



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y TURISMO**

TESIS DE LICENCIATURA EN OCEANOGRAFÍA

**“Patrón de circulación en un canal de marea
influenciado por canales tributarios y planicies de
marea adyacentes”**

Mauro López Gregori

Director: Dr. Gerardo M. E. Perillo

**BAHIA BLANCA
AÑO 2017**

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es determinar el patrón de circulación instantáneo durante un ciclo de marea en el sector interno del Canal Principal del Estuario de Bahía Blanca, evaluando además la influencia sobre este de los canales tributarios y las extensas planicies de marea a lo largo de ambos márgenes del Canal Principal. Con este fin, se obtuvieron datos de velocidad y dirección de corrientes a lo largo de un ciclo de marea de sicigia en siete transectas transversales al canal. Las características geomorfológicas e hidrodinámicas del área de estudio se adquirieron con un perfilador acústico por efecto Doppler (ADCP) montado en un buque y posicionado con un DGPS-RTK. Datos de marea y viento se obtuvieron mediante un mareógrafo y una Estación de Monitoreo Ambiental Costero (EMAC) respectivamente. Las corrientes de reflujo presentaron una mayor intensidad que las corrientes de flujo, si bien estas últimas se caracterizaron por una mayor duración. No obstante, las corrientes de flujo no pueden equilibrar la primera, dando como resultado una circulación dominada por el reflujo. En el sector interno del área de estudio la circulación se ve afectada por la curvatura del canal, determinándose que la corriente de reflujo tiene un papel predominante en el modelado de la misma. La mayoría de las transectas situadas entre Puerto Cuatros y el Canal de Maldonado muestran un núcleo de velocidades más altas en el centro, disminuyendo en la vecindad del lecho y los flancos. Cerca de la estoa de bajamar se observaron algunas disimilitudes de la velocidad desarrollando una estratificación de dos capas del flujo. Durante el reflujo, a partir del análisis de los datos en el área de confluencias de canales, se observó una capa de corte debido a la interacción entre la corriente principal y la descarga proveniente de los canales tributarios. Mientras tanto, durante el flujo, se detectó una disminución de la velocidad y una desviación de la dirección del flujo principal, como consecuencia de la separación del flujo debido a la presencia del tributario y de las planicies de mareas (especialmente en la última parte del flujo). En el sector del muelle de Puerto Cuatros, se detectó una aceleración de la corriente hacia el centro del canal, generando un flujo vertical adyacente al muelle. Finalmente, mediante los datos de intensidad de dispersión retrocedente (backscatter) proporcionados por el ADCP, se realizó un análisis cualitativo de la dinámica sedimentaria en el área estudio.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to determine the instantaneous circulation pattern during a tidal cycle in the internal sector of Canal Principal of Bahía Blanca Estuary and also evaluate the influence on it of the tributary channels and the extensive tidal flats along both banks on the Canal Principal. For this purpose, the current velocity and direction data were obtained near the head of Canal Principal of the Bahía Blanca Estuary, along a spring tidal cycle with a total of seven transects transversal to the channel. Geomorphologic and hydrodynamic characteristics of the study reach were made with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) mounted on a ship and positioned with a DGPS-RTK. The tide and wind data were obtained by means of a tide gauge and a Estacion de Monitoreo Ambiental Costero (EMAC) respectively. The ebb currents are stronger although the flood stage is longer; however, it cannot balance the former resulting in an ebb-dominated circulation. Inside the study region, the circulation is affected by the channel curvature. The ebb current has a predominant role in modeling the meander. Most of the transects located between Puerto Cuatros and the Maldonado Channel show a nucleus of higher velocities in the center, decreasing in the vicinity of the channel bed and the flanks.. Near low-tide slack water some dissimilarities were observed developing a two-layer stratification of the flow. During ebb, from the analysis of the data in the area of channel confluences, a shear layer was observed due to the interaction between the main stream and the discharge from the tributary channels.. Meanwhile, during the flood, decrease in the speed and a deviation of the main flow direction, were detected as a consequence of the flow separation due to the presence of the tributary and the tidal flats (specially in the later part of the flood). In the area of Puerto Cuatros wharf, a current acceleration towards the center of the channel was detected, producing a vertical flow adjacent to the wharf. Finally, using the backscatter intensity data provided by the ADCP, a qualitative analysis of the sedimentary dynamic over the study region was made.

AGRADECIMIENTOS

A mi director, Dr. Gerardo M. E. Perillo, por darme la oportunidad de iniciarme en la investigación y por el apoyo, el tiempo y los conocimientos aportados para la realización de esta tesis.

A la Agencia Nacional para la Promoción Científica y Técnica y a la Universidad Nacional del Sur, cuyas donaciones apoyaron parcialmente este trabajo.

Al Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca y a su previo presidente, Cdor. Hugo Borelli, por permitir la utilización de los datos.

Al equipo del IADO, especialmente a la Ing. Laura I. Álvarez y al Sr. Ernesto Alberdi por las tareas de relevamiento.

A mis profesores.

Muy especialmente a mis padres, Graciela y Juan Carlos y mi hermano Esteban. Sus consejos, constante apoyo y aliento han sido fundamentales en cada etapa de mi vida.

A mis amigos.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Presentación del tema.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Area de estudio.....	4
1.4 Materiales y métodos	6
1.3.1 Circulación secundaria y método de Rozovskii (1959)	9
2 RESULTADOS.....	12
2.1 Parámetros meteorológicos.....	12
2.2 Geomorfología	14
2.3 Hidrodinámica	19
2.3.1 Corrientes	19
2.4 Dispersión retrocedente.....	30
3 DISCUSIÓN.....	32
4 CONCLUSIONES	37
5 BIBLIOGRAFÍA.....	39
6 ANEXO	43

1. Introducción

1.1. Presentación del tema

Las corrientes de marea son uno de los agentes hidrodinámicos más importantes en los ambientes costeros. En los estuarios, donde la acción de las olas es limitada poseen un rol significativo en la distribución de los distintos parámetros oceanográficos, en el balance de los procesos de erosión y depositación de sedimentos y en el comportamiento de las sustancias químicas, tanto en suspensión como en solución, con su consecuente influencia sobre la biota del ecosistema.

En estos ambientes, la circulación se encuentra ampliamente controlada por la geomorfología (Perillo, 2009). La presencia de una densa red de canales interconectados y amplias planicies de marea, inducen cambios en la propagación de la onda de marea, generando como consecuencia variaciones en la magnitud y duración de las corrientes de flujo y reflujo (Perillo et al., 2004), siendo este fenómeno de importancia fundamental en la tendencia evolutiva del estuario.

Un aspecto clave de esto último, involucra cuantificar el volumen de sedimento transportado y definir el patrón de transporte del mismo. En un estuario, estas variables dependen de diversos factores: la descarga fluvial, las características del sedimento, las olas y la distribución de las velocidades de corriente durante el ciclo de marea (Dronkers, 1986). De los diferentes mecanismos de transporte, aquel realizado en suspensión cumple un papel preponderante, siendo el que mayor volumen acarrea (Perillo, 2009). Al mismo tiempo, es un factor influyente en la productividad biológica al limitar la transmisión de luz (Gartner, 2004; Guinder et al, 2009), el transporte y redistribución de contaminantes (Kim y Voulgaris, 2003) y el mantenimiento de los canales de navegación (Kim y Voulgaris, 2003; Aardom y Mol, 2005; Baranya y Józsa, 2013).

Actualmente, al igual que en los cauces fluviales, ha existido un creciente interés en el estudio de los flujos secundarios (p.e., Lueck y Lu, 1997; Chant, 2002; Kim y Voulgaris, 2008; Rollnick y Rosario, 2013). Si bien en los estuarios estos flujos son significativamente más pequeños que las corrientes dominantes a lo largo del canal, poseen un papel fundamental en la dinámica estuarina (Lerczak y Geyer, 2004). Las corrientes en estuarios son influenciadas principalmente por la marea y la geomorfología del lugar, la descarga de los rios y el viento (Perillo, 2009; Lee et al., 2013) mientras que las

circulaciones secundarias pueden tener su origen en diversas causas; la curvatura del canal (Chant 2002; Seim et al., 2006; Kim y Voulgaris 2008), las variaciones laterales en la morfología (Georgas y Blumberg, 2003), la influencia de las planicies de marea y canales tributarios (Angeles et al., 2003; Pierini et al., 2005), entre otras. No obstante, la mayor proporción de investigaciones se han centrado en el rol de estos flujos en estuarios estratificados curvos y su influencia en el transporte de sedimentos y sal, existiendo una notable escasez de estudios en la confluencias de canales, concentrándose estos en las características geomorfológicas de las mismas (Kjerfve et al 1979; Ginsberg y Perillo 2004; Pierini et al 2005).

Definir la estructura de flujo en estos sectores representa un problema de gran complejidad. Mediante mediciones en canales naturales y de laboratorio se ha demostrado que el campo de flujo en la confluencia de canales puede diferenciarse en seis regiones principales, definidas por los fenómenos de: a) estancamiento, b) desviación, c) separación, d) aceleración de flujo, e) recuperación de flujo y f) capa de corte (Best, 1987). Las características y la magnitud de estas regiones dependen de dos factores dominantes; el ángulo de unión y la relación de descarga entre los canales confluyentes (Best, 1987 ; Roy y De Serres, 1989). Hacia la zona de convergencia, la curvatura del flujo induce a la generación de celdas de circulación secundaria animadas de un movimiento helicoidal. Su identificación y análisis permitirá un mayor grado de entendimiento respecto a la evolución de las características geomorfológicas en el sector del cauce asociado a la confluencia.

En las últimas décadas ha adquirido gran relevancia la medición de la velocidad del agua mediante la utilización de ADCP (Acoustic Depth Current Profiler) en embarcaciones móviles. Este instrumento permite obtener datos de un flujo de agua con una gran resolución temporal y espacial, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para establecer el patrón de circulación en canales de marea. Al mismo tiempo, debido a las características mencionadas, ha sido empleado con gran eficacia para establecer la estructura de flujo en meandros y confluencias de cauces fluviales (p.e., Parsons et al., 2007; Szupiany et al., 2016).

Los métodos tradicionales utilizados para el análisis del transporte en suspensión presentan dificultades de diversa índole. En principio, la adquisición de muestras requiere de períodos de tiempo considerables y de un posterior procesamiento en laboratorio. Al mismo tiempo, las mediciones se realizan de forma puntual reduciendo la amplitud

espacio temporal de los datos. En los últimos años, el ADCP ha sido reconocido como una herramienta potencial para analizar la dinámica sedimentaria y cuantificar el volumen de material implicado (p.e., Kim y Voulgaris, 2003; Wall et al., 2006; Latosinski et al., 2011), habiéndose demostrado que la intensidad de la señal recibida es proporcional a la concentración de sedimento en suspensión (CSS). Estos instrumentos, además de ser menos susceptibles a la contaminación biológica, pueden proporcionar de forma contemporánea a la adquisición de datos de velocidad, estimaciones no intrusivas del perfil de concentración de sedimento (Gartner, 2004), lo cual facilita notablemente el cálculo del flujo de sedimentos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es determinar el patrón de circulación instantáneo durante un ciclo de marea en el sector interno del Canal Principal del Estuario de Bahía Blanca y su interacción con la geomorfología del lugar. Asimismo, dado que el mencionado sector no sólo se encuentra rodeado de amplias planicies de marea y canales tributarios sino que también presenta elementos de origen antrópico es esperable que la estructura del flujo principal se vea afectada por los mismos de forma análoga a lo sucedido en cauces fluviales.

En base a esto, se plantean los siguientes objetivos específicos;

- Conocer las características morfológicas y sedimentológicas del canal.
- Describir y analizar el patrón de circulación en el mencionado sector para los distintos estadios de marea, evaluando al mismo tiempo la distribución de la velocidad a lo largo de las distintas secciones transversales.
- Evaluar los procesos dinámicos observados en el tramo curvo y en la confluencia del Canal Principal con los canales secundarios, con el fin de identificar la presencia y características de los flujos secundarios.

- Evaluar los efectos sobre la estructura del flujo inducidos por el viento y la presencia del muelle.
- Analizar la influencia de las corrientes de marea en la distribución de los diversos parámetros oceanográficos, la geomorfología del canal y la dinámica sedimentaria.
- Realizar una apreciación cualitativa de la influencia que los distintos ambientes mareales ejercen sobre el flujo.

1.3. Area de estudio

El estuario de Bahía Blanca es un sistema mesomareal que ocupa una amplia zona costera al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1). Este ambiente posee una importancia fundamental a nivel nacional, dado que en él se localiza el principal sistema portuario de aguas profundas del país. Su configuración actual responde a un proceso de ascenso y descenso del nivel del mar durante el período Holoceno, caracterizándose en la actualidad por una densa red de canales de diversas dimensiones orientados en dirección NO-SE, generalmente de tipo meandroso, junto con numerosos islotes de escasa altitud y amplias llanuras de fango y arena que se cubren periódicamente durante las pleamares.

La superficie total del estuario es de 3000 km² y su respectiva cuenca hidrográfica actual de 19000 km². Posee dos secciones de costa, una con rumbo NO-SE y otra situada al oeste de esta, con orientación N-S. Contabilizan una longitud de 110 y 130 km, respectivamente (Melo et al., 2003).

Se caracteriza por un régimen de mareas semidiurno con una amplitud media aumentado progresivamente hacia la cabecera. Basados en la clasificación de estuarios de Le Floch (1961), que contempla el balance entre la fricción y la convergencia, dicho estuario fue definido como hipersincronico (Perillo y Piccolo, 1991).

En las costas de las islas y las riberas internas formadas en muchos casos por acantilados de 1 a 2 m de altura, el agua alcanza normalmente la base durante las cuadraturas, mientras

que durante el período de sicigia llega al nivel medio o superior del acantilado (Cuadrado et al., 2004).



Figura 1
Ubicación del área de estudio (Fuente: Google Earth). En el margen superior derecho puede observarse la ubicación del Estuario de Bahía Blanca .

La mayor parte del flujo de agua dulce que ingresa al sistema es provista por dos tributarios que desembocan sobre la costa norte del estuario. El más importante, el río Sauce Chico, desemboca en la cabecera del estuario, mientras que el arroyo Napostá desemboca hacia la zona media del Canal Principal a 1 km del puerto de Ingeniero White. No obstante, es preciso mencionar que existen una serie de pequeños tributarios que incorporan agua por escurrimiento sólo durante el período de lluvias y se comportan como canales de marea en las estaciones secas. La descarga media anual del río Sauce Chico y del arroyo Napostá Grande son $1,9$ y $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Piccolo y Perillo, 1990). Los vientos predominantes en el estuario son de dirección NO y N con velocidades medias de 18 km h^{-1} (Piccolo, 1987).

Hansey y Rattray (1966) desarrollaron un criterio que permite clasificar los estuarios en función de dos parámetros adimensionales que representan el grado de estratificación de la columna de agua y las características de la circulación gravitacional. En base a este criterio, Piccolo y Perillo (1990) clasificaron el mencionado estuario como Tipo 1a. No obstante, si se consideran estaciones distribuidas en diferentes secciones del estuario este resultado se adapta al flanco sur del mismo, mientras que el flanco norte se ajusta al tipo

2a.

El sector estudiado en la presente tesis corresponde al sector interno del Canal Principal. Dicho tramo se caracteriza por una configuración en planta sinusoidal orientada en dirección NO-SE, presentando sobre el flanco norte la desembocadura de dos canales de marea secundarios; el canal Aguara y el Bahía del Pejerrey (Fig. 2). Esta área se constituye en una de las más estratégicas del ecosistema estuarino, ya que allí es donde la cadena trófica del estuario se inicia debido al florecimiento del fitoplancton de invierno (Guinder et al., 2009).

1.4. Materiales y métodos

La determinación de las características hidrodinámicas y geomorfológicas del sector de estudio fueron realizadas con un perfilador acústico por efecto Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) RDI Teledyne de 600 kHz operado desde una embarcación (Iado IV, perteneciente al Instituto Argentino de Oceanografía) navegando a una velocidad del orden de los 3 nudos y posicionado por un DGPS-RTK Sokkia, cuya base se estableció en Puerto Cuatrerros (Fig. 2). En este mismo lugar se instaló un mareógrafo con el objetivo de obtener un registro de altura de mareas. La longitud del registro fue de dos días, con un período de muestreo de 5 minutos. La relevamientos aquí analizados se efectuaron en su totalidad los días 11 y 12 de Julio de 2011.

El ADCP emite un pulso acústico a la columna de agua que se propaga en el agua a una frecuencia fija y es reflejado por las partículas en suspensión. Estas últimas, denominadas dispersores, pueden ser tanto de origen orgánico (plancton, materia orgánica, etc.), como inorgánico (sedimento en suspensión). Cuando este fenómeno sucede, se produce un cambio en la frecuencia de la señal, la cual retorna y es captada por los transductores, siendo luego este parámetro utilizado por el instrumento para muestrear la velocidad del flujo. Para este fin, utiliza 3 haces acústicos mediante los cuales calcula de forma simultánea la velocidad de la corriente en las 3 dimensiones (componentes Norte, Este y Vertical de la velocidad). Un cuarto haz permite evaluar la calidad de los datos adquiridos.

El perfil de velocidad medido es dividido en segmentos espaciados de forma regular denominados celdas de profundidad, siendo preciso mencionar que el ADCP presenta una limitación en la toma de datos, ya que no brinda información aceptable en las celdas

ubicadas a aproximadamente 1 m por debajo de la superficie libre y 0,5 m por encima del lecho.

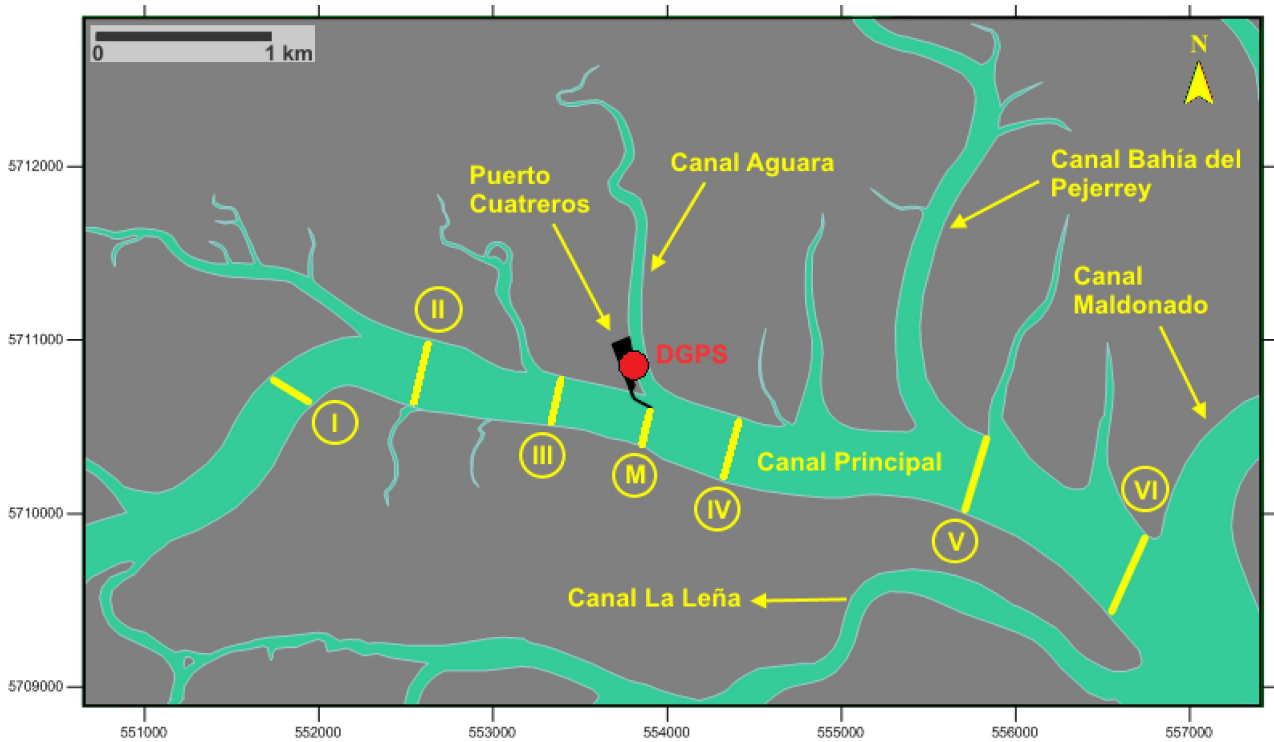


Figura 2

Mapa del área de estudio, incluyendo la localización de las transectas y del DGPS.

Para las mediciones se estableció un tamaño de celda de 50 cm con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Se realizaron mediciones durante un ciclo completo de marea con condiciones de sicigia midiéndose perfiles verticales de velocidad, dirección de corrientes y amplitud de la dispersión retrocedente (backscatter) en un total de 7 secciones transversales (transectas) separadas entre sí por aproximadamente 1000 m (Fig. 2). Dada la extensión y características dinámicas del área de estudio, la campaña se dividió dos periodos de medición de un ciclo de marea completo cada uno. En cada uno se relevaron 4 secciones transversales (el muelle se repitió en ambos relevamientos). Cada transecta se repitió dos veces, siendo el tiempo promedio en el cual se realizó dicho procedimiento inferior a los 5 minutos, por lo que los datos pueden ser considerados como adquiridos simultáneamente. Luego se repitió lo mismo con la siguiente transecta hasta completar el total.

Los datos originales adquiridos por el ADCP fueron exportados como archivos de formato ASCII mediante el software WinRiver. Para la visualización y procesamiento de los mismos se utilizó el software Velocity Mapping Toolbox (VMT), distribuido por el United States Geological Survey (USGS) y basado en el lenguaje MATLAB (Parsons et al., 2013). Este se caracteriza por un conjunto de herramientas para el análisis de datos medidos por ADCP que incluyen, entre otras, la posibilidad de promediar los campos de flujo, aplicar los procedimientos para la identificación de flujos secundarios y exportar los resultados o los datos originales en planilla de datos, para su posterior procesamiento con otros programas. A fin de estudiar la interacción de la descarga de los canales secundarios y el Canal Principal, se empleó el método de Rozovskii (1957), que se describe en la siguiente sección .

Para la realización de la cartografía del área de estudio se utilizó como base una imagen satelital adquirida mediante el software Google Earth, siendo luego georreferenciada por el método de puntos de control utilizando el sistema Universal Transversal Mercator (UTM) (Datum WGS84).

La batimetría del sector interno del Canal Principal se realizó mediante la digitalización de la carta batimétrica construida por Gómez et al. (1996). En esta última, los valores de profundidad fueron referidos al plano de reducción ubicado a 2.59 m por debajo del nivel medio del mar. Para la interpolación se utilizó el método de triangulación e interpolación lineal.

Luego de finalizado el procesamiento tanto de los datos batimétricos como de corrientes, se procedió al análisis de los mismos conforme los objetivos planteados en la sección 1.2 , definiendo como punto principal la interrelación entre la circulación asociada a la corriente de marea y las características morfológicas del área.

Debido a que existe una importante cantidad de investigaciones que han definido las características físicas en este sector no se contó con mediciones in situ de parámetros oceanográficos. por lo que se procurara interpretar los resultados de las mismas en el marco dinámico provisto por esta investigación.

Considerando que no existen mediciones continuas que permitan cuantificar la descarga de los afluentes principales en el período de estudio, la misma se definió aproximada en función de los registros de la media mensual del caudal y los datos de precipitación

provistos por la central hidrometeorológica del Centro de Recursos Renovables Naturales de la Zona Semiárida (CERZOS) ubicada en las instalaciones del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICET) en Bahía Blanca (Fig. A1).

Los datos del viento fueron adquiridos mediante una Estación de Monitoreo Ambiental Costero (EMAC) perteneciente al Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), ubicada en la localidad de Villa del Mar, en el partido de Coronel Rosales, provincia de Buenos Aires (Fig. A1). Esta estación, situada a aproximadamente 25,8 km del área de estudio, adquiere información de la dirección y magnitud de viento, entre otros parámetros meteorológicos, a intervalos de 5 minutos. Las posiciones geográficas de estos instrumentos y de las transectas pueden consultarse en la tabla 1 del Anexo.

1.4.1. Circulación secundaria y método de Rozovskii (1957)

Las corrientes secundarias fueron definidas por Prandtl (1952) como aquellas que ocurren en un plano normal al eje del flujo primario. En función del mecanismo generador pueden clasificarse en dos grupos; las derivadas de la interacción entre las fuerzas centrífugas y de gradiente de presión y aquellas producto de la heterogeneidad y anisotropía de la turbulencia (Parsons et al., 2007).

En los meandros, la geomorfología se ve afectada por la influencia que el flujo secundario ejerce sobre la distribución de las velocidades del flujo primario (Thorne et al., 1985). Rozovskii (1957) llevó a cabo un conjunto de investigaciones con el objeto de formular una teoría de la dinámica del flujo en curvas. Dichos estudios se basaron tanto en desarrollos teóricos como en el análisis de datos obtenidos en laboratorio y campo. Este método permite definir en un plano bidimensional la existencia de celdas de circulación secundarias a partir de la variación en la vertical, de la magnitud y el sentido de la velocidad secundaria.

Considérese la velocidad del flujo a una profundidad z respecto a un sistema de coordenadas cartesianas (x,y) como $v_r = (v_x, v_y)$; donde la velocidad primaria (v_p) y secundaria (v_s) pueden calcularse en cada punto de la columna de agua por

$$v_p = v_r \cdot \cos(\varphi - \alpha) \quad [1]$$

$$v_s = v_r \cdot \sin(\varphi - \alpha) \quad [2]$$

donde $v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. El ángulo existente entre el vector v_r y el Norte resulta de la siguiente ecuación

$$\varphi = \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right) \quad [3]$$

siendo definida la orientación del vector velocidad promedio por

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_x}{V_y}\right) = \arctan\left(\frac{\int_0^d v_x \cdot dz}{\int_0^d v_y \cdot dz}\right) \quad [4]$$

donde V_x y V_y representan las componentes x e y de la velocidad promediada en la vertical.

Es importante destacar que dicho método, además de ser empleado en el estudio de la dinámica en curvas (p.e. Bathurst et al., 1977), es utilizado también por diversos autores con el fin de identificar y analizar la circulación secundaria en difluencias (p.e. Parsons et al. 2007, Morell et al., 2012) y confluencias fluviales (p.e., Rhoads y Kenworthy, 1998; Parsons et al., 2007; Szupiany et al., 2016). Por lo expuesto se aplicará este método a los datos correspondientes a las transectas I,II y V. No obstante, cabe aclarar que los resultados de su aplicación en esta última transecta se constituyen en resultados preliminares. La identificación positiva de las mencionadas celdas de circulación secundaria permitirá a futuro realizar estudios detallados en esta confluencia, incorporando al mismo tiempo mayor cantidad de información con el fin de establecer en detalle, la estructura de flujo en la unión de canales de marea.

Finalmente, es preciso mencionar que para este trabajo, con el fin de analizar los flujos secundarios se aplicó un promedio móvil simple en el espacio bidimensional definido por la sección transversal, con el fin de reducir la variabilidad local de los datos relacionada

principalmente con las fluctuaciones turbulentas de la corriente de marea y el ruido del instrumento. Esto permitió obtener una mejor definición de las celdas de circulación secundaria.

2. Resultados

2.1. Parámetros meteorológicos

No se registraron precipitaciones durante el período de medición. Los registros indicaron que en los días previos se dio una situación similar, existiendo un intervalo de doce días desde el último evento en el cual se determinó un valor del orden de 1,4 mm. Considerando la magnitud del mismo y dada la distancia temporal respecto a las fechas en las cuales se realizó el relevamiento, puede deducirse que no tuvo una incidencia en los caudales. No obstante, debe considerarse que las precipitaciones no siempre influyen directamente sobre las descargas (Carbone et al., 2014). Durante el invierno los caudales medios alcanzan un valor de $1,58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Carbone et al., 2008). A efectos del presente estudio puede considerarse dicho valor como representativo de las condiciones hidrológicas imperantes durante el relevamiento.

Durante el período de estudio la velocidad del viento fue generalmente baja, con un promedio del orden de $11,9 \text{ km h}^{-1}$. Las máximas velocidades registradas para los días 11 y 12 de Julio de 2011 fueron de $45,8$ y $34,6 \text{ km h}^{-1}$ respectivamente (Fig. 3). Los vientos observados mostraron un claro predominio de la dirección NO, con una ocurrencia del 56,9 % y en menor medida del NE y N con una ocurrencia de 22,7 y 15,6 % respectivamente (Fig. 4a)

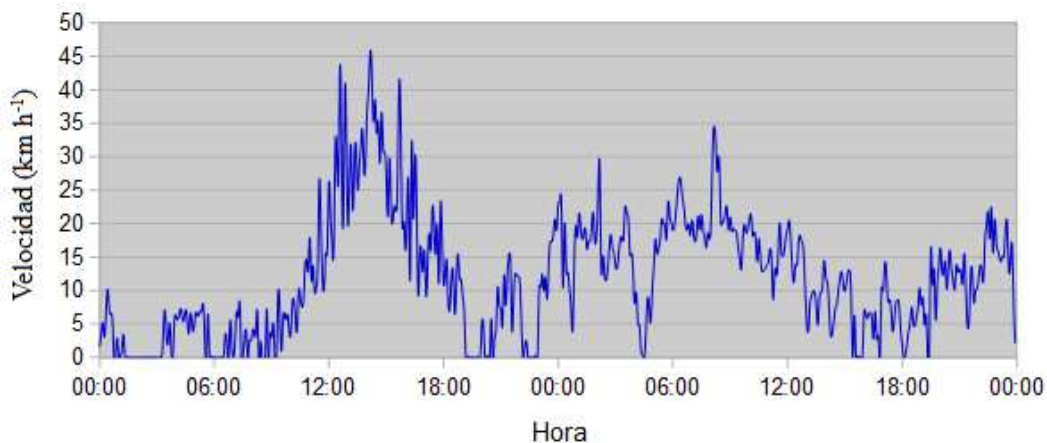


Figura 3
Registro de la velocidad de viento para los días 11 y 12 de Julio de 2011.

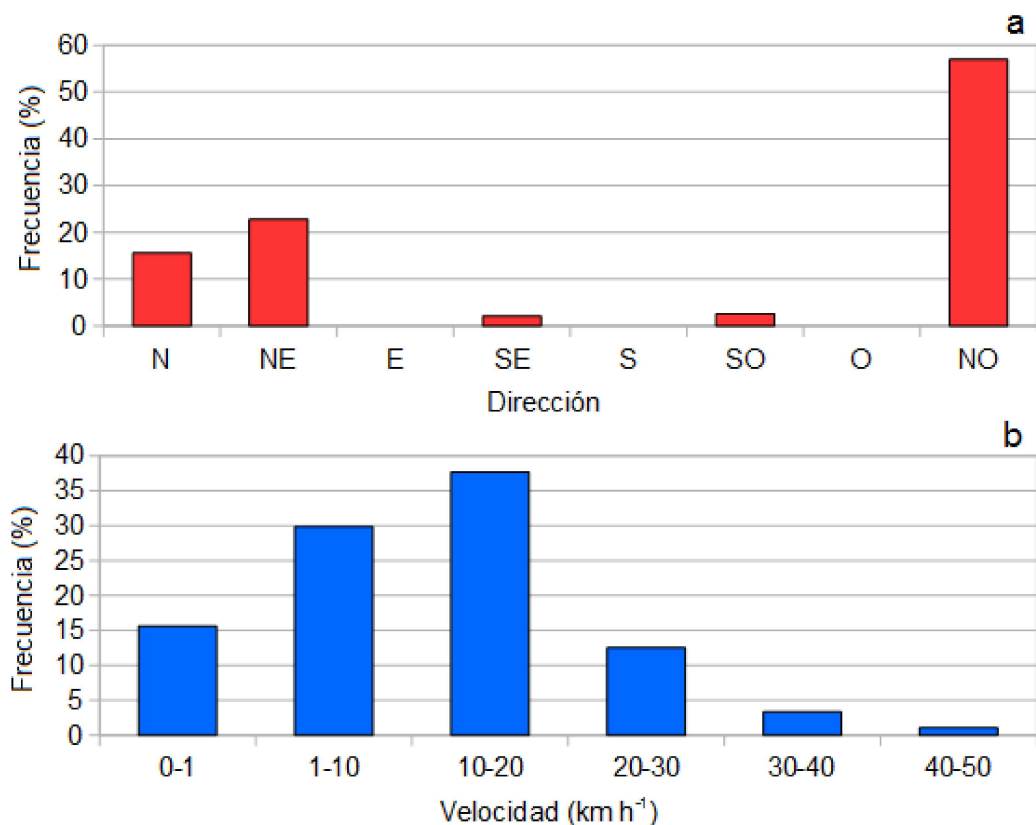


Figura 4
Histograma de: a - dirección y b- velocidad del viento.

Del total de las mediciones, el 15,63 % presentaron condiciones de calma (0 – 1 km h⁻¹). Las mayores ocurrencias se dieron para el rango de velocidades de 10 -20 km h⁻¹ (37,7 %) y 1 – 10 km h⁻¹ (29,9 %), mientras que el resto de las velocidades solo representó el 16,8 % del registro (Fig. 4b). La velocidad promedio y máxima para cada dirección puede consultarse en la tabla 2 del Anexo. En la figura 5 puede observarse la rosa de los vientos correspondiente al período de mediciones, donde es notable el predominio de la dirección NO con velocidades de 10 – 20 km h⁻¹. En cambio, si bien la dirección NE tuvo un cierto grado de significancia, la velocidad de dichos vientos fue, en la mayoría de los casos, menor a 10 km h⁻¹. En la tabla 3 del Anexo pueden consultarse los resultados del análisis estadístico aplicado a los datos de viento en dirección NO.

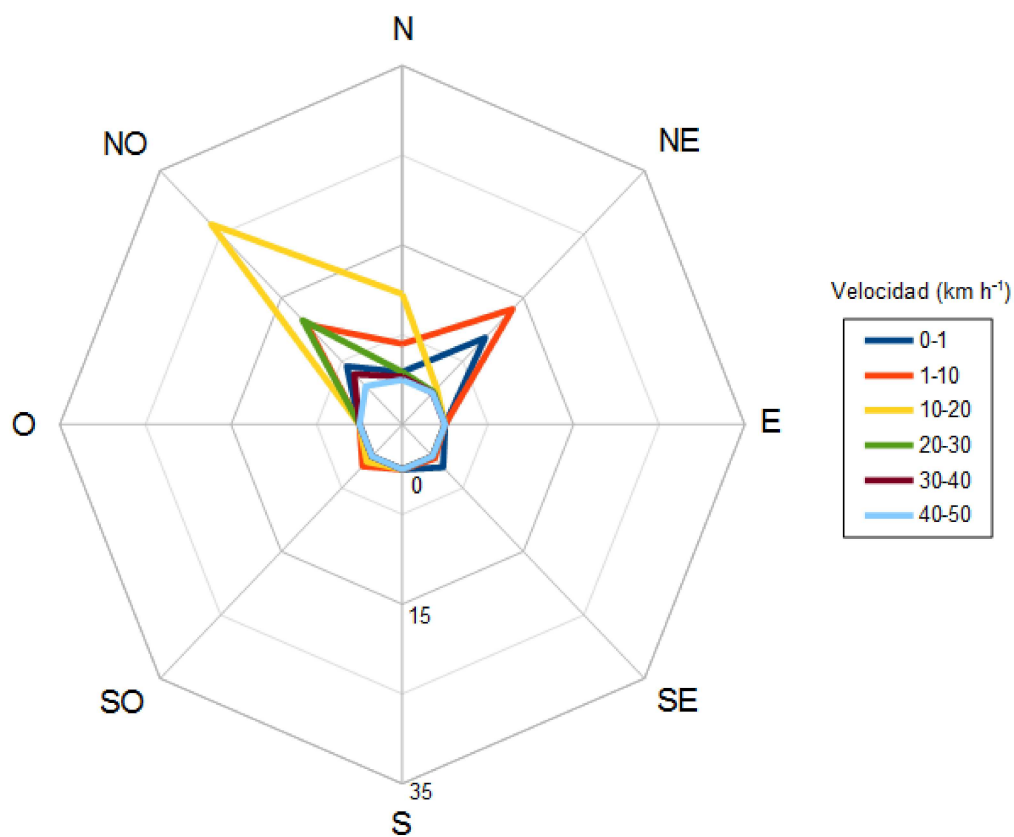


Figura 5
Rosa de los vientos. Frecuencia de dirección para distintos rangos de velocidad (%).

2.2. Geomorfología

Las características sedimentológicas y morfológicas generales del canal han sido descriptas anteriormente por Gómez et al. (1996) y se resumen a continuación. Al igual que las planicies de marea, los veriles del canal presentan una proporción de entre 98 y 45 % de material limo arcilloso, evidenciándose un lecho de una gran variación textural. A lo largo de todo el canal, en ambos veriles se disponen escarpas erosivas escalonadas, paralelas a las isobatas, originadas por la erosión diferencial de los estratos allí presentes. Estas terrazas tienen su origen en la erosión diferencial de los estratos deltáicos originales. Desde

Puerto Cuatrerros hasta la desembocadura del canal Bahía del Pejerrey se identifica, en la porción más profunda del canal, un campo de dunas subácueas 2D y 3D con sus crestas orientadas de forma transversal al canal, correspondientes las mismas al sector del canal en que los sedimentos dominantes son arenas y fragmentos de conchilla. Es común observar en la desembocadura de los afluentes la presencia de hoyos profundos (Gómez et al, 1996; Pierini et al., 2005).

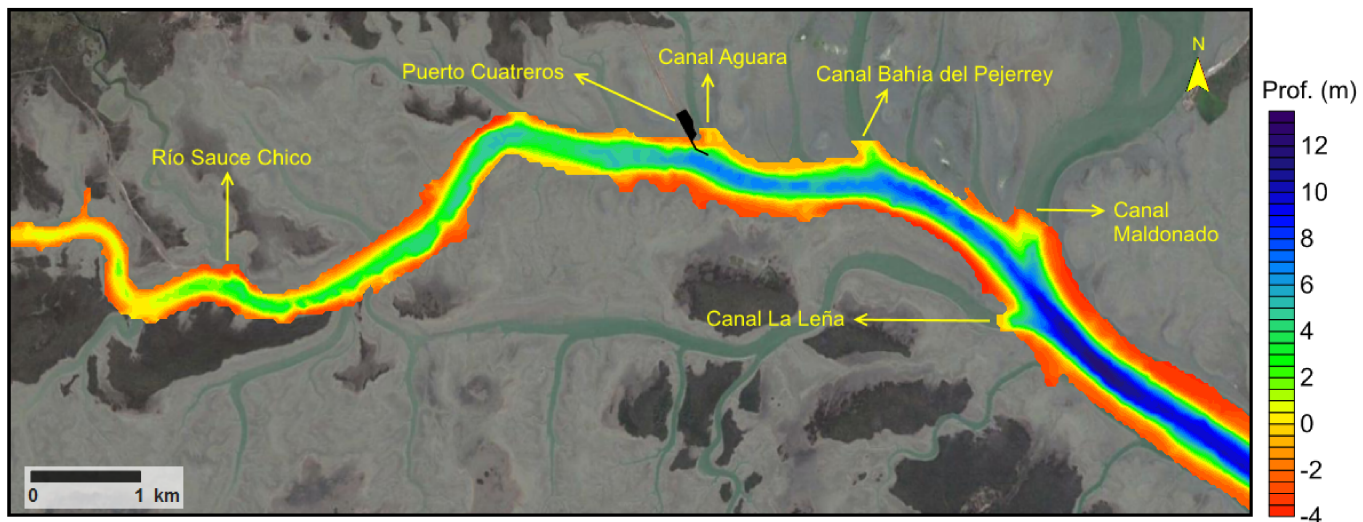


Figura 6
Mapa batimétrico del sector interno del Canal Principal

En la figura 6 se observa el mapa batimétrico del sector interno del estuario de Bahía Blanca. Las transectas relevadas presentaron en pleamar un ancho variable entre 190 y 400 m. Dada las características dinámicas del ambiente de estudio, existen disimilitudes batimétricas producto de la variación periódica del nivel de la superficie libre (Fig. 7), lo cual tiene como consecuencia un cambio continuo en el radio hidráulico del canal. Considerando que uno de los objetivos principales de esta tesis consiste en analizar la interrelación del patrón de flujo con la geomorfología, se procederá a continuación a describir el perfil morfológico de cada transecta durante la pleamar, donde el perímetro mojado presenta su valor máximo.

El sector de estudio presenta una disminución de la profundidad desde el sector externo, próximo al canal Maldonado, hasta la transecta localizada en el extremo interno (Fig. 6, 7 y 8). Las transectas I y II se ubican en los extremos de un tramo de relativa sinuosidad. La primera, situada en el sector más interno del canal, se caracteriza por una mayor pendiente

en el veril norte, desde donde alcanza una profundidad máxima del orden de los 8.3 m. A partir de este valor y a lo largo de un tramo de aproximadamente 45 m de longitud presenta un relieve relativamente plano produciéndose a continuación un decrecimiento progresivo de la profundidad hacia el flanco sur, interrumpido por la existencia de un pequeño escalón a partir del cual se produce un rápido incremento de la pendiente (Fig. 9a).

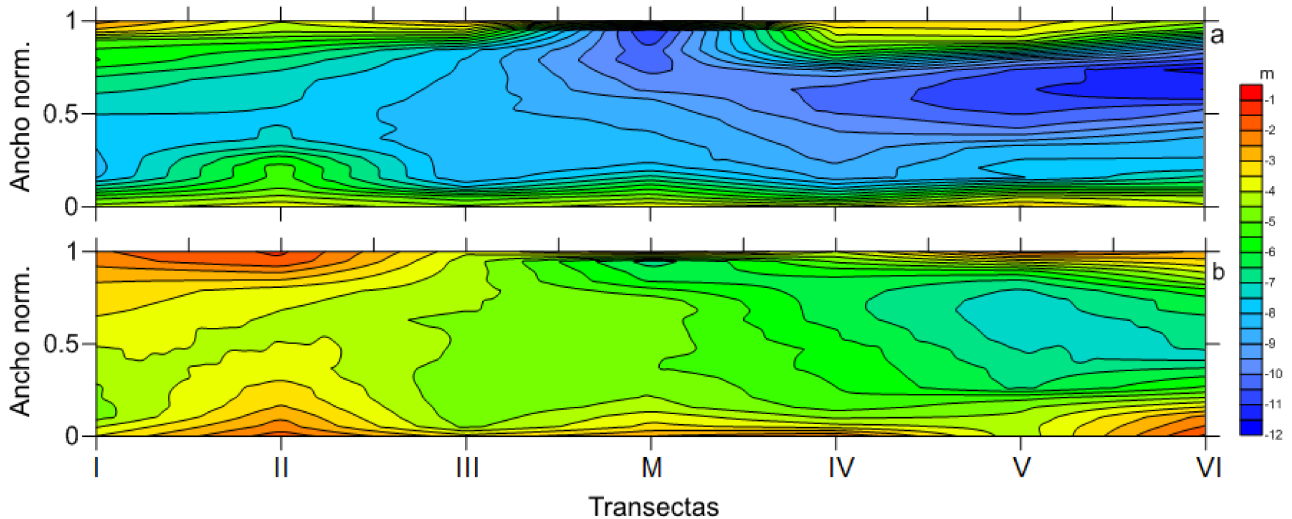


Figura 7

Esquema donde puede distinguirse la distribución de la profundidad correspondiente a la condición de ; a- Pleamar. b- Bajamar. El eje vertical representa el ancho normalizado del canal y el horizontal, la posición de cada transecta (equidistantes entre si). Los valores de profundidad para a y b fueron referidos a la mayor y menor altura registrada durante el relevamiento.

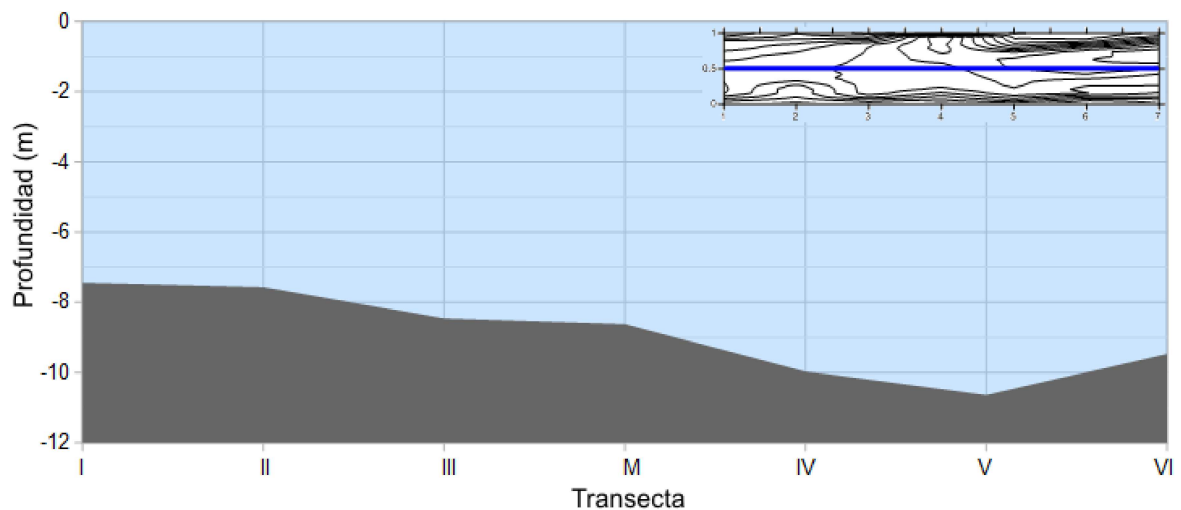


Figura 8

Perfil longitudinal del canal durante la pleamar. Obtenido a partir de la figura 7a ($y=0.5$).

A diferencia de esta, la transecta II presenta un mayor grado de simetría (Fig. 9b). A lo largo de aproximadamente un tercio de la sección, se observa desde el flanco norte una disminución constante de la profundidad, presentando en su base una pequeña irregularidad. El fondo del canal presenta una morfología relativamente plana con una profundidad promedio de 7,4 m con un máximo en el centro de la sección transversal del orden de los 7,6 m. En el flanco sur, de mayor pendiente, se detectó la presencia de una pequeña terraza de aproximadamente 18 m de ancho a lo largo del cual se midió una profundidad promedio de 5,2 m. La transecta III presenta un perfil simétrico, destacado por un lecho cuasi horizontal donde a lo largo de una distancia de aproximadamente 170 m la profundidad promedio es del orden de los 8.30 m con un valor máximo de 8.6 m en cercanías del veril sur (Fig. 9c).

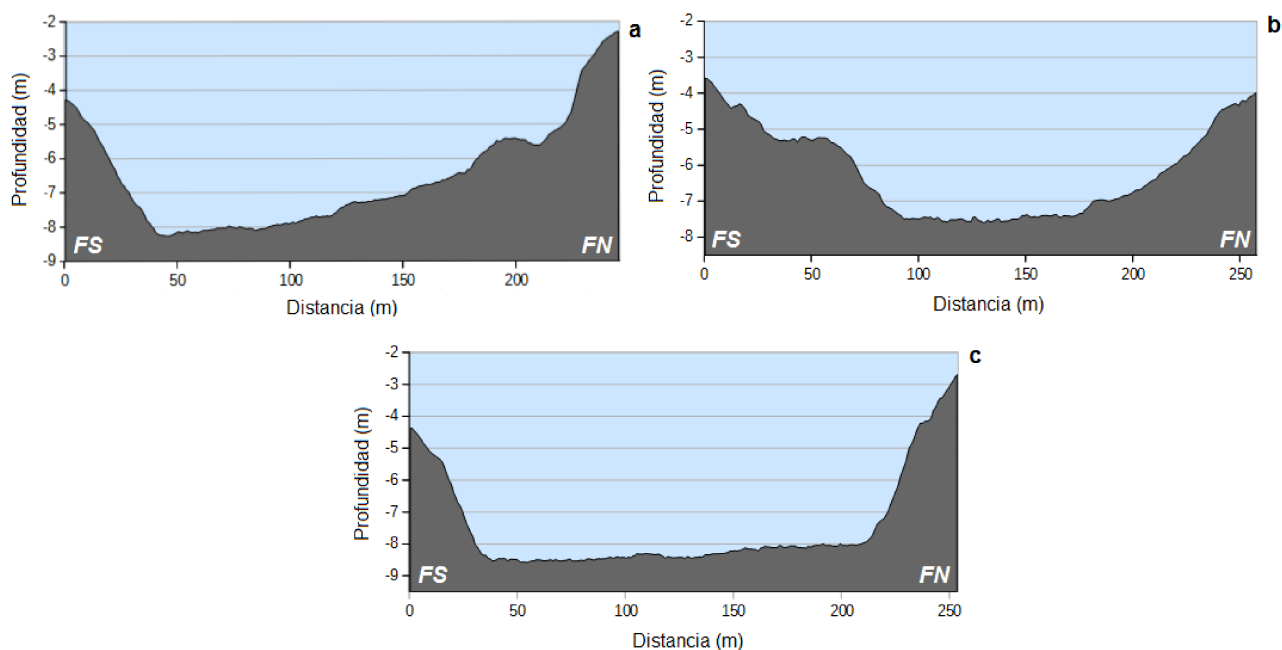


Figura 9

Perfiles batimétricos correspondientes a : a- Transecta I. b- Transecta II. c- Transecta III. El borde derecho corresponde al flanco norte del canal.

En el sector al este del muelle la secciones transversales presentan un perfil asimétrico con un flanco norte mas pronunciado y un ancho variable en bajamar del orden de los 250 m, aumentando progresivamente desde el muelle hasta la transecta VI. Cabe destacar además que, en relación al sector ubicado al oeste del muelle, en este tramo se observó una

profundización del canal.

En la transecta ubicada en el muelle de Puerto Cuatrerros (transecta M) la máxima profundidad, definida por un valor de aproximadamente 11,1 m, se presenta adyacente al muelle desde donde disminuye gradualmente hacia el flanco sur (Fig. 10a). La transecta IV localizada hacia la desembocadura del canal Aguara, tiene una profundidad máxima del orden de 10,2 m. Ambos flancos poseen una pendiente similar. Del análisis de la sección se desprende la existencia de una disimilitud en la variación de la profundidad respecto al ancho del lecho. En la proximidad al veril norte, este presenta un perfil ligeramente cóncavo con una profundidad promedio de 10 m (Fig. 10b).

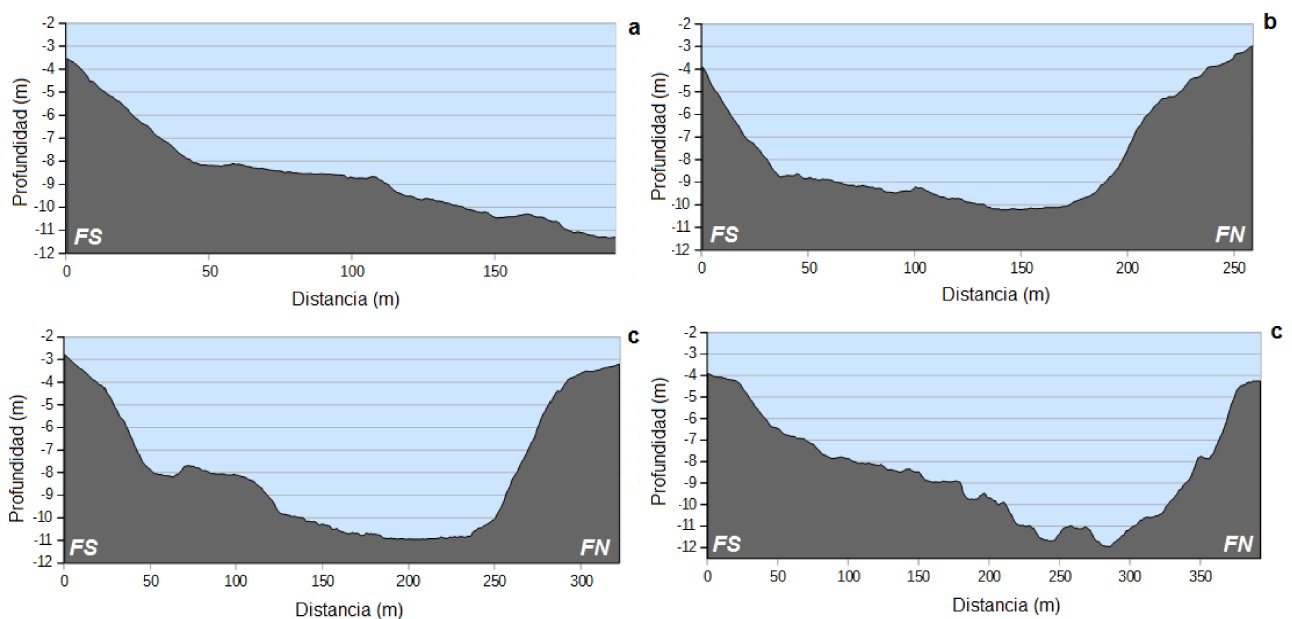


Figura 10

Perfiles batimétricos correspondientes a; a- Muelle. b- Transecta IV. c- Transecta V. d- Transecta VI. El borde izquierdo corresponde al flanco sur del canal.

La transecta V (Fig. 10c) se encuentra ubicada adyacente a la desembocadura del canal Bahía del Pejerrey y mantiene una forma muy similar a la anterior. No obstante, en la cercanía del flanco sur existe una pequeña escarpa de aproximadamente unos 2 m de altura relativa, definiendo al mismo tiempo un canal de menores dimensiones con un ancho del orden de los 25 m y una profundidad máxima de 8,2 m respecto a la superficie libre. El canal Bahía del Pejerrey posee un ancho de aproximadamente 50 m y una profundidad media de 5 m. Presenta una forma sinuosa, con un tramo inicial definido por una leve curvatura hacia el oeste y un tramo final, a una distancia de la desembocadura de

aproximadamente 1,3 km, con una curva pronunciada en sentido opuesto. En la cercanía de la confluencia de este canal con el Canal Principal se midió una profundidad máxima de 11 m. Por otro lado, la transecta VI se encuentra en sector más externo del área de estudio, caracterizándose por un perfil en forma de "V" con una profundidad máxima de 12 m en su centro. Dicha sección se caracteriza por un flanco sur de menor pendiente respecto al flanco opuesto (Fig. 10d).

2.3. Hidrodinámica

2.3.1. Corrientes

Conforme la metodología descrita anteriormente, se obtuvieron mediciones de velocidad (magnitud y componente longitudinal, transversal y vertical) para las 7 transectas durante un ciclo completo de marea. En todos los casos, las corrientes de refluo fueron significativamente más fuertes que su contraparte. Las magnitudes máximas de la velocidad registrada fueron de 117 – 129 cm s^{-1} para el refluo y 83 – 102 cm s^{-1} para el flujo. No obstante, las corrientes de flujo presentaron una mayor duración, siendo este fenómeno observado en la mayor parte del estuario. La diferencia temporal entre ambas condiciones de marea fue de 1.5 h. El régimen de marea es semidiurno, determinándose un rango medio de 3,60 m.

La dirección predominante de la corriente fue, en su mayor parte, paralela a los flancos del canal (Figuras A2 y A3 del Anexo). Mediante los perfiles adquiridos en el thalweg se calculó para cada transecta el vector dirección promedio para las corrientes de flujo y refluo (promediado en profundidad), siendo el ángulo entre ambos estimado en un valor de 176 °. Sin embargo, principalmente en aquellas transectas adyacentes a canales tributarios, se observó un mayor grado de variabilidad. Este fenómeno se reflejó en una desviación de los vectores de velocidad próximos al flanco norte respecto a la dirección promedio (Fig. 11). Una situación análoga se observó durante los estadios avanzados del flujo, donde evidentemente el agua tiende a escurrir hacia las planicies de marea adyacentes.

Las transectas I y II se localizan limitando al tramo curvo en el sector más interno del canal (Fig. 2). Considerando dicha configuración se procuró realizar un análisis detallado de las características del campo de flujo, tanto en sección transversal como en planta, con el fin

de evaluar la influencia que la curvatura del canal ejerce sobre las corrientes de flujo y refluo.

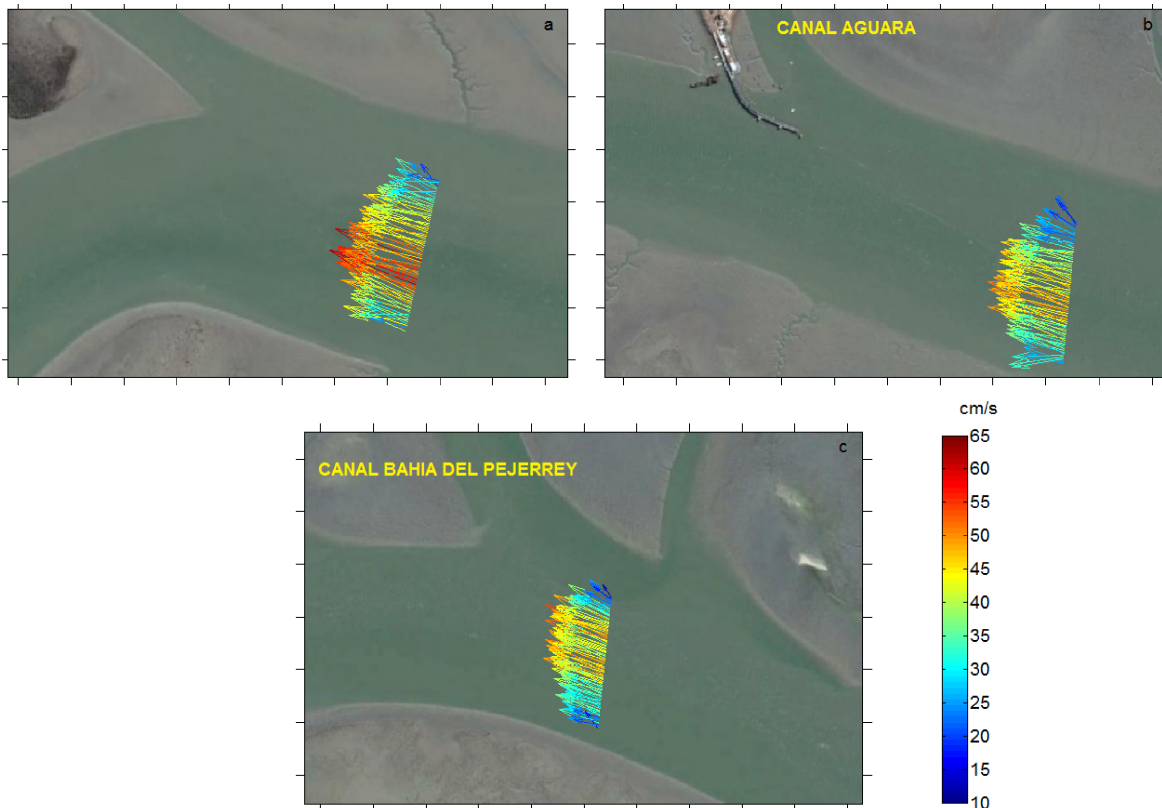


Figura 11

Vista en planta de los vectores de velocidad (promediada en la vertical) durante el flujo en las transectas; a- I. b- IV. y c- VI.

Para ambas transectas se detectó una variación progresiva de la velocidad a lo largo del ancho de las mismas. Este fenómeno fue más pronunciado durante el refluo (Fig. 12), donde se registraron velocidades máximas del orden de $127 - 129 \text{ cm s}^{-1}$. A partir de los datos de magnitud de velocidad, se realizó el cálculo de la velocidad promediada en la vertical. De los valores resultantes se desprende, para la transecta I, una reducción inicial de los mismos desde el flanco sur hacia el norte. La evolución temporal del refluo resultó en una intensificación de la diferencia entre la velocidad máxima y mínima de ambos veriles, estimada en un valor promedio del orden de 60 cm s^{-1} . Esta diferencia presentó un máximo de 68 cm s^{-1} , tras lo cual dicha tendencia se revirtió conforme la condición de marea se aproximó a la bajamar, donde se observó una distribución uniforme de la misma con velocidades máximas que no superaron los 22 cm s^{-1} . Al mismo tiempo se observó un aumento en el área comprendida por el núcleo de altas velocidades.

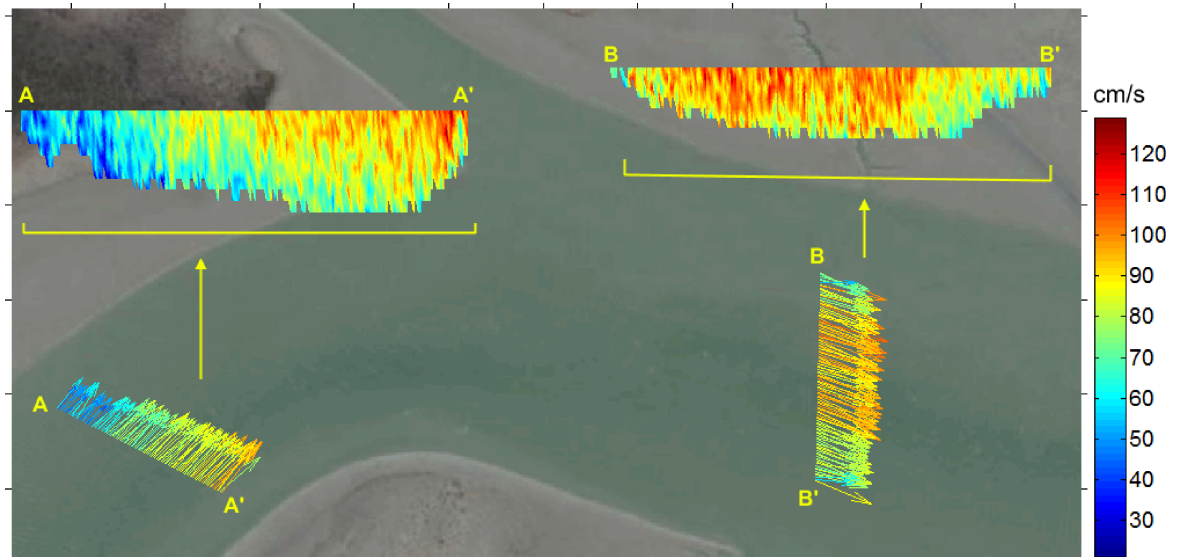


Figura 12

Vista en planta de los vectores de velocidad (promediada en la vertical) en los límites del meandro durante el refluo. Se muestra además la distribución transversal de la magnitud de las corrientes para cada caso.

Para el caso de la transecta II, se midió una diferencia promedio entre ambos flancos del orden de 52 cm s^{-1} . No obstante, como se mencionó con anterioridad, se observó una inversión en la ubicación de las zonas de máxima y mínima velocidad respecto a la transecta I. Es importante aclarar que las disimilitudes en la distribución del mencionado parámetro fueron menos notables, observándose una mayor extensión lateral del sector de mayor velocidad, calculada en un valor promedio del orden de los 175 m medidos desde el flanco norte hacia el flanco sur. Considérese como referencia que dicha transecta presenta en pleamar un ancho máximo de 257 m.

La corriente de flujo se caracterizó por una reducción en la velocidad máxima del orden de 40 y 30 cm s^{-1} para las transectas I y II, respectivamente. En la primera, la variación lateral del mencionado parámetro fueron menos destacables, definiéndose un campo de velocidades con los máximos valores localizados sobre el flanco sur.

Del mismo modo, en la transecta II la distribución de la velocidad presentó una leve asimetría con la zona de máxima velocidad ubicada en la proximidad del flanco sur (Fig. 13). En el flanco opuesto, el análisis de los datos relevados en estadios avanzados del flujo, permitió observar una desviación de la velocidad respecto a la dirección promedio.

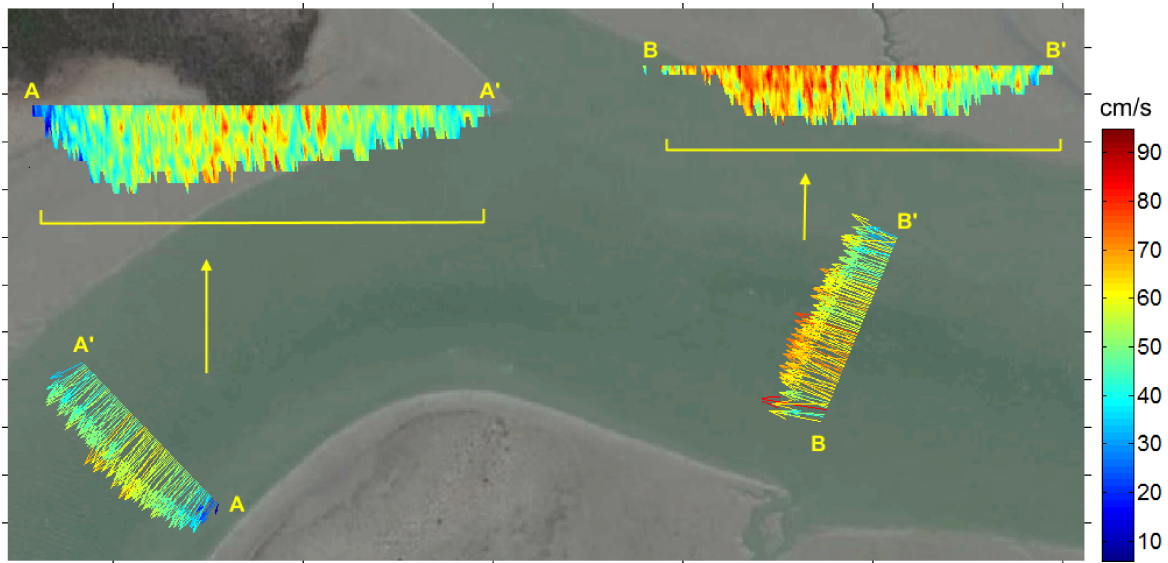


Figura 13

Vista en planta de los vectores de velocidad (promediada en la vertical) en los límites del meandro durante el flujo. Se muestra además la distribución transversal de la magnitud de las corrientes para cada caso.

En las figuras 14 y 15 se observa la distribución en el thalweg de la componente longitudinal (U) y transversal (V) de la velocidad para las transectas I y II respectivamente. Para ambos casos, la proporción que representan ambas componentes respecto a la magnitud de la velocidad se corresponde a lo planteado al principio de la sección.

Para el reflujo, la componente U (Fig. 14b y 15b) presentó mayores valores en la superficie, reduciéndose a velocidades menores en la proximidad del lecho como consecuencia de la fricción. Si bien durante la condición de flujo esta distribución se mantuvo constante, las velocidades fueron notablemente menores. Respecto de la componente V, mientras que durante el reflujo se observaron núcleos de máxima velocidad concentrados hacia la zona media de la columna de agua, el flujo exhibió una mayor dispersión en los valores.

En la transecta III la corriente de reflujo presentó un núcleo de altas velocidades en el centro de la sección transversal, registrándose un valor máximo de 124 cm s^{-1} . Asimismo, se observó en la adyacencia del flanco norte una marcada disminución de la velocidad en la totalidad de la columna de agua. Se calculó la velocidad promediada en profundidad estimándose que dicha reducción fue, en promedio, de aproximadamente un 71 % respecto a los valores máximos, midiéndose velocidades mínimas del orden de 26 cm s^{-1} .

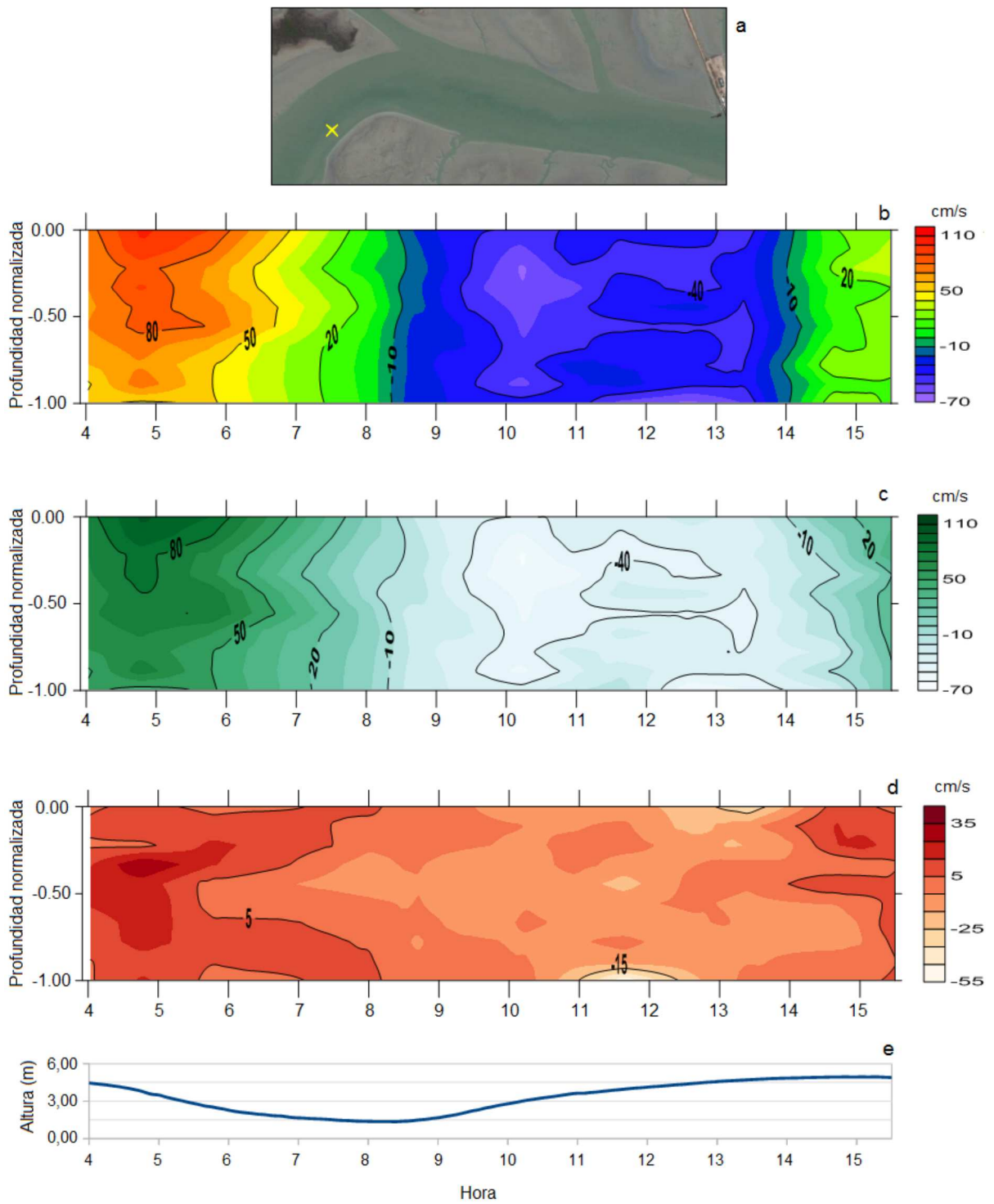


Figura 14
a- Ubicación de los perfiles, b- magnitud de velocidad, c- velocidad longitudinal , d- velocidad transversal y e- curva de marea para la transecta I.

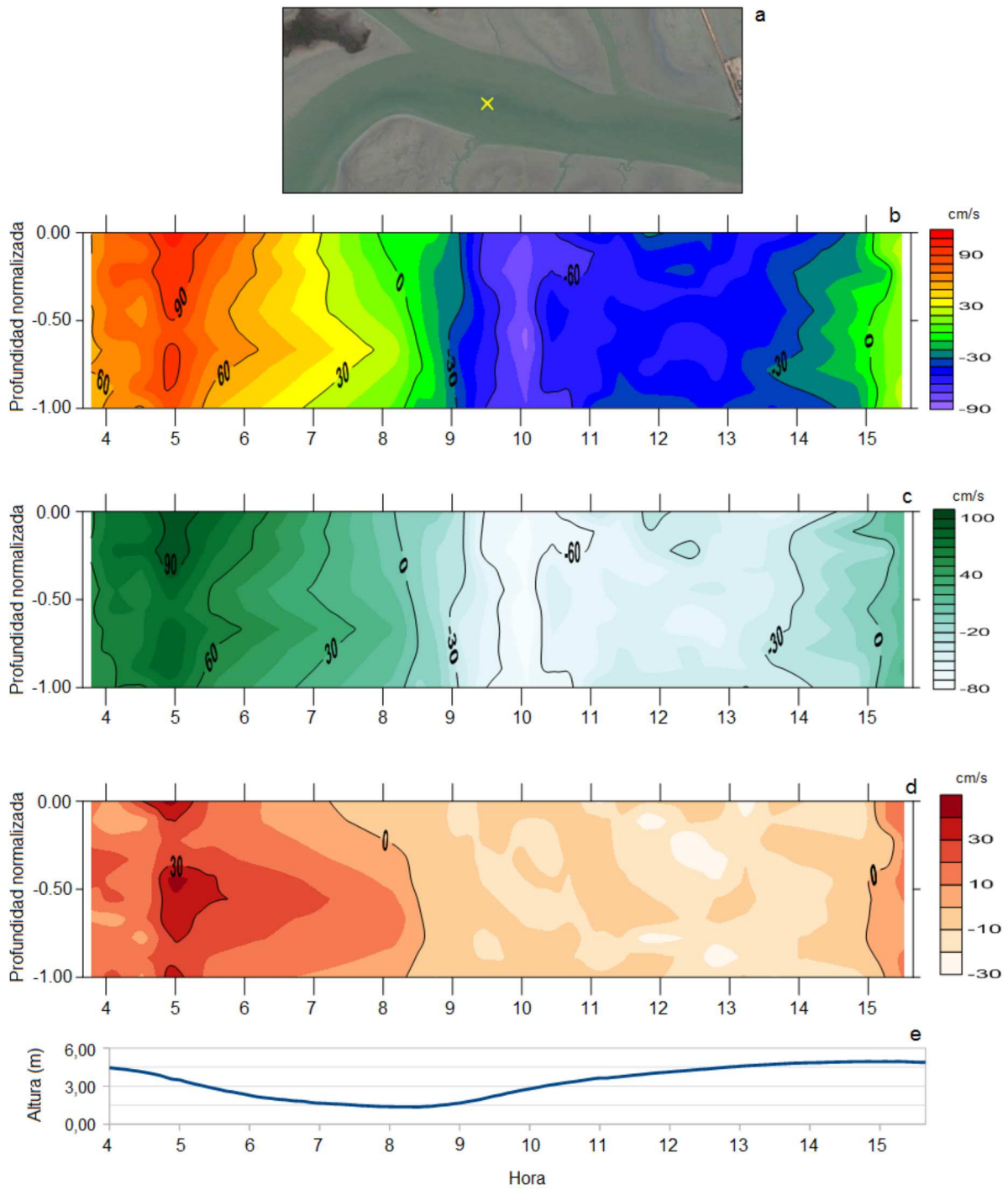


Figura 15
a- Ubicación de los perfiles, b- magnitud de velocidad, c- velocidad longitudinal , d- velocidad transversal y e- curva de marea para la transecta II.

La evolución temporal fue acompañada con una reducción en el área de bajas velocidades, disipándose dicho fenómeno hacia el estadio de bajamar donde, al igual que en el de pleamar, la velocidad presentó valores por debajo de los 25 cm s^{-1} . A diferencia de lo observado en el reflujo, durante su contraparte se observó un desplazamiento de las mayores velocidades hacia la proximidad del flanco sur coincidentes con el sector de mayores profundidades, midiéndose velocidades máximas en el rango de 69 a 102 cm s^{-1} .

Para el sector comprendido entre el muelle y el canal Maldonado, las magnitudes máximas de velocidad registradas fueron de $99 - 124 \text{ cm s}^{-1}$ para el reflujo y de $70 - 100 \text{ cm s}^{-1}$ para el flujo, relación que permaneció aproximadamente constante durante todo el ciclo de marea. Asimismo, en las transectas IV y V, se observó una variación de la magnitud y dirección de la velocidad en el sector adyacente al flanco norte.

El análisis de las mediciones relevadas al este del canal Bahía del Pejerrey (Transecta V), evidenció la existencia durante el reflujo de un pronunciado gradiente de velocidades. De los datos de velocidad promediada en toda la columna de agua se desprenden valores máximos de entre 80 y 90 cm s^{-1} reduciéndose gradualmente hacia el flanco norte donde alcanza valores mínimos de entre 15 y 37 cm s^{-1} . Este fenómeno fue más pronunciado hacia los estadios intermedios de reflujo, desapareciendo a medida que la corriente se desaceleró en la proximidad de la estoa de bajamar.

Mediante la aplicación del método de Rozovskii (1957) se definió la estructura de flujo en el sector próximo a la confluencia. Se registraron núcleos de máximas velocidades primarias hacia el flanco sur con valores de 80 y 98 cm s^{-1} . La circulación secundaria se compone de al menos una celda de circulación en sentido horario, observándose velocidades máximas del orden de 13 cm s^{-1} . Cabe destacar que este valor no presentó importantes fluctuaciones temporales. Adyacente a dicha celda y limitada por una zona de baja velocidad sobre la margen norte, posiblemente exista una celda de menores proporciones, en sentido antihorario. Ambas se encuentran ubicadas en el sector comprendido por el hoyo de erosión (Fig. 16).

Aproximadamente 2 horas después de la pleamar se registró un núcleo de máximas velocidades primarias con una extensión horizontal de aproximadamente 175 m y un límite inferior definido por una profundidad de 5 m.

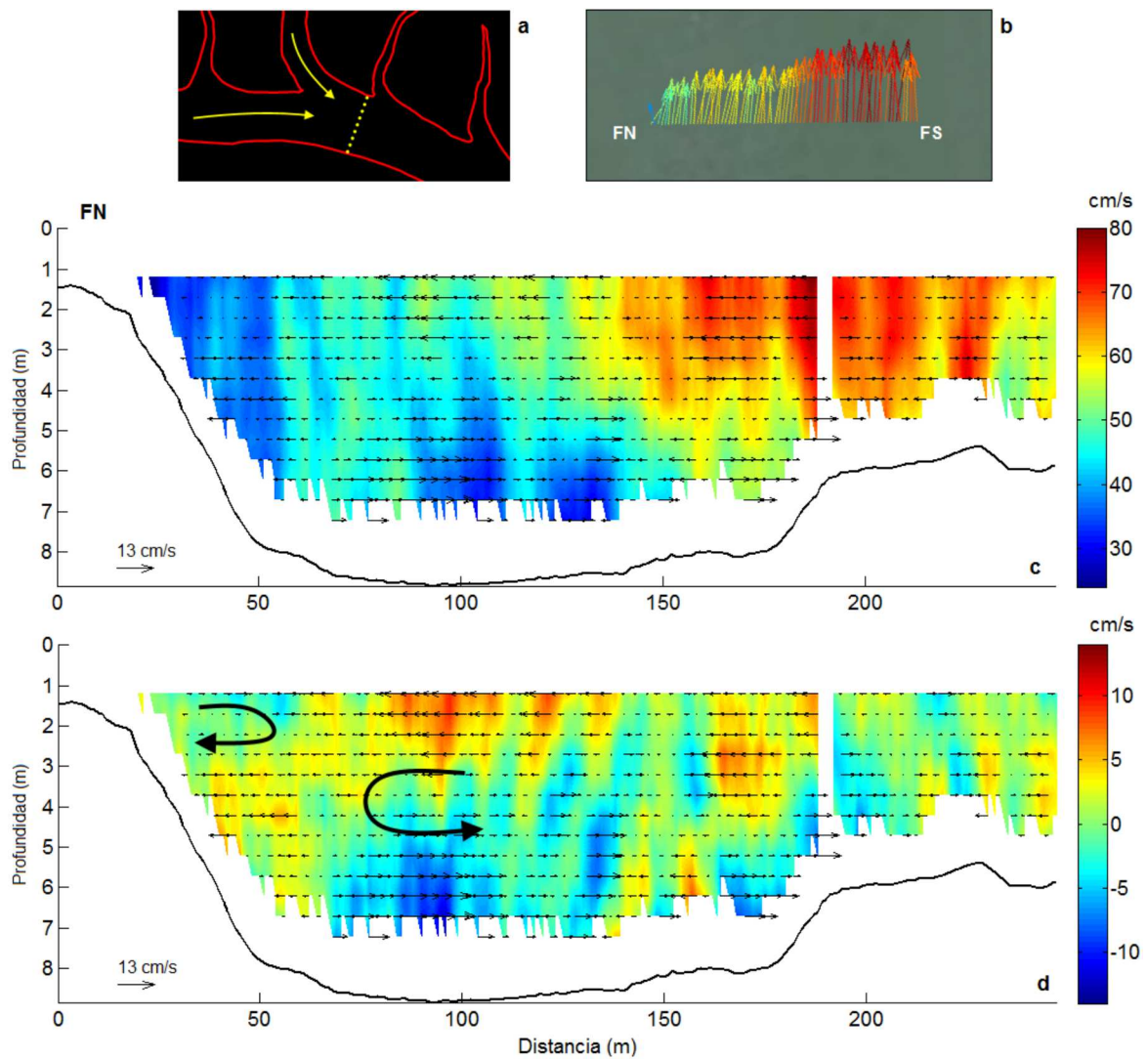


Figura 16

a- Ubicación de la transecta V. **b-** Distribución de los vectores de velocidad promediados en la profundidad durante el reflujó. **c-** Vectores de circulación secundaria estimados por el método de Rozovskii (1957) superpuestos a contornos de componente primaria del flujo. **d-** Similar a b pero superpuestos a contornos de la componente secundaria del flujo.

La evolución temporal del reflujó derivó en una reducción en la extensión de la misma, alcanzando un valor mínimo de 115 m. El examen de las transectas adquiridas a menos de una hora y media de la bajamar reveló una desaceleración de la velocidad primaria, la cual cayó a valores por debajo de 25 cm s^{-1} . Una situación análoga se observó para las velocidades secundarias, donde los máximos no superaron los 10 cm s^{-1} .

Frente al muelle de Puerto Cuatros (Transecta M), durante el reflujó, se registró una aceleración de la corriente como producto del estrechamiento de la sección transversal, observándose hacia la zona central del canal velocidades longitudinales máximas del orden

de los 114 cm s^{-1} . En contraste, durante el flujo los valores fueron notablemente menores, fluctuando entre 73 y 97 cm s^{-1} .

En ambos estadios, se observó en algunas de las transectas obtenidas un notable decremento de la velocidad en la zona adyacente al muelle. Durante la condición de reflujo, cabe destacar un notable aumento en la magnitud de las velocidades transversales orientadas en dirección al flanco sur. El análisis de los datos reveló en la proximidad del muelle, un incremento en la magnitud de las velocidades verticales, con valores máximos del orden de 8 cm s^{-1} . Este fenómeno puede observarse en la figura 19 donde se presentan dos transectas relevadas durante el reflujo.

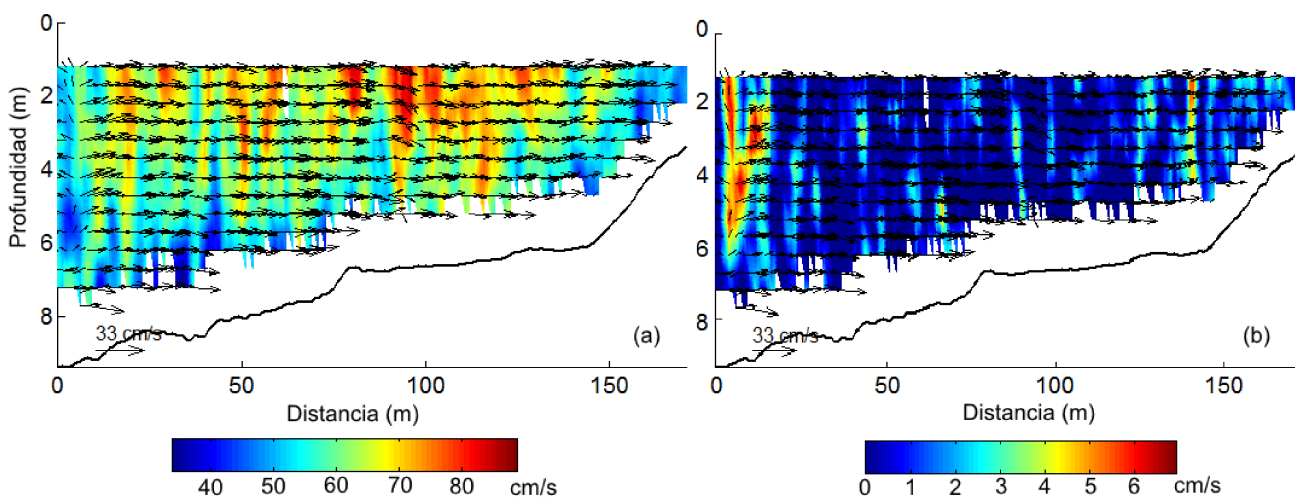


Figura 17

Circulación durante el reflujo en la adyacencia del muelle. a- Vectores de velocidad transversal superpuestos a contornos correspondientes a la componente longitudinal del flujo. v- Distribución de velocidades verticales. Nótese el incremento en la velocidad vertical.

Al igual que el resto de las transectas, las condiciones de estoa se produjeron en proximidad a los estadios de bajamar y pleamar. Los valores de velocidad presentaron una distribución uniforme conforme la profundidad sin evidenciarse diferencias entre las capas superficiales y de fondo.

No obstante, en la transecta IV, durante la estoa de bajamar se observó una leve estratificación de la columna de agua (Fig. 18). En la capa superficial y subsuperficial (aproximadamente entre 0 y $2,8 \text{ m}$ de profundidad) se constató la presencia de una masa de agua de direcciones variables y velocidad máximas de 15 cm s^{-1} , mientras que en profundidad fue posible observar un flujo de agua en sentido estrictamente uniforme

caracterizado por velocidades máximas del orden de los 23 cm s^{-1} con una dirección predominante de 290° .

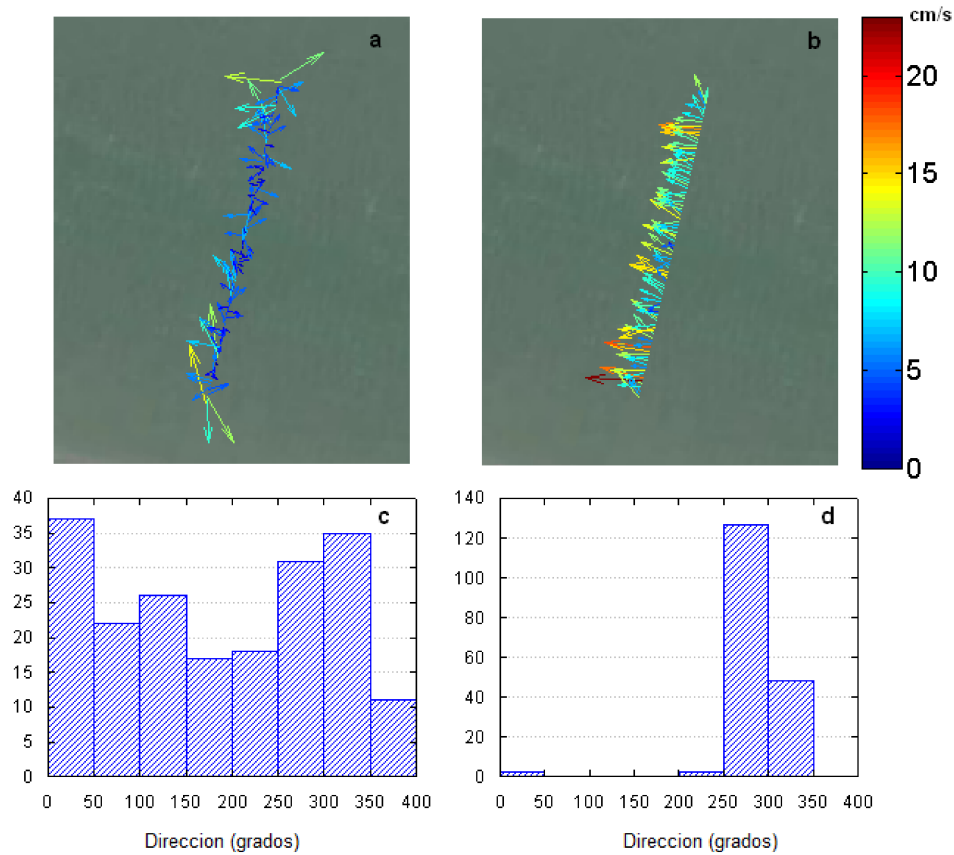


Figura 18

Transecta IV, bajamar. a- Distribución de los vectores de velocidad promediados en la profundidad para la capa superior (0 a 2.8 m). b- Distribución de los vectores de velocidad promediados en la profundidad para la capa inferior (> 2.8 m). c- Histograma de frecuencias de la dirección del vector velocidad de la capa superior. d- Histograma de frecuencias de la dirección del vector velocidad de la capa inferior.

Aproximadamente quince minutos después se observó una aceleración de la corriente midiéndose valores máximos de 32 y 39 cm s^{-1} en las respectivas capas, situación semejante a la tendencia anterior. Al igual que las demás transectas correspondientes al flujo, la dirección predominante de la velocidad fue paralela a la orientación del canal, exhibiendo un valor del orden de 283° .

La transecta VI se ubica en un tramo del canal caracterizado por una geometría en planta sinuosa. En la misma se observó que, a diferencia de los resultados obtenidos para las otras transectas, la componente transversal (V) posee un mayor grado significancia (Fig 19).

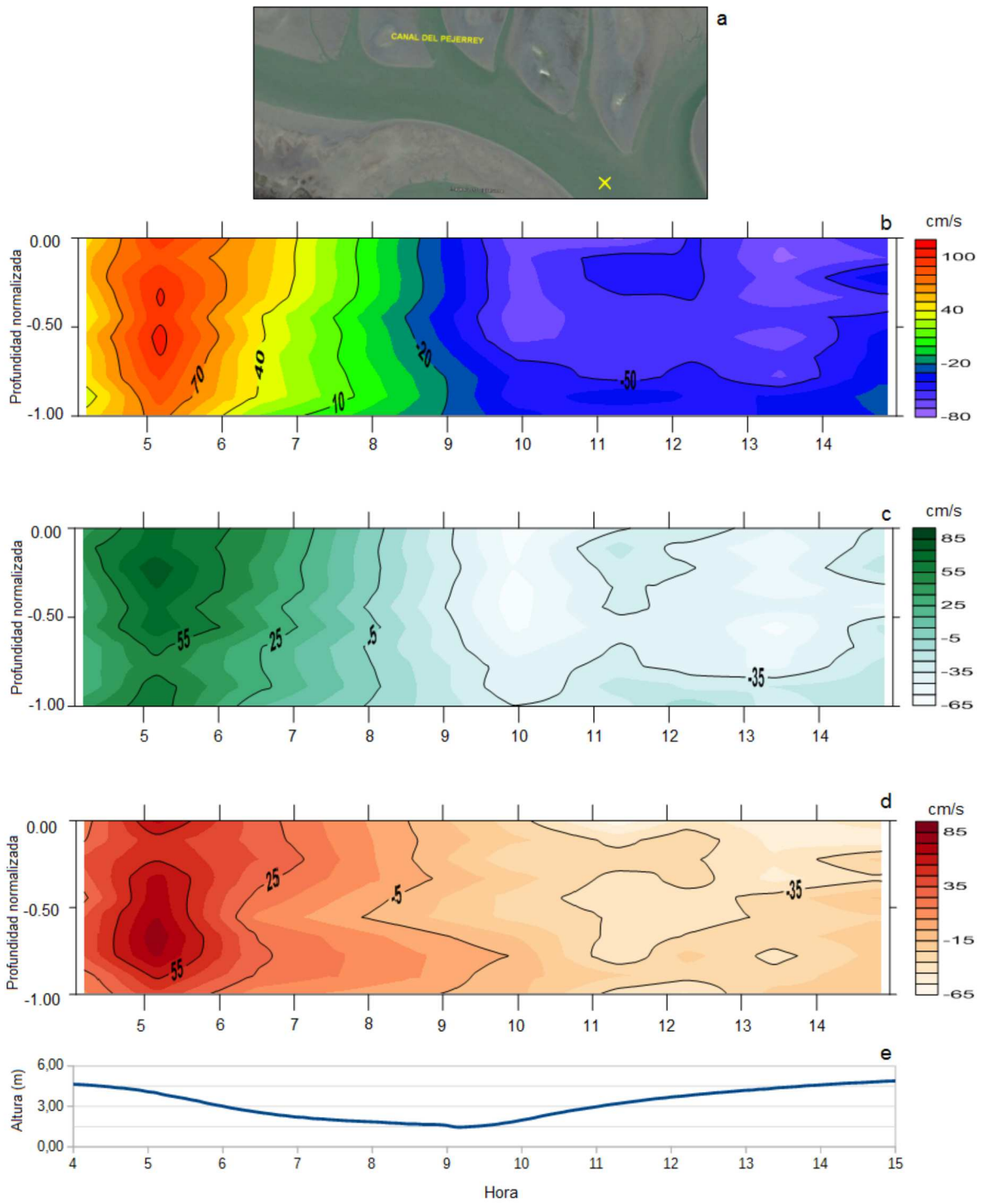


Figura 19
a- Ubicación de los perfiles, b- magnitud de velocidad, c- velocidad longitudinal , d- velocidad transversal y e- curva de marea para la transecta VI.

2.2.4 Dispersión Retrocedente

Mediante el mismo procedimiento llevado a cabo para adquirir datos de velocidad de corriente, se obtuvo la distribución de la dispersión retrocedente en las distintas secciones transversales. Si bien durante las campañas no se realizaron mediciones in situ con el fin de calcular la concentración de sedimento en suspensión (CSS), considerando la relación de proporcionalidad entre esta última variable y la intensidad de la señal provista por el ADCP, puede realizarse una descripción cualitativa de la distribución del sedimento en las distintas secciones transversales.

Los mayores niveles de dispersión retrocedente se detectaron durante los periodos de flujo. En contraste, durante los mismos existió una pronunciada variación de la intensidad de dicho valor en la vertical. Principalmente en aquellas transectas localizadas aguas arriba del muelle, se destaca una región de apreciable continuidad horizontal y fuerte intensidad, ubicada en los niveles superficiales de la columna de agua (Fig.20). Por debajo del límite inferior de esta zona, se observaron menores intensidades, con una distribución homogénea hasta el fondo del canal.

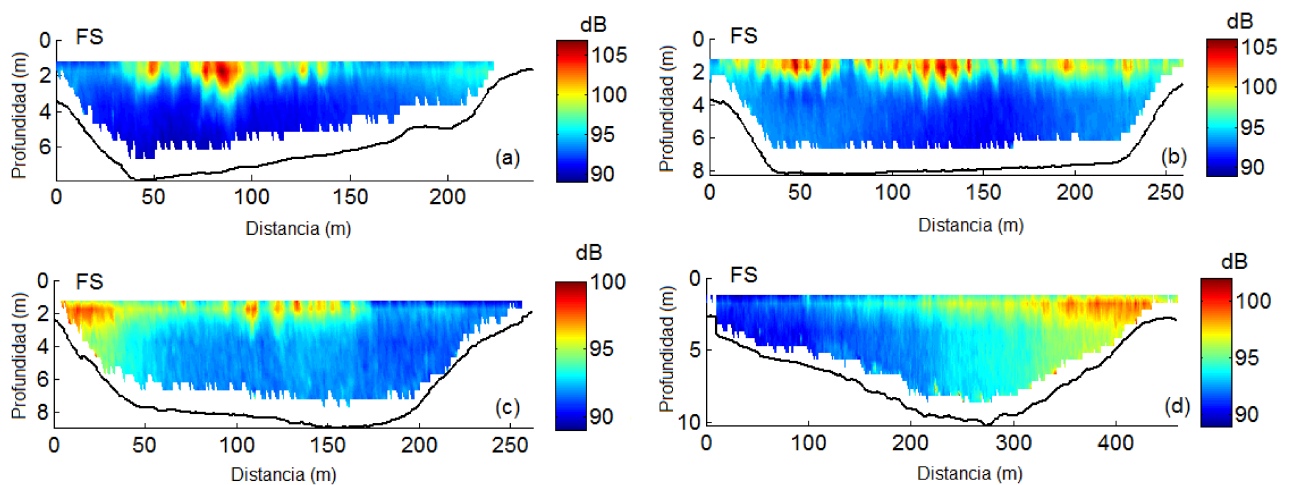


Figura 20
Distribución de la dispersión retrocedente para las transectas; a- I. b- III. c- IV y d-VI durante la condición de flujo.

Durante el reflujo, se detectó en las distintas secciones transversales un aumento en los niveles de retrodispersión acústica en la adyacencia de los flancos (Fig. 21). Al mismo tiempo, se observó en algunas transectas un incremento en los valores de dispersión

retrocedente en las proximidades del fondo (Fig. 21a y b). Durante la estoa tanto de pleamar como de bajamar, la intensidad de la dispersión retrocedente se redujo de forma simultánea a la reducción de la velocidad.

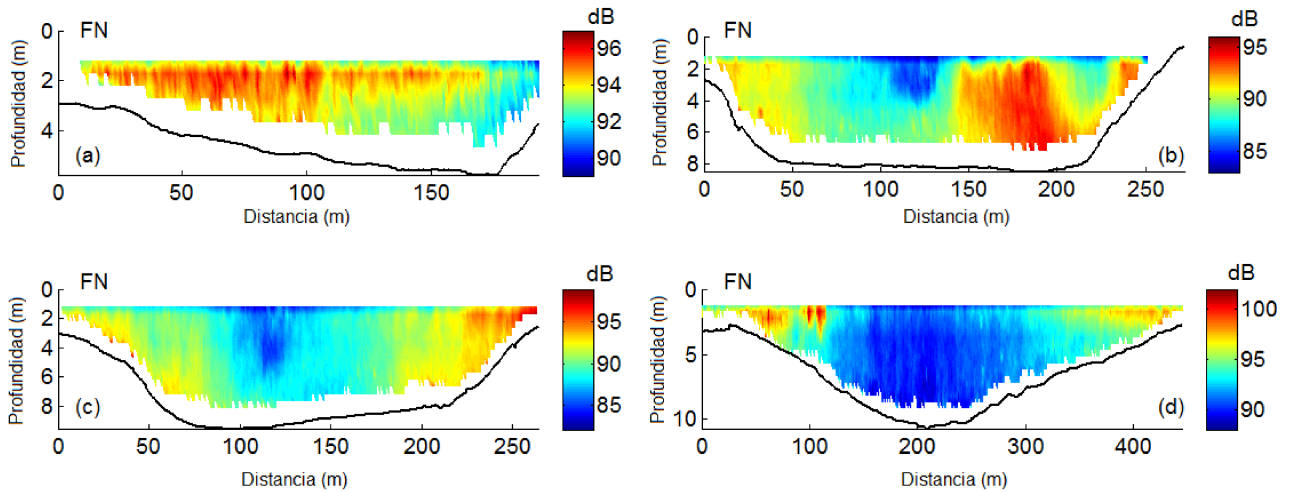


Figura 21
Distribución de la dispersión retrocedente para las transectas; a- I. b- III. c- IV y d-VI durante la condición de reflujos.

3. Discusión

El estuario en general está dominado por una asimetría en la corriente de marea: si bien el flujo se caracteriza por una mayor duración, las corrientes de reflujos poseen una mayor magnitud en la velocidad. La onda de marea en el estuario es cuasi estacionaria debido a la fricción y la reflexión (Perillo y Piccolo 1991). Las extensas planicies de marea también juegan un papel importante en la reducción de las corrientes de flujo a medida que la marea las inunda, pero durante el reflujos, el flujo de agua que retorna desde las planicies incrementa su velocidad a medida que tiende a concentrarse en los canales. Un claro ejemplo de esta condición observada en el área de estudio (Figura 1) se refleja en el hecho de que todos los canales secundarios tienen su desembocadura desviada en la dirección del reflujos del Canal Principal.

Durante el periodo de estudio predominó el viento NO con velocidades promedio de $17,2 \text{ km h}^{-1}$ e intensidades máximas de $45,8 \text{ km h}^{-1}$. Si bien esta dirección es paralela a la orientación del canal, no se observó que ejerciese un efecto sobre la corriente superficial. Estos resultados concuerdan con aquellos derivados de experimentos numéricos realizados por Palma y Piccolo (1997) quienes estudiaron el efecto del viento NO y SE sobre la marea y la dirección y la magnitud de las corrientes en el estuario de Bahía Blanca. Para el primer caso, utilizaron una magnitud máxima de 54 km h^{-1} y una media de 36 km h^{-1} . Obsérvese que dichos valores son superiores a los calculados en la sección 2.1 a partir del análisis estadístico de los datos provistos por la EMAC. Los mencionados autores determinaron que, a diferencia de lo que sucede con la marea, en el sector interno el viento no produce una modificación en las características de la corriente, la cual permanece alineada con el canal. En consecuencia, puede deducirse que el campo de corrientes descrito en la presente tesis corresponde exclusivamente a la interacción de la onda de marea y la geomorfología.

Las variaciones laterales de la velocidad, observadas en las transectas I y II, se encuentran directamente relacionadas con la curvatura del canal. Durante el reflujos puede distinguirse mediante la visualización de los vectores de velocidad una tendencia de la línea de corriente que une los puntos de máxima magnitud a converger hacia el flanco sur en la transecta I y hacia el norte en la II. En la primera, este fenómeno puede explicarse considerando que la curva previa al tramo en cuestión, probablemente induzca al flujo a volcarse al flanco sur. En contraste, durante la condición de flujo se observó para ambas

transectas un desplazamiento de dicha línea de corriente hacia la adyacencia del margen interno. Dado que no poseemos una transecta ubicada de modo tal que contenga los puntos de máxima curvatura del cauce en este sector, no es posible estimar con precisión el campo de velocidades en dicha zona.

A diferencia de lo observado en canales fluviales e inclusive en otros canales de marea, en el tramo curvo del canal aquí analizado, las máximas profundidades ocupan una mayor área de la sección transversal, no restringiéndose a la inmediatez del margen externo. Este dato surge del análisis geomorfológico realizado en la presente tesis y los mapas batimétricos derivados de las investigaciones de Gómez et al. (1996). En principio, esto parecería indicar que las máximas velocidades no se concentran sobre dicho flanco, sino que poseen una mayor distribución lateral.

En el margen externo de la curva puede observarse la presencia de un canal de marea de pequeñas dimensiones. Usualmente, estos canales tienden a secarse durante el reflujos. Sin embargo, es esperable que en el intervalo de tiempo a lo largo del cual esto sucede, la descarga del mismo afecte el campo de velocidades. Probablemente la interacción de ambos flujos tienda a generar una zona de bajas velocidades al mismo tiempo que desplaza la zona de máximas velocidades hacia centro del canal. Asimismo, la reducción de las velocidades en la proximidad del flanco norte para la transecta III podría ser explicado por la existencia de un canal de similares características. En estas transectas no se detectó la presencia de flujos secundarios bien definidos.

Lógicamente, la estructura de flujo hasta aquí descrita se verá reflejada en el modelado y evolución de las secciones transversales del canal; los procesos erosivos y depositacionales se localizarán sobre los márgenes donde se concentran las velocidades máximas y mínimas, respectivamente. Establecer esta relación para un canal de marea refleja un nivel mayor de complejidad considerando la bidireccionalidad del flujo que lo caracteriza. Valiéndonos de la correlación del campo de corrientes y los perfiles batimétricos podemos definir la tendencia evolutiva de este sector conforme la asimetría de velocidades. Por lo expuesto, la corriente de reflujos evidentemente ejerce un control de modo tal que la localización de los procesos sedimentarios se ve reflejada en la distribución de las velocidades para la mencionada condición de marea.

La variación lateral de la velocidad, observada en la transecta adyacente a la

desembocadura del canal Bahía del Pejerrey evidencia la presencia de una capa de corte producto de la confluencia entre el flujo correspondiente a dicho tributario y el flujo del Canal Principal. La aplicación del método de Rozovskii (1957) permitió observar la presencia en un plano bidimensional de celdas de circulación secundaria. Dicho fenómeno fue más pronunciado hacia las etapas medias del reflujó, desapareciendo hacia la estoa asociada a bajamar. Esto puede explicarse, teniendo en cuenta los posibles efectos sobre el flujo principal de la escorrentía derivada de las planicies de mareas adyacentes, la desaceleración del flujo principal y la disminución gradual de la descarga del canal Bahía del Pejerrey. Como se mencionó anteriormente, la celda adyacente al flanco norte no se encuentra bien definida, pudiendo interpretarse esta falta de definición en función de la interferencia con la morfología o con el flujo proveniente de las planicies adyacentes.

En la Transecta IV, situada al este de la desembocadura del canal Aguará, no se observaron estructuras de flujo secundarias. Durante el reflujó se detectó un núcleo de mayor velocidad hacia el centro del canal con una reducción del flujo hacia el lecho y los márgenes. Con base en estas observaciones, y considerando la distancia respecto a la desembocadura, se puede deducir que la transecta se encuentra en la denominada zona de restablecimiento de flujo.

Estudios previos en el sector interno del Canal Principal realizados por Pierini et al. (2005), concluyeron que este sector presenta perfiles verticalmente homogéneos de salinidad, temperatura y concentración de suspensión de sedimentos, con una estratificación mínima sólo durante la marea baja. Durante las fases iniciales del flujo, el agua del mar que entra en el estuario a través del Canal Principal se diluye con pequeñas cantidades de agua de baja salinidad descargada por el canal tributario, con un aumento de la salinidad hacia la zona inferior. No es posible definir la diferencia observada entre las capas superficial e inferior en términos de un gradiente de densidad. Esta hipótesis surge precisamente de las características oceanográficas del estuario durante el período de estudio, donde la descarga de agua dulce fue mínima.

En ausencia de datos de salinidad, como primera aproximación, el fenómeno mencionado puede atribuirse a la aceleración de la corriente de flujo. La capa superficial de baja velocidad observada, caracterizada por direcciones variables puede corresponder a la descarga del canal Aguará en el Canal Principal y el escurrimiento desde las planicies de marea. Dado que la velocidad de la capa profunda no es lo suficientemente elevada para

generar mezcla turbulenta, la capa superficial presenta un estancamiento efímero, tendiente a desaparecer a medida que el flujo se acelera y la marea se propaga en el canal secundario. Mediante simulación numérica, Carbone et al.(2014) evaluaron la incidencia e interacción que la descarga de los ríos tributarios tienen en el sector de estudio. Concluyeron que ejercen una influencia significativa en la dinámica local, determinándose una velocidad de la descarga fluvial en el orden de 50 - 100 cm s⁻¹ No obstante, es importante aclarar que dichas simulaciones se realizaron considerando caudales excepcionales como respuesta a eventos de precipitación que superaron los 90 mm. Claramente esta situación no condice con las condiciones meteorológicas imperantes durante el relevamiento. Sin embargo, es importante considerar este factor a la hora de analizar tanto el patrón de circulación como su influencia en la distribución de los distintos parámetros físico-químicos, especialmente durante el período de lluvias.

En el muelle, durante el refluo se registró una aceleración de corriente como resultado del estrechamiento de la sección transversal. Se observó un núcleo de alta velocidad hacia el centro de la misma, mientras que en la adyacencia del muelle se detecta un incremento en las velocidades verticales. Probablemente la geometría del muelle, la interacción del flujo con los pilotes del mismo y los buques encallados en las planicies de marea cercanas produzcan una compleja estructura de flujo. Con objeto de analizar en detalle el campo de flujo y los procesos erosivos en este sector, deben considerarse las características estructurales del muelle, el número y dimensiones de los pilotes, su orientación respecto a la corriente y la interacción de esta con los barcos allí presentes.

La presencia del muelle puede brindar además, una explicación al desplazamiento de la zona de altas velocidades desde la zona central hacia el flanco sur observado en la transecta III. En este último, el muelle conduce a una distorsión de las líneas de corrientes, de modo tal que se genera una zona de menores velocidades tras el mismo.

Finalmente, sobre la base del análisis de la distribución de la dispersión retrocedente se definió la dinámica del sedimento en suspensión para el área de estudio. Durante el refluo, donde las corrientes son más fuertes, los sedimentos depositados durante la eosta de pleamar son resuspendidos desde el fondo, explicando así el incremento en los valores de dispersión retrocedente a mayores profundidades. Al mismo tiempo la corriente erosiona los veriles del canal, derivando en una gran cantidad de sedimento transportado en

suspensión hacia el exterior del mismo. Durante la condición de flujo, el esfuerzo de corte generado por la corriente, no posee la suficiente magnitud para iniciar el movimiento del mismo, por lo que no se observaron eventos de resuspensión. En contraste, como se mencionó con anterioridad, en la mayor parte de las transectas se detectó una capa de elevada intensidad hacia la zona superficial de la sección transversal. Este fenómeno, observado también en otros sectores del estuario (p.e., Perillo et al., 2005), tiene su origen en la erosión de las planicies de marea adyacentes a medida que el agua las inunda durante el flujo, dando como consecuencia zonas de elevada concentración de sedimento desplazándose hacia la cabecera del Canal Principal.

4. Conclusiones

El análisis morfológico del sector interno del Canal Principal permitió definir dos sectores bien diferenciados. El tramo ubicado desde Puerto Cuatrerros hasta el Canal Maldonado se caracterizó por las mayores profundidades del sector de estudio. Las mismas se localizaron en la proximidad del flanco norte, registrándose un valor máximo durante la pleamar de 12 m en la zona más externa. Al oeste del muelle las profundidades máximas no superaron los 8,5 m. En la zona más interna, los perfiles batimétricos no presentaron una correlación entre si.

Respecto a las características hidrodinámicas, se determinó una marcada diferencia en la magnitud de las velocidades de las corrientes de flujo y reflujos. Estas últimas, alcanzaron valores máximos de 129 cm s^{-1} . Asimismo, las corrientes de flujo se caracterizaron por una mayor duración pero menores velocidades, no superando los 102 cm s^{-1} .

El método de Rozovskii (1957) permitió definir la presencia de celdas de circulación secundaria. Dado que se cuenta con solo una transecta en los sectores donde se aplicó, se necesitará de investigaciones posteriores a fin de ampliar los resultados derivados del presente estudio. Para el caso de la transecta V ubicada en la desembocadura del canal Bahía del Pejerrey se sugiere realizar mediciones de velocidad al oeste de la desembocadura y en el interior del canal secundario. Esto permitiría no solo diferenciar las distintas regiones de flujo asociadas a la confluencia de canales, sino también definir las características del flujo en función de la variación de la relación de descargas derivada de la fluctuación periódica del nivel del mar.

El patrón de circulación observado en el área de estudio se encuentra fuertemente afectado por la geomorfología, especialmente debido a la presencia de los canales tributarios y las planicies de marea adyacentes. El nivel real de influencia de estas últimas precisa de un estudio adicional, el cual requiere una nueva estrategia de medición para monitorear el efecto de las planicies, ya que el método estándar de secciones transversales no es suficiente para evaluarlo. Se propone realizar transectas tanto transversales al canal (como en este estudio) como paralelas a los flancos del mismo, de manera que el flujo y el reflujos del agua hacia y desde las planicies se puedan seguir a lo largo del ciclo de mareas.

Por último, en base a los resultados del presente estudio se propone modelar la dinámica del canal incorporando un mayor número de variables (descarga fluvial, condiciones

meteorológicas excepcionales, entre otras) con el fin de determinar la influencia que las mismas ejercen en la circulación.

5. Bibliografía

Angeles, G. R., Perillo, G. M. E. & Piccolo, M. C. (2003). Geomorphologic, circulation and dynamyc analysis in a meandering tidal channel, Bahía Blanca Estuary (Argentina). *Thalassas: An international journal of marine sciences*, 19(1), 49-58.

Aardom, J. H., & Mol, J. W. (2005). Quantification of sediment concentrations and fluxes from ADCP measurements. In *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (No. 12.05).

Bathurst, J. C., Thorne, C. R., & Hey, R. D. (1977). Direct measurements of secondary currents in river bends. *Nature*, 269(5628), 504-506.

Baranya, S., & Józsa, J. (2013). Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(3), 232-240.

Best, J. L. (1987). Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology

Carbone, M. E., Limbozzi, F., Alberdi, E., & Abalo, P. (2008). Effect of the flowrate variations of Sauce Chico and Napostá Grande rivers over the inner part of Bahia Blanca estuary—application of the mohid water modeling system. *Perspectives on integrated coastal zone management in South America*, 489-500.

Carbone, M. E., Alberdi, E., Limbozzi, F., Abalo, P., Perillo, G. M. E., & Piccolo, M. C. (2014) Incidencia de la variabilidad hidrológica de los cauces tributarios permanentes sobre el sector interno del estuario de Bahía Blanca (Argentina). *Memorias del II Congreso Internacional de Llanuras*, Santa Fe, Argentina, Universidad Nacional del Litoral. E-Book

Chant, R. J. (2002). Secondary circulation in a region of flow curvature: Relationship with tidal forcing and river discharge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C9).

Cuadrado, D. G., Ginsberg, S. S. & Gómez, E. A. (2004). Geomorfología. En Piccolo, M. C. y Hoffmeyer M. S., *Ecosistema del Estuario de Bahía Blanca* (pp. 29-38). Bahía Blanca. Instituto Argentino de Oceanografía.

Dronkers, J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3), 117-131.

Gartner, J. W. (2004). Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay,

California. *Marine Geology*, 211(3), 169-187.

Georgas, N., & Blumberg, A. F. (2004). The influence of centrifugal and coriolis forces on the circulation in a curving estuary. In *Estuarine and Coastal Modeling (2003)* (pp. 541-558).

Ginsberg, S. S., & Perillo, G. M. (1999). Deep-scour holes at tidal channel junctions, Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Marine Geology*, 160(1), 171-182.

Ginsberg, S. S., & Perillo, G. M. (2004). Characteristics of tidal channels in a mesotidal estuary of Argentina. *Journal of Coastal Research*, 489-497.

Gómez, E. A., Ginsberg, S. S., & Perillo, G. M. E. (1996). Geomorfología y sedimentología de la zona interior del Canal Principal del Estuario de Bahía Blanca. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 3(2), 55-61.

Guinder, V. A., Popovich, C. A., & Perillo, G. M. E. (2009). Particulate suspended matter concentrations in the Bahía Blanca Estuary, Argentina: implication for the development of phytoplankton blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(1), 157-165.

Hansen, D. V., & Rattray, M. (1966). New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, 11(3), 319-326.

Hughes, Z. J. (2012). Tidal channels on tidal flats and marshes. In *Principles of Tidal Sedimentology* (pp. 269-300). Springer Netherlands.

Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2003). Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatter from an ADCP. In *Proceedings of Coastal Sediments* (Vol. 3).

Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2008). Lateral circulation and suspended sediment transport in a curved estuarine channel: Winyah Bay, SC, USA. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C9).

Kjerfve, B., Shao, C. C., & Stapor, F. W. (1979). Formation of deep scour holes at the junction of tidal creeks: an hypothesis. *Marine Geology*, 33(1), M9-M14.

Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Guerrero, M., & Amsler, M. L. (2014). Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic Doppler technology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7), 04014023.

- Le Floch, J. F. (1961). *Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime*. Centre de Recherches et d'Études Océanograph..
- Lee, J., Webb, B. M., Dzwonkowski, B., Park, K., & Valle-Levinson, A. (2013). Bathymetric influences on tidal currents at the entrance to a highly stratified, shallow estuary. *Continental Shelf Research*, 58, 1-11.
- Lerczak, J. A., & Rockwell Geyer, W. (2004). Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, 34(6), 1410-1428.
- Lueck, R. G., & Lu, Y. (1997). The logarithmic layer in a tidal channel. *Continental Shelf Research*, 17(14), 1785-1801.
- Melo, W. D., Schillizzi, R., Perillo, G. M. E., & Piccolo, M. C. (2003). Influencia del área continental pampeana en la evolución morfológica del estuario de Bahía Blanca. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 10(1), 39-52.
- Morell, M., Vionnet, C., & Tassi, P. (2012). Patrones 3D del flujo en una difluencia del sistema aluvial del Río Paraná, Argentina. *1er Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*.
- Palma, E.D., & Piccolo M.C., 1997. Marea meteorológica en el Estuario de Bahía Blanca, *19 Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*, Actas 331-336.
- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Orfeo, O., Hardy, R. J., & Kostaschuk, R. (2007). Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence–diffluence, Río Paraná, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1), 155-162.
- Parsons, D. R., Jackson, P. R., Czuba, J. A., Engel, F. L., Rhoads, B. L., Oberg, K. A., ... & Riley, J. D. (2013). Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(11), 1244-1260.
- Perillo, G. M. E., Pierini, J. O., Pérez, D. E., & Piccolo, M. C. (2005). Suspended sediment fluxes in the middle reach of the Bahia Blanca Estuary, Argentina. In *High Resolution Morphodynamics and Sedimentary Evolution of Estuaries* (pp. 101-114). Springer Netherlands.
- Perillo, G. M. E. (2009). Tidal courses: classification, origin and functionality. *Coastal*

Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach. Elsevier, 185-209.

Perillo, G. M. E., & Piccolo, M. C. (1991). Tidal response in the Bahía Blanca estuary, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 437-449.

Perillo, G. M. E., Piccolo M. C., Palma, E. D., Perez, D. E., & Pierini, J.O., (2004). Oceanografía Física. *El Ecosistema del estuario de Bahía Blanca*, Bahía Blanca, Argentina, pp 61-67

Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (1990). Physical characteristics of the Bahía Blanca estuary (Argentina). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31(3), 303-317.

Pierini, J. O., Perillo, G. M. E., Carbone, M. E., & Marini, F. M. (2005). Residual flow structure at a scour-hole in Bahia Blanca Estuary, Argentina. *Journal of coastal research*, 784-796.

Prandtl, L. (1952). *The essentials of fluid dynamics* Blackie. London-Glasgow.

Rhoads, B. L., & Kenworthy, S. T. (1998). Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(2), 171-191.

Rollnic, M., & Rosário, R. P. (2013). Tide propagation in tidal courses of the Pará river estuary, Amazon Coast, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 65(sp2), 1581-1586.

Rozovskii, I. L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR.

Seim, H., Blanton, J., & Elston, S. (2006). Tidal circulation and energy dissipation in a shallow, sinuous estuary. *Ocean Dynamics*, 56(3-4), 360-375.

Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Parsons, D. R., Best, J. L., & Haydel, R. (2016) Estructura del flujo y morfología en dos confluencias aguas abajo de islas en el río Paraná. A; *Morfología de ríos y procesos fluviales*, 21.

Thorne, C. R., Zevenbergen, L. W., Pitlick, J. C., Rais, S., Bradley, J. B., & Julien, P. Y. (1985). Direct measurements of secondary currents in a meandering sand-bed river. *Nature*, 315(6022), 746-747.

Wall, G. R., Nystrom, E. A., & Litten, S. (2006). Use of an ADCP to compute suspended sediment discharge in the tidal Hudson River, NY. In *Proceedings, 8th Federal Interagency Sedimentation Conference*.

Anexo

Transecta	Inicio		Final	
	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Latitud (°S)	Longitud (°O)
I	38,750314	62,404043	38,751304	62,402246
II	38,749043	62,394615	38,751243	62,394583
III	38,750822	62,382708	38,752472	62,384123
M	38,751581	62,379555	38,753521	62,379524
IV	38,752887	62,374108	38,755122	62,374852
V	38,753990	62,358147	38,756479	62,358815
VI	38,758179	62,347719	38,762748	62,348639
	Latitud (°S)		Longitud (°O)	
DGPS	38,750385		62,380947	
EMAC	38,857418		62,117353	
Mareógrafo	38,750385		62,380947	
Est. CERZOS	38,666020		62,234241	

Tabla 1
Posición geográfica de las transectas e instrumentos utilizados.

	11 / 07		12 / 07	
Dirección	Velocidad media (km s⁻¹)	Velocidad máxima (km s⁻¹)	Velocidad media (km s⁻¹)	Velocidad máxima (km s⁻¹)
N	12,9	32,2	10,9	19,7
NE	3,4	25,3	11,9	16,4
E	-	-	-	-
SE	0,92	7,10	-	-
S	-	-	-	-
SO	-	-	8,7	13,8
O	-	-	-	-
NO	20,0	45,8	14,2	34,6

Tabla 2
Velocidad media y máxima correspondiente a cada dirección del viento.

Velocidad (km h⁻¹)	Frecuencia (%)	
	11 / 07	12 / 07
0 – 1	15,29	4,53
1-10	8,24	22,63
10-20	21,18	55,56
20-30	31,76	16,05
30-40	16,47	1,23
40-50	7,06	0,00
Velocidad media	20,0	14,2
Velocidad máxima	45,8	34,6

Tabla 3
Frecuencia y velocidad media y máxima del viento NO para los días 11 y 12 de Julio de 2011.

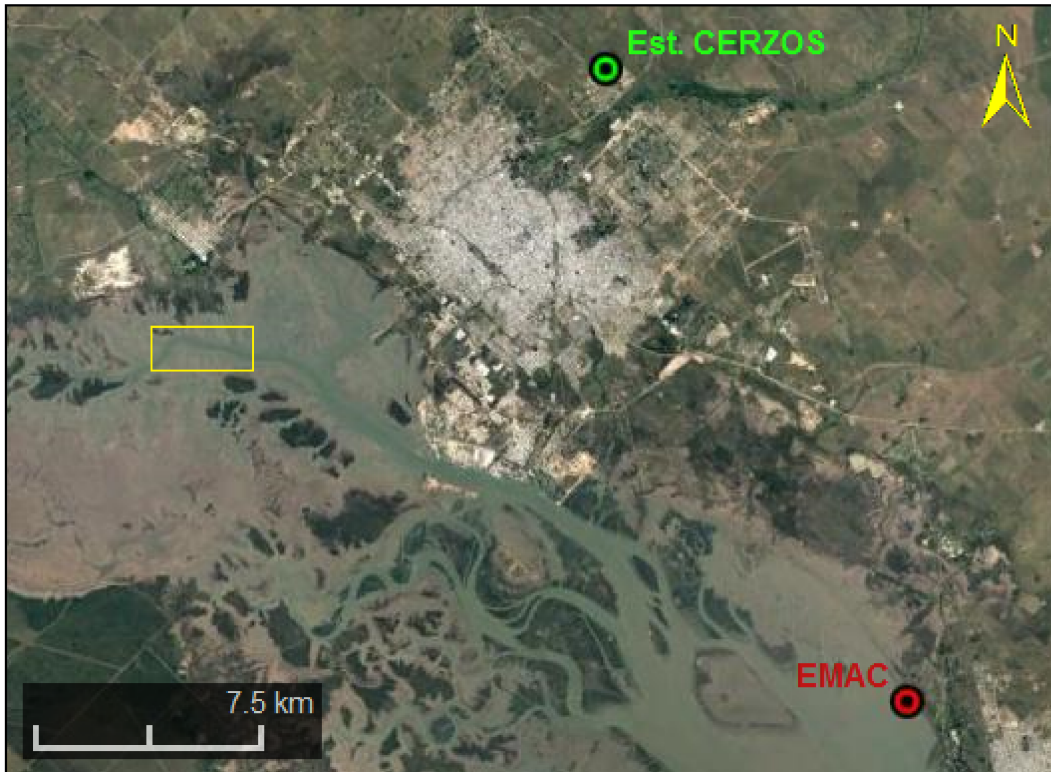


Figura 1
Ubicación de la estación hidrometeorológica del CERZOS y de la EMAC

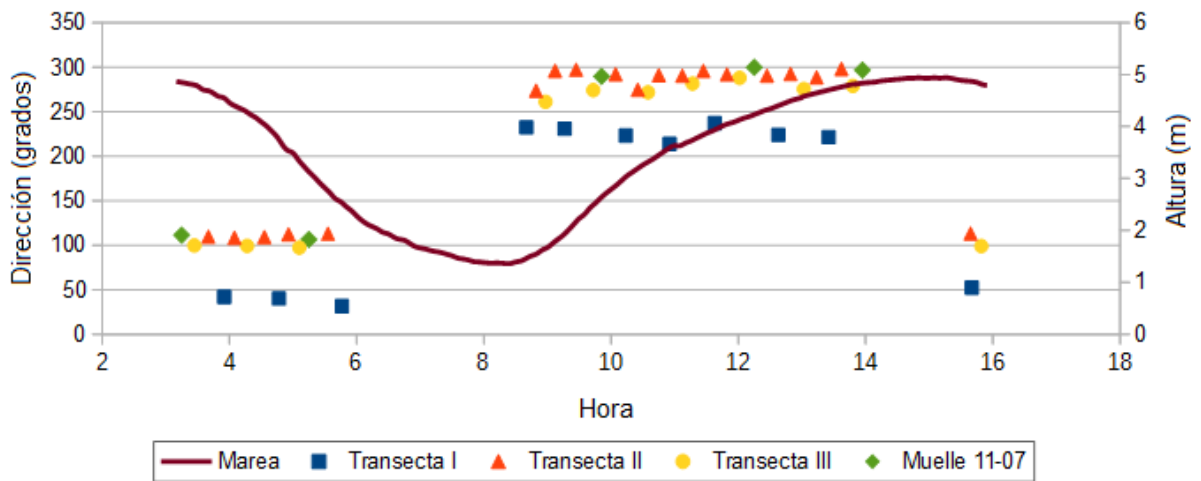


Figura 2
Dirección de la corriente (promediada en profundidad) en el thalweg para el día 11 de Julio de 2011. Cabe destacar que la orientación del sector del canal donde se encuentra la transecta I es de aproximadamente 40°, mientras que para el resto del canal es de aproximadamente 120°.

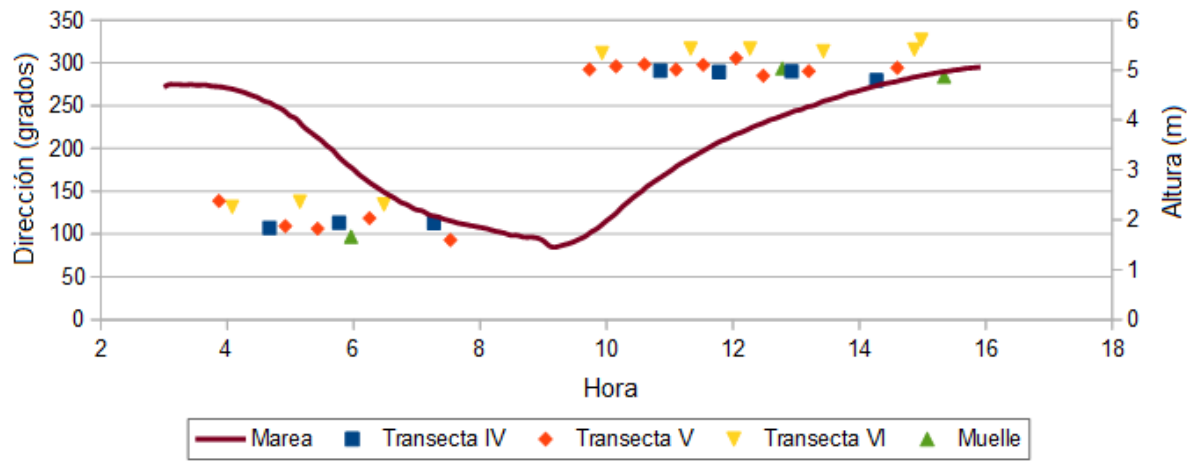


Figura 3
 Dirección de la corriente (promediada en profundidad) en el thalweg para el día 12 de Julio de 2011.