c) = L > (z_c = H);$$

Para una presión característica  $p_c = \rho fUL$  y tiempo característico  $t_c = L/U$ , tras asumir (por continuidad)  $W/H = U/L$ , la Ecuación A.3 se puede expresar como:

$$\begin{aligned} Ro \frac{\partial U^*}{\partial t^*} + Ro \left( U^* \frac{\partial U^*}{\partial x^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial y^*} + W^* \frac{\partial U^*}{\partial z^*} \right) &= \\ -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + V^* + E_h \left( \frac{\partial^2 U^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 U^*}{\partial y^{*2}} \right) + E_z \left( \frac{\partial^2 U^*}{\partial z^{*2}} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

en donde el número de Rossby  $Ro$  y de Ekman  $E$  quedan definidos de la siguiente manera:

$$Ro = U/fL; E_h = N_h/(fL^2); E_v = N_v/(fH^2)$$

De este análisis se desprende que el número de Rossby mide la importancia relativa de los términos inerciales frente a Coriolis y el de Ekman la de la fricción frente a Coriolis. Para el análisis que se realiza en la sección 4,  $Ek = N_v/(fH^2)$  y  $Ro = U/(fB)$ , siendo  $H$  la profundidad de la columna de agua y  $B$  la mitad del ancho en la sección de estudio. Para  $U$  se escoge la velocidad residual a un metro de profundidad.

## Apéndice B. Circulación baroclina

Considerando un flujo con densidad variable y estacionario en el ciclo de marea, las ecuaciones de momento que nos describen la circulación estuarina, en el eje  $x$  y  $z$  (positivo apuntando a la lámina libre) son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho N_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= -g\rho \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$



Supóngase que la densidad del flujo varía en profundidad de la forma:

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 \frac{z}{h} \quad (\text{B.2})$$

Siendo  $\rho_0$  la densidad en el lecho, la pendiente  $\rho_1 < 0$  y  $h$  la profundidad en la columna de agua. Si se suponen condiciones de no deslizamiento en el fondo  $u(z=0) = 0$  y tensión de viento nula en la superficie  $du/dz(z=h) = 0$ , el perfil de velocidad longitudinal escalado  $u(\xi)$  ( $\xi = z/h$ ) que se obtiene de introducir la Ecuación (B.2) en la Ecuación (B.1) es:

$$u(\xi) = a \left[ \frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi^3}{6} - \frac{\xi}{2} \right] - b \left[ \rho_0 \left( \frac{\xi^2}{2} - \xi \right) + \rho_1 \left( \frac{\xi^2}{4} + \frac{\xi^4}{24} - \frac{2\xi}{3} \right) \right] + c \left[ \frac{\xi^2}{4} - \frac{\xi^4}{24} - \frac{\xi}{3} \right] \quad (\text{B.3})$$

En donde:

$$a = \frac{gh^3 \partial \rho_0 / \partial x}{N_z}$$

$$b = \frac{gh^3 \frac{1}{8} \partial \rho_0 / \partial x + \frac{11}{120} \partial \rho_1 / \partial x}{N_z \frac{1}{3} \rho_0 + \frac{29}{120} \rho_1} \quad (\text{B.4})$$

$$c = \frac{gh^3 \partial \rho_1 / \partial x}{N_z}$$

A partir de B.3, en situaciones de mezcla ( $\rho_1 = 0$ ) se obtiene la solución clásica proporcionada por Officer et al. (1976) dan el mismo resultado, es decir:

$$u(\xi) = \frac{gh^3 \partial \rho_0 / \partial x}{N_z} \left[ -8\xi^3 + 15\xi^2 - 6\xi \right] \quad (\text{B.5})$$

Si suponemos que las mareas vivas se asimilan a una situación de mayor mezcla (Ecuación B.5) y las mareas muertas a estados de mayor estratificación (Ecuación B.3), la posición del punto de velocidad nula se sitúa más cerca de la superficie durante mareas muertas que en vivas.

## Referencias

- Chant, R.J., 2002. Secondary flows in a region of flow curvature: relationship with tidal forcing and river discharge. *J. Geophys. Res.* 107, 3131.
- Chant, R.J., Wilson, R.E., 1997. Secondary circulation in a highly stratified estuary. *Journal of Geophysical Research* 102, 23207–23.
- Cheng, P., Valle-Levinson, A., 2009. Influence of lateral advection on residual currents in microtidal estuaries. *Journal of Physical Oceanography* 39, 3177–3190.
- Contreras, E., Polo, M., 2012. Measurement frequency and sampling spatial domains required to characterize turbidity and salinity events in the Guadalquivir estuary (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, 2581–2589.
- Díez-Minguito, M., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Ruiz, I., Losada, M.Á., 2012. Tidal wave reflection from the closure dam in the Guadalquivir estuary (SW Spain). *Coastal Engineering Proceedings* 1, currents–58.
- Díez-Minguito, M., Contreras, E., Polo, M., Losada, M.Á., 2013. Spatio-temporal distribution, along-channel transport, and post-riverflood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (SW Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, doi:10.1002/jgrc.20172.
- Dyer, K.R., 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 2nd edition.
- Elston, S.A., 2005. Secondary circulation in a sinuous coastal plain estuary.
- García-Lafuente, J., Delgado, J., Navarro, G., Calero, C., Díez-Minguito, M., Ruiz, J., Sánchez-Garrido, J., 2012. About the tidal oscillations of temperature in a tidally driven estuary: The case of Guadalquivir estuary, southwest Spain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 111, 60–66.
- Geyer, W.R., 1993. The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries and Coasts* 16, 113–125.
- Hansen, D., Rattray, M., 1966. Gravitational circulation in straits and estuaries.
- Kalkwijk, J.P.T., Booij, R., 1986. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow. *Journal of Hydraulic Research* 24, 19–37.
- Lacy, J.R., Stacey, M.T., Burau, J.R., Monismith, S.G., 2003. Interaction of lateral baroclinic forcing and turbulence in an estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 108.
- Lerczak, J.A., Geyer, W.R., 2004. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. *J. Phys. Oceanogr.* 34, 1410–1428.
- Lerczak, J.A., Rockwell Geyer, W., 2004. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries\*. *Journal of Physical Oceanography* 34, 1410–1428.
- Navarro, G., Gutierrez, F.J., Díez-Minguito, M., Losada, M.Á., Ruiz, J., 2011. Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: A challenge for real-time telemetry. *Ocean Dyn.* 61, 753–765.
- Navarro, G., Huertas, I., Costas, E., Flecha, S., Díez-Minguito, M., Caballero, I., López-Rodas, V., Prieto, L., Ruiz, J., 2012. Use of a real-time remote monitoring network (rtm) to characterize the Guadalquivir estuary (Spain). *Sensors* 12, 1398–1421.
- Officer, C.B., et al., 1976. *Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters)*.
- Reyes-Merlo, M.Á., Díez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., Baquerizo, A., Losada, M.Á., 2013. On the relative influence of climate forcing agents on the saline intrusion in a well-mixed estuary: Medium-term Monte Carlo predictions.
- Ruiz, J., Losada, M.Á., 2010. Propuesta metodológica para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de las actuaciones humanas en el estuario del Guadalquivir. Technical Report. Universidad de Córdoba (UCO) y Universidad de Granada (UGR) bajo los auspicios Andalucía (CSIC).
- Stewart, R.H., 2004. *Introduction to physical oceanography*. Texas A & M University.
- Valle-Levinson, A., 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press, New York.
- Valle-Levinson, A., 2011. 2.07 large estuaries (effects of rotation).
- Winant, C.D., 2008. Three-dimensional residual tidal circulation in an elongated, rotating basin. *Journal of Physical Oceanography* 38, 1278–1295.