

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CIRCULACIÓN LATERAL EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO A PARTIR DE DATOS
DE TERRENO**

VITTORIO BONANI POMAROLLI ¹
MEGAN E. WILLIAMS ²
RAÚL FLORES AUDIBERT ³

RESUMEN

El estudio de la hidrodinámica es de vital importancia para el monitoreo del comportamiento de los estuarios frente a las distintas condiciones presentes. Por lo mismo, el presente estudio tiene como objetivo identificar la influencia de la marea y de la curvatura en la circulación lateral en la zona intermareal del estuario del Río Maipo durante una campaña de medición de datos entre el 17 y 22 de enero del 2022, a partir de dos velocímetros Doppler acústicos (ADV) con los que se mide la velocidad del flujo, dos sensores Open Wave Height Logger (OWHL) con los que se mide presión y un Solinst-CTD a partir del cual se determina la salinidad. La metodología consiste en que a partir de un sistema de coordenadas curvilíneo-polar, que se ajusta a las posiciones de los sensores, y las mediciones en terreno, cuantificar los términos de la ecuación de cantidad de movimiento lateral, para luego describir la influencia de la curvatura y de la marea en la circulación lateral dentro del estuario. Se analizan tres períodos de pleamar, en los cuales se estima que la influencia del gradiente de presión, de la aceleración local y de la aceleración advectiva, es mayor que la influencia de la aceleración centrífuga y la fuerza de Coriolis. Con esto último, es posible concluir que la zona de estudio está dominada por los efectos de la marea, más que por los efectos de la curvatura y la fuerza de Coriolis.

¹Estudiante de Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil, Universidad Santa María - email: vittorio.bonani@sansano.usm.cl

²Profesora Asistente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental & Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: megan.williams@uc.cl

³Profesor Asociado, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María - email: raul.flores@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país litoral que cuenta con un extenso territorio oceánico y un clima mediterráneo. Debido a esto, presenta una gran cantidad de estuarios en desembocaduras de ríos, los cuales pueden ser estuarios de barra, que cuentan con conexión intermitente con el océano debido a cierres temporales de la desembocadura (e.g. McSweeney et al., 2017; Williams & Stacey, 2016). El régimen de mareas es uno de los factores principales en la evolución de los estuarios; la propagación de la marea en el interior condiciona la mezcla de las aguas existentes en el estuario, la circulación interna de las masas de agua y el intercambio con la zona costera (Morales & Borrego, 1999). Además, Schettini et al. (2017) menciona que el comportamiento del estuario puede cambiar debido a intervenciones en la cuenca y Clarke et al. (2017) considera que los cambios en el clima también pueden generar modificaciones.

Debido a esto, el estudio de la hidrodinámica de estuarios cobra cada vez mayor relevancia, siendo uno de los principales motivos comprender cómo funciona este sistema tan complejo (Bruner de Miranda et al., 2017). Sin embargo, en Chile, existe una capacidad limitada de observación y monitoreo continuo de su océano (Winckler et al., 2020), lo que hace imprescindible realizar estudios que aporten al entendimiento del comportamiento de los estuarios a partir de campañas de recolección de datos.

En el estudio de la hidrodinámica, destaca la variación de presión, es decir, de altura de agua en el estuario, así como la estratificación y transporte de sal a través de la interacción del sistema de agua dulce con el sistema de agua salada, esto debido a la intrusión del mar en la desembocadura del río (Behrens et al., 2015). La estratificación, junto con la curvatura, puede generar y afectar la circulación lateral dentro del estuario (Nidzieko et al., 2009); esto es crucial en nuestro caso de estudio, ya que el estuario del Río Maipo cuenta con la presencia de curvaturas en su desembocadura.

Para describir la hidrodinámica, es fundamental estudiar los movimientos de la marea en el estuario. Uno de los métodos utilizados es el balance de cantidad de movimiento, el cual es un principio aplicado de la segunda ley de Newton para analizar el movimiento de fluidos en diversos contextos. Su importancia en este estudio radica en su utilización para describir los efectos de las fuerzas externas, tales como la marea, la fricción del fondo, las fuerzas turbulentas, entre otros, en la circulación dentro de los estuarios (Geyer & MacCready, 2014). Para ello, se utilizarán las ecuaciones de cantidad de movimiento de Navier-Stokes.

Con el fin de identificar las fuerzas externas que influyen en la interacción del estuario con el mar, se cuantificarán los términos de las ecuaciones de Navier-Stokes a través de mediciones de datos como presión, temperatura, salinidad y velocidad. Para esto, se buscará simplificar la ecuación de cantidad de movimiento de Navier-Stokes a partir de las condiciones del estuario, como por ejemplo la presentada por Nidzieko et al. (2009) en la cual se presentan simplificaciones para cuantificar los efectos de la curvatura en esta. De esta cuantificación se espera conocer las variaciones que ocurren dentro del estuario y cómo se ven afectadas por la entrada o salida del mar, por variaciones del nivel del mar y por la mezcla de salinidad. Es por esto por lo que también se busca determinar los efectos que tendrá la curvatura en la circulación lateral (Nidzieko et al., 2009). Si bien, las ondas de infragravedad pueden generar oscilación de presión y velocidad (eg Williams & Stacey, 2016)

para efectos de esta investigación no se considerarán.

Esta investigación se enmarca en el proyecto FONDECYT N°11191077, con apoyo adicional del proyecto FONDECYT N°11190378.

2. METODOLOGÍA

2.1. ZONA DE ESTUDIO

El presente trabajo se desarrolla en el estuario del Río Maipo (Figura 1.a) ubicado en la V Región, entre las localidades de San Antonio y Santo Domingo, a aproximadamente 2 kilómetros al sur del Puerto de San Antonio. El Río Maipo, un río andino, drena una cuenca hidrográfica de aproximadamente 15.000 km^2 , que contiene Santiago, áreas agrícolas importantes y alta actividad industrial (Flores et al., 2022); su extensión desde la cordillera de los Andes hasta su desembocadura en el mar es de aproximadamente 250 km. Es un río pequeño de bajo caudal con un caudal medio anual de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en el periodo 2011-2020, en la estación Río Maipo en Cabimbao (BNA 54780001-7) (Jusari et al., 2023), que en los últimos años ha disminuido aproximadamente a $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Roco et al., 2024); esta disminución se debe principalmente a la intervención antropogénica a lo largo de la cuenca y la escasez de precipitaciones producto de la mega sequía en Chile (CR2, 2015; Garreaud et al., 2017). A su vez, según DGA (2004), la cuenca del Río Maipo se ha visto muy expuesta a intervenciones, tales como la captación de agua para diversos cultivos o con la finalidad de potabilizar, entre otras. Similar a otras regiones con clima mediterráneo, combinada con oleajes fuertes, las bajas descargas y las intervenciones mencionadas anteriormente, resultan en la formación de una larga barrera de arena en la boca del río (Roco et al., 2024). La disminución de caudal en el río, sumado a las marejadas, provocó el cierre total de la desembocadura en enero de 2023, un hecho que no se había registrado desde el inicio de los registros satelitales (año 1985), lo que provocó una apertura mediante maquinaria (ANID, 2024).

En la Figura 1.a se puede identificar que el estuario presenta curvatura en la desembocadura y la zona intermareal, donde se forma una especie de playa, que se inunda al subir la marea y queda libre cuando disminuye. Finalmente, cerca de la posición LR, se observa la presencia de un canal de origen natural dentro del humedal del estuario.

2.2. CAMPAÑA DE TERRENO

La campaña de terreno se llevó a cabo entre los días 17 y 22 de enero de 2022, con mediciones en la zona próxima a la desembocadura. Durante la campaña, se emplearon diversos instrumentos para medir velocidad de flujo, turbidez, conductividad, temperatura y niveles de agua en la sección transversal del río. En la Figura 1.a podemos ver las posiciones (LM, CN, CS, MFS, MFD y LR) donde se instalaron los diferentes instrumentos. Las velocidades de flujo se midieron en la planicie mareal utilizando dos ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) y los niveles de agua se registraron con dos OWHL (Open Wave Height Logger) desarrollados por Gajardo y Williams (2022). Finalmente,

para medir conductividad y temperatura, se empleó un Solinst-CTD.

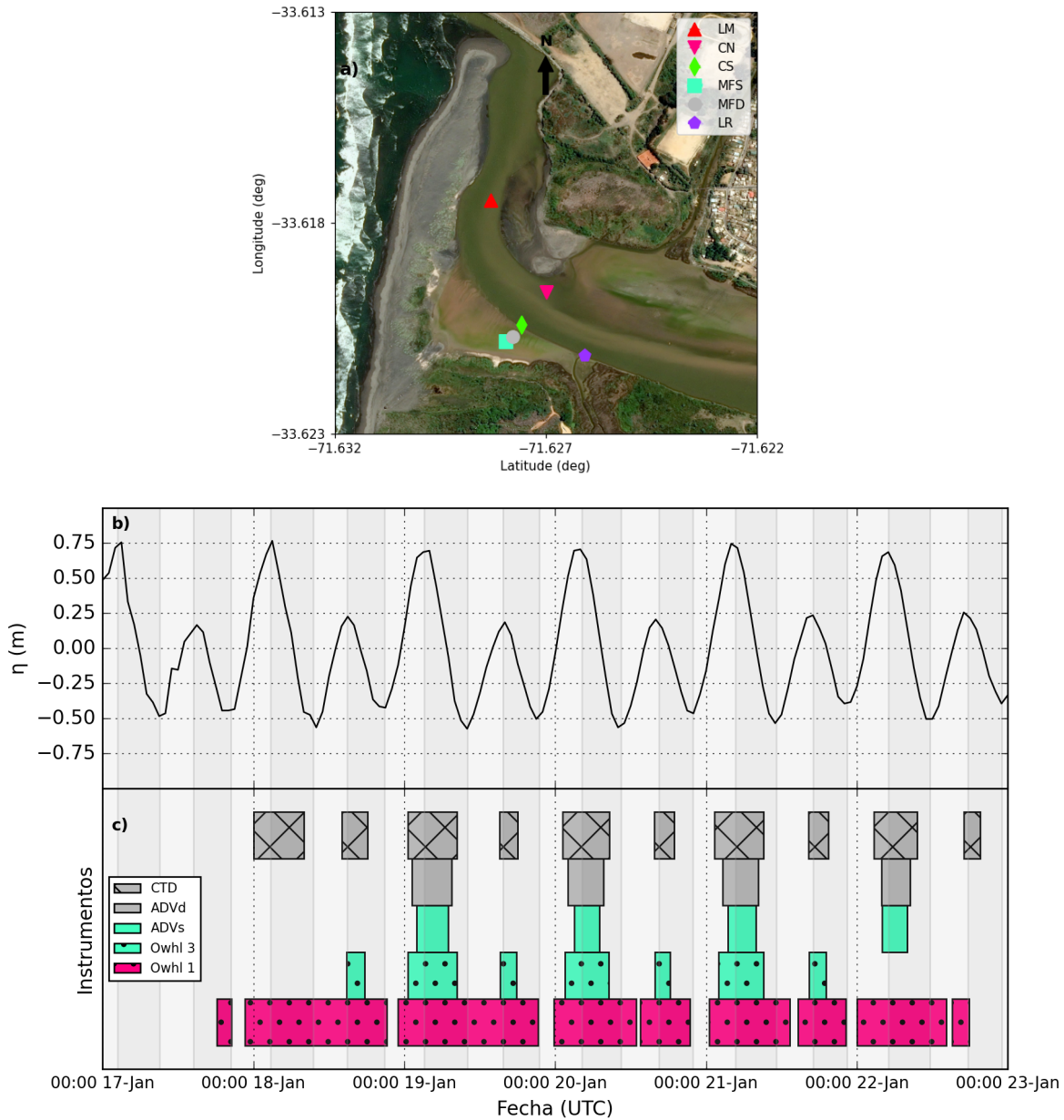


Figura 1: Área de estudio y observación de datos en campaña. (a) Zona de estudio con las posiciones de colocación de los sensores en terreno. LM: Lado Mar, CN: Curva Norte, CS: Curva Sur, MFS: Mudflat shallow, MFD: Mudflat deep y LR: Lado Río (b) Marea en el Puerto de San Antonio (SHOA). (c) Intervalos de tiempo de medición de los sensores utilizados. (b) y (c) Regiones en gris claro y gris oscuro son los periodos donde, respectivamente, sube la marea y baja la marea

2.3. PROCESAMIENTO DE DATOS

Al finalizar la campaña de medición de datos, se realizó un control de calidad de las mediciones, eliminando intervalos de tiempo en que los instrumentos estuvieron fuera del agua, lo cual se mues-

tra en la Figura 1.c. A los sensores ADV también se les realizó una limpieza de datos mediante un despiking 3d-KDE (three-dimensional kernel density estimation) con un reemplazo mediante interpolación lineal, presentado por Asgari et al. (2024). A partir de las mediciones del Solinst-CTD, se calculó la salinidad utilizando el Gibbs-SeaWater toolbox. (GSW, McDougall & Barker, 2011). Finalmente, se aplicó una media móvil de 10 minutos para eliminar ondas cuyo período de oscilación sea menor a 10 minutos, como las ondas de infragravedad, cuyo período oscila desde 30 segundos hasta 5 minutos (Munk, 1950).

2.4. ECUACIONES

2.4.1. ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO LATERAL

Con los datos procesados y promediados en profundidad según corresponda, a lo largo de la sección transversal de la curva del río, se debe utilizar la ecuación de cantidad de movimiento lateral. Para ello, se propone el uso de un sistema de coordenadas curvilíneo-polar, que según Nidzieko et al. (2009), al combinarse con el promedio en profundidad de la velocidad en la dirección del flujo, simplifica el análisis de la cantidad de movimiento lateral en la curva del estuario. Esta rotación de las ecuaciones de Navier-Stokes del sistema cartesiano a uno curvilíneo-polar introduce un término que representa la aceleración centrífuga inducida por la curvatura, como detalló Rouse y Appel (1959). Tras realizar la rotación al sistema de coordenadas curvilíneo-polar y considerar el promedio en profundidad de los términos, se obtiene la Ecuación (1) (Nidzieko et al., 2009). Esta expresión representa la forma promediada de Reynolds de la ecuación de cantidad de movimiento lateral, bajo las aproximaciones hidrostática y de Boussinesq, y desestima los términos del esfuerzo viscoso.

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} = \frac{u_s^2}{R_s} - u_s \frac{\partial u_n}{\partial s} - u_n \frac{\partial u_n}{\partial n} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial n} - f u_s - \frac{\partial \langle u'_n u'_z \rangle}{\partial z} \quad (1)$$

Donde $u_{i=s,n,z}$ es la velocidad en la dirección del flujo, lateral (normal al flujo) y vertical, con z positivo hacia la superficie. El término ρ_0 es la densidad de referencia del agua, equivalente a $1000 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$. Las fluctuaciones de los promedios en el tiempo se identifican con un \prime . El término R_s representa el radio de la curvatura en la dirección del flujo. El parámetro de Coriolis $f = 2 \Omega \sin(\varphi)$ se determina a partir de la velocidad de rotación de la Tierra (Ω), que equivale a $7,2921 \times 10^{-5} \text{ (}\frac{\text{rad}}{\text{s}}\text{)}$ y la latitud (φ) de los instrumentos, en este caso se considerará de $33,261^\circ S$. Por lo tanto, el parámetro de Coriolis f es $-8,075 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$.

El término del lado izquierdo de la Ecuación (1) representa la tasa de cambio de la velocidad lateral. Del lado derecho de la ecuación, el primer término representa la aceleración centrífuga, el segundo y tercer término representan la aceleración no local en dirección del flujo y normal, Nidzieko et al. (2009) omite los términos advectivos con la base de que $u_s \gg u_n, u_z$, en este caso se omite solamente el término correspondiente a u_z . El cuarto término corresponde al gradiente de presión lateral, el quinto término es la aceleración de Coriolis y, por último, el sexto término corresponde al esfuerzo cortante turbulento.

2.4.2. SISTEMA DE COORDENADAS

Dado que la Ecuación (1) utiliza un sistema de coordenadas curvilíneo-polar, en la zona de estudio, debemos evaluar si es posible adoptar este sistema con las posiciones de los instrumentos. Para ello, se traza una circunferencia utilizando Google Earth Pro, procurando que el arco pase por los puntos cercanos a CS y MFS, y LR. Así, la mejor aproximación de arco determinado se muestra en la 2, cuyo centro está representado por las siglas CC, tiene un radio de 435,4 (m) y ángulo del arco de 21,975°.

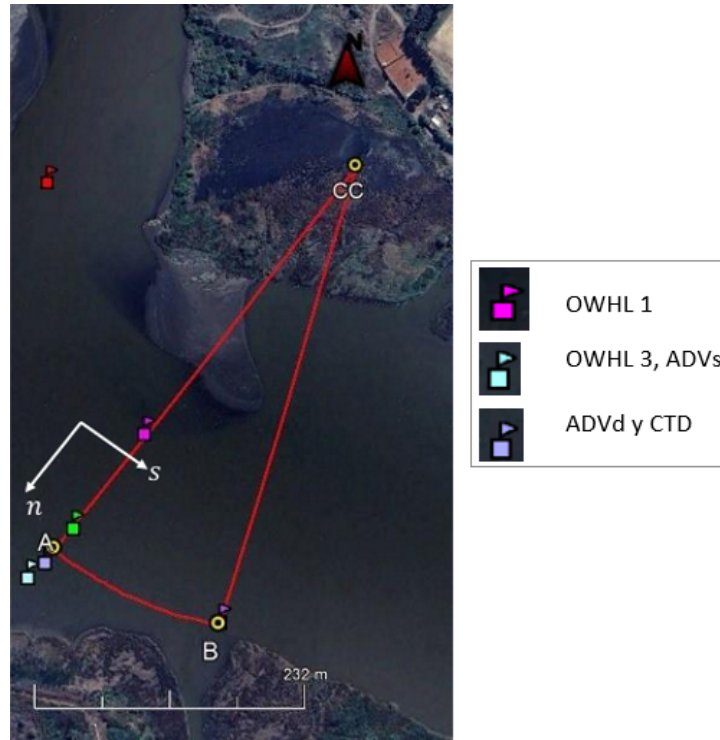


Figura 2: Eje de coordenadas. Posición de sensores a utilizar en análisis. OWHL 1 y 3, corresponden a Open Wave Height Logger que miden presión en sus respectivas posiciones. ADVs y ADVd, corresponden a Acoustic doppler velocity para medir velocidad. CTD corresponde a un Solinst-CTD, que mide conductividad, temperatura y profundidad. Imagen generada en Google Earth Pro, fecha de Imagen 01/05//2023.

2.5. ROTACIÓN DE VELOCIDADES

Los instrumentos ADV proporcionan los datos de velocidad en la dirección norte y este, por lo que, para conocer la velocidad en dirección normal y del flujo, es necesario realizar las rotaciones correspondientes. Para ello, es necesario conocer los ángulos de rotaciones. En la Figura 2, los puntos A y B representan los ejes del arco, cuya dirección respecto al norte es de 33,81° y 12,41°, respectivamente. Estos serán los ángulos a utilizar en las rotaciones, que se realizarán utilizando las Ecuaciones (2) y (3).

$$u_s = \cos(\theta) u_{este} - \sin(\theta) u_{norte} \quad (2)$$

$$u_n = -\sin(\theta) u_{este} - \cos(\theta) u_{norte} \quad (3)$$

3. RESULTADOS

3.1. MEDICIONES CAMPAÑA DE TERRENO

En la Figura 3, se presenta la marea en el puerto de San Antonio, así como la temperatura, salinidad, presión y velocidad medidas dentro del estuario. Las zonas sombreadas corresponden a los intervalos de tiempo en los que, de ser posible, se calcularán los términos de la Ecuación (1), correspondientes al día 19 de enero, desde las 02:00 hasta las 07:00 horas UTC, al día 20 de enero, desde las 03:00 hasta las 07:00 horas UTC, y al día 21 de enero, desde las 03:00 hasta las 08:00 horas UTC.

Al analizar el comportamiento de la salinidad y la temperatura (Figura 3.b y c), en pleamar, la salinidad alcanza valores entre 30 y 33,4 (PSU), lo que indica la presencia de agua de mar. Al bajar la marea, esta salinidad disminuye debido al retroceso del agua, favoreciendo una mayor mezcla entre el agua del río y la de mar. Esto también se refleja en la temperatura, que se mantiene constante hasta la salida de la marea, momento en el cual comienza a variar. En pleamares de menor amplitud, no se identifican valores constantes de salinidad y temperatura, ya que la marea no tiene suficiente fuerza para desplazar completamente el flujo del río, lo que favorece una mayor mezcla entre ambos cuerpos de agua.

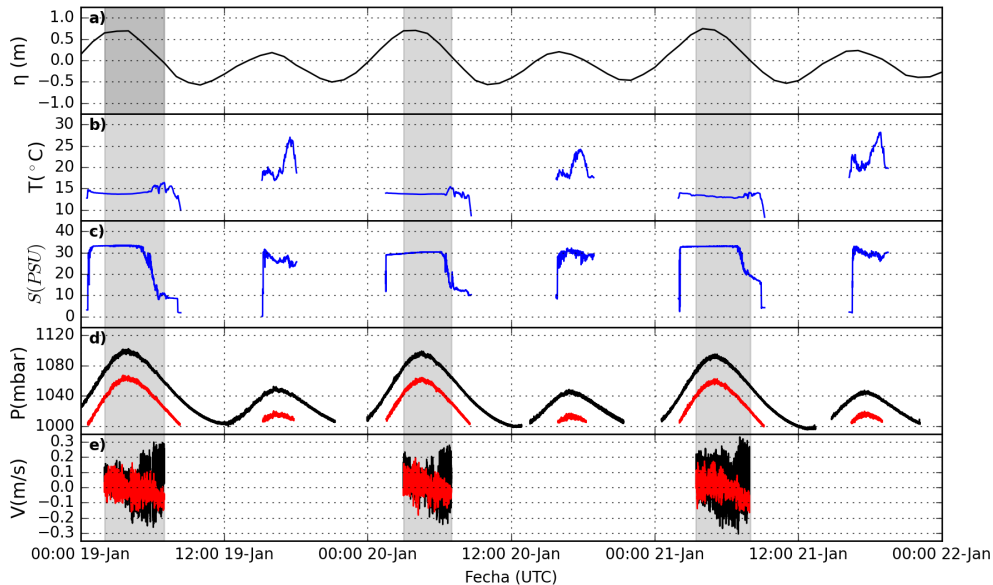


Figura 3: (a) Marea en el Puerto de San Antonio (SHOA). (b) Temperatura medida por el Solinst-CTD en la posición MFD. (c) Salinidad en PSU determinada a partir de conductividad medida por Solinst-CTD en MFD. (d) Presión en la posición CN y MFS, respectivamente, de color negro y rojo. (e) Velocidad en dirección normal y del flujo, respectivamente, de color rojo y negro, medida en la posición MFS, sin media móvil.

Al observar la marea tanto en el Puerto de San Antonio como dentro del estuario (Figura 4), se nota que la marea en el puerto tiene una máxima amplitud de 1,4 (m) y mínima de 0,7 (m) y dentro del estuario, la amplitud máxima es de 0,96 (m) y mínima de 0,4 (m), lo que indica una diferencia entre máximos y mínimos de 0,44(m) y 0,3(m), respectivamente. Además, se observa un desfase

de 43 a 58 minutos en pleamar, de 1:47 a 2:15 entre la primera bajamar y alrededor de 01:15 h entre las segundas bajamars. Estas diferencias se deben a la distancia entre el puerto y el estuario, a la ubicación relativa de los sensores, y a que, durante los períodos de bajamar, la menor energía del oleaje dificulta la entrada de la marea al estuario.

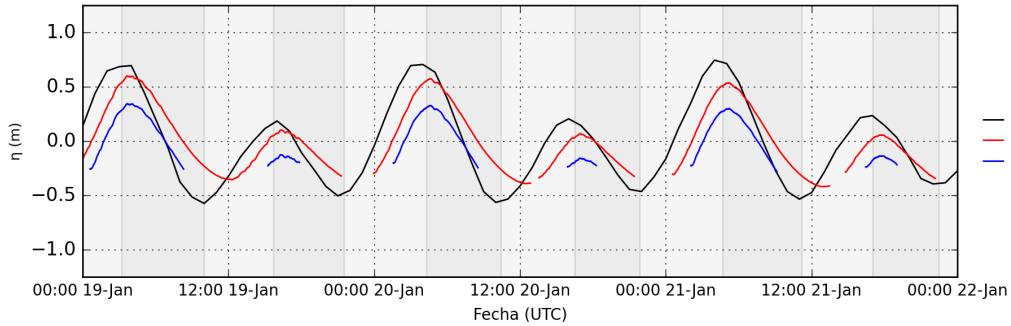


Figura 4: Marea en el Puerto San Antonio (PSA) y en las posiciones CN y MFS

3.2. VELOCIDADES

En las Figuras 5 y 6 se presentan, respectivamente, las velocidades en dirección norte y este, y las velocidades en la dirección normal y la dirección del flujo, en ambos casos para las posiciones MFS y MFD. Al comparar ambas figuras, destacamos que, debido a que la rotación de las velocidades está basada en la geometría del sector, se obtiene que $u_{norte} \approx -u_n$ y $u_{este} \approx u_s$. En las tres

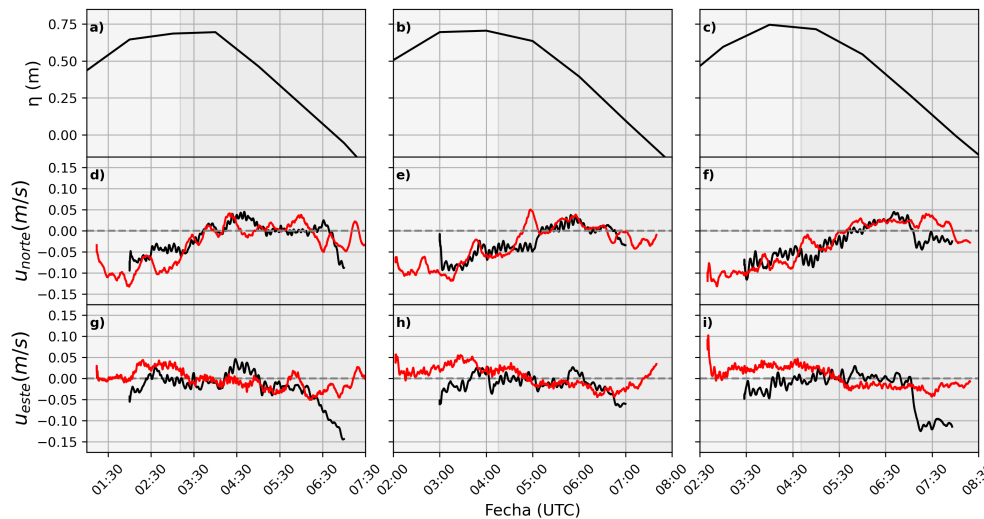


Figura 5: (a, b y c) Marea en el puerto de San Antonio (SHOA). (d, e y f) Velocidad en dirección norte. (g, h y l) Velocidad en dirección este. (b) y (c) En negro los valores correspondientes a la posición MFS y rojo para MFD. (a, d y g) Corresponden al 19 de enero. (b, e y h) al 20 de enero. (c, f y l) al 21 de enero. Velocidades con media móvil de 10 minutos.

columnas de gráficos de la Figura 6 se observa que, al subir la marea, el flujo entra, y al bajar, sale. Se presenta un desfase entre el instante en que comienza a bajar la marea y cuando el flujo comienza a salir del estuario, lo cual está asociado al desfase causado por la distancia de los sensores al Puerto.

Al observar las velocidades normales, en MFD se aprecian oscilaciones con períodos aproximados de 45 minutos, las cuales no son tan evidentes en la velocidad en dirección del flujo. Asimismo, en la posición MFS se observan períodos de oscilación mayores a 1 hora en la velocidad normal, pero al igual que en MFD, no son visibles en la velocidad en dirección del flujo. Finalmente, al comparar las direcciones en ambos sensores, se observa consistencia en la entrada y salida de la marea. Sin embargo, en algunos períodos intermedios, estos cambios no coinciden.

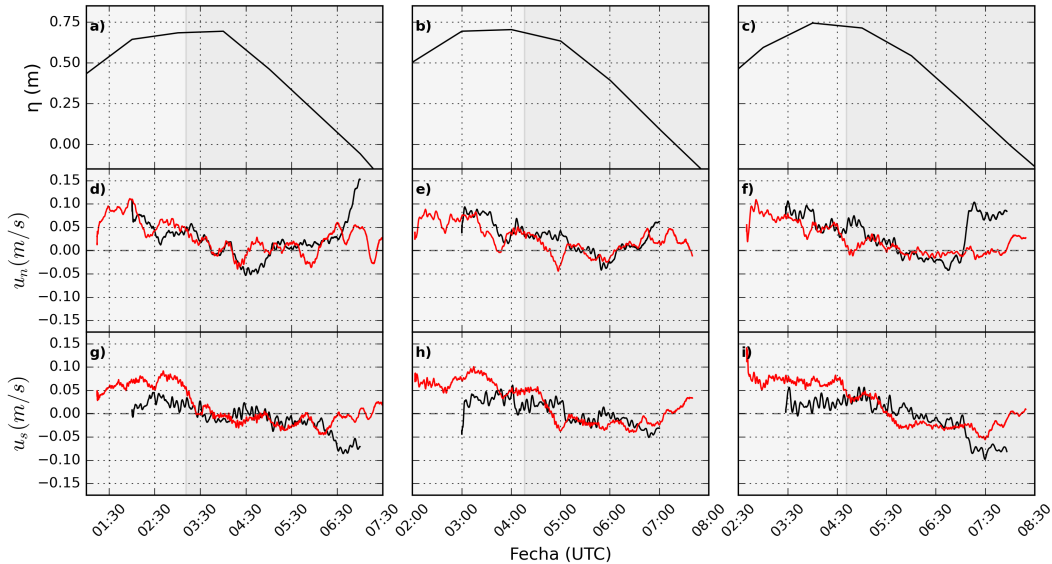


Figura 6: (a,b y c) Marea en el puerto de San Antonio (SHOA). (d, e y f) Velocidad normal al flujo en Posición MFS y MFD. (g, h y i) Velocidad en dirección del flujo. (b) y (c) En negro los valores correspondientes a la posición MFS y rojo para MFD. (a, d y g) Corresponden al 19 de enero. (b, e y h) al 20 de enero. (c, f y i) al 21 de enero. Velocidades con media móvil de 10 minutos.

3.3. TÉRMINOS ECUACIÓN

En la Figura 7, se muestran los términos calculados de la Ecuación 1. A partir de la velocidad en la dirección normal, se determina la aceleración local con un intervalo temporal de 10 minutos (Figura 7.c). Para los términos de aceleración centrífuga y fuerza de Coriolis, se utiliza la velocidad en la dirección del flujo, mostrados respectivamente en las Figuras 7.e y 7.f. En el caso de los componentes advectivos, dado que no se dispone de velocidades en dos puntos a lo largo del flujo, solo es posible determinar el componente advectivo en la dirección normal (Figura 7.d). Para ello, se consideran las posiciones MFD y MFS, cuya distancia es de aproximadamente 18 metros, considerando como punto fijo MFS. Finalmente, en la Figura 7.b se muestra el gradiente de presión entre CN y MFS. Al observar los gradientes de presión, se nota que presentan valores similares en los 3 días. Si bien se evidencia ruido en las mediciones, se observa una oscilación cuya amplitud máxima coincide con la marea alta, con un desfase entre los tres días asociado al ciclo de la marea. Se observa que la aceleración local presenta gran variabilidad, con oscilaciones relativamente constantes, salvo algunos máximos más pronunciados en el día 19 a las 06:50, el 20 a las 04:15 y el 21 a las 07:10. El componente advectivo muestra mayor variación al inicio y al término de las mediciones, asociado a la entrada y salida de la marea. Sin embargo, en intervalos intermedios,

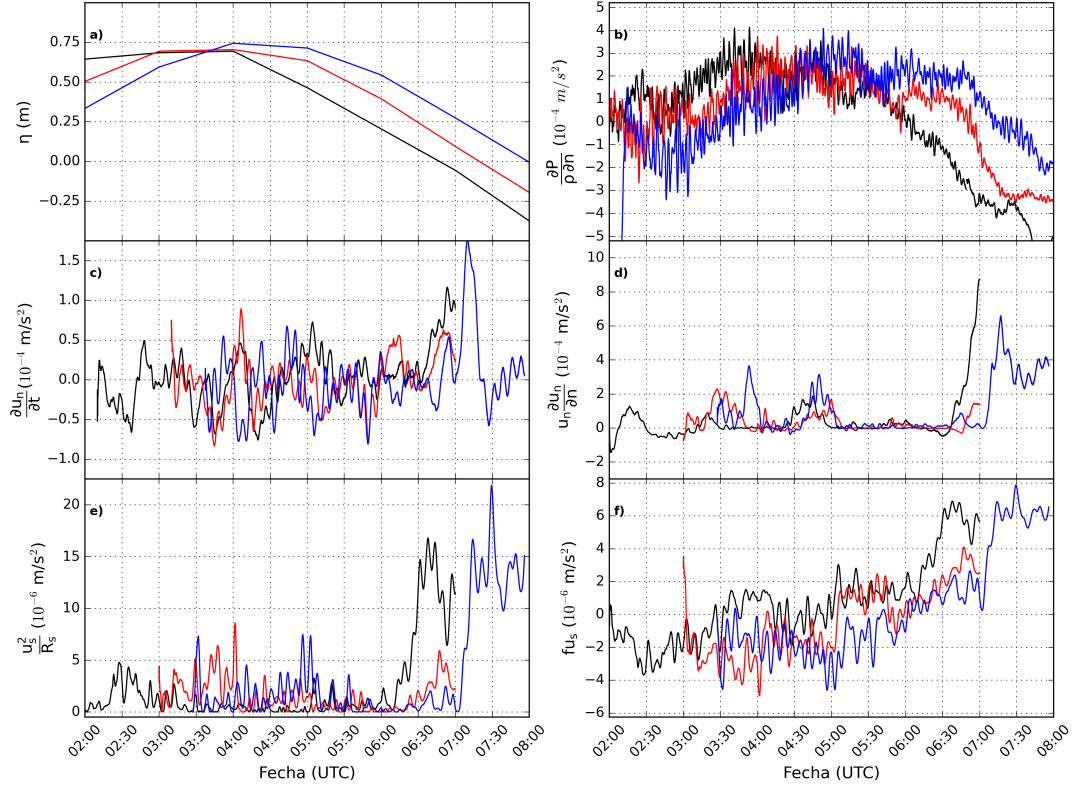


Figura 7: (a) Marea en el Puerto de San Antonio. (b) Gradiente de Presión desde CN hacia MFS. (c) Aceleración local. (d) Aceleración advectiva. (e) Aceleración centrífuga. (f) Fuerza de Coriolis. En (b), (c), (d), (e) y (f), el color negro, rojo y azul, respectivamente, representan los días 19, 20 y 21 de enero.

desde las 05:00 hasta las 06:30, oscila cerca de 0, lo que indica baja variabilidad entre las velocidades en las posiciones consideradas. La aceleración centrífuga presenta oscilaciones más suaves durante la entrada de la marea y, finalmente, muestra máximos de mayor magnitud asociados a la salida de la marea. Finalmente, la fuerza de Coriolis muestra un aumento progresivo en su valor, siendo negativa cuando entra la marea y positiva cuando la marea baja, coincidiendo con el cambio de sentido del flujo.

Comparando los resultados de los términos, identificamos que el gradiente de presión oscila entre -5 y 4×10^{-4} , la aceleración local entre -1 y $1,5 \times 10^{-4}$, la aceleración advectiva oscila mayormente entre 0 y 2, llegando a máximos de 8×10^{-4} , la aceleración centrífuga oscila entre 0 a 5, con máximos de 20×10^{-6} y por último, la fuerza de Coriolis oscila entre -4 y 6×10^{-6} , con lo que la relevancia del gradiente de presión, junto con la aceleración local y advectiva, es mayor que la relevancia de la fuerza de Coriolis y aceleración centrífuga.

3.4. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, el comportamiento dentro del estuario está fuertemente influenciado por el ciclo de la marea, tanto en cambios de dirección y magnitudes de velocidad

como en las variaciones de las alturas dentro del estuario. También es evidente en las salinidades obtenidas. Según Inostroza (1972), durante períodos de verano, la salinidad de la costa chilena oscila entre los 33,9 a 35,2 (PSU). En nuestro caso, los valores obtenidos son cercanos a los 33 (PSU), lo que indica que la marea ingresa fuertemente a la zona intermareal. Nidzieko et al. (2009) sugiere que la circulación lateral puede ser inducida por la curvatura, los gradientes de presión y densidad, fuerza de Coriolis, entre otros factores. A partir de los resultados del balance de cantidad de movimiento lateral, se puede identificar que el gradiente de presión, la aceleración local y la aceleración advectiva presentan un orden de magnitud de 10^{-4} , mientras que la aceleración centrífuga y la fuerza de Coriolis tienen un orden de magnitud de 10^{-6} . Esta diferencia en los órdenes de magnitud nos indica que, en términos de los mecanismos generadores de circulación lateral, la influencia de la curvatura (a través de la aceleración centrífuga) y el efecto de Coriolis son bajos en comparación con los efectos de la marea, la cual se refleja en la variabilidad de las velocidades y los ciclos de las presiones.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se cuantifica la cantidad de movimiento lateral en un estuario pequeño, aplicado a mediciones en la zona intermareal del estuario del Río Maipo, específicamente en el eje transversal de su curvatura. A partir de este análisis, se concluye que la circulación lateral está fuertemente influenciada por la marea, siendo sus mecanismos principales el gradiente de presión, la aceleración local y la aceleración advectiva. Si bien este estudio ofrece una primera aproximación de las condiciones dominantes en la circulación lateral bajo condiciones predeterminadas en enero de 2022, como se observó en 2023, cuando la desembocadura presentó una apertura mecánica (ANID, 2024), debido a los efectos del cambio climático, que producen marejadas anómalas cada vez más frecuentes (Aguirre & Barraza, 2023), períodos de escasas lluvias y otros factores antropogénicos, será cada vez más importante realizar un monitoreo continuo de los estuarios. Por lo tanto, sería interesante replicar este estudio para tener un mayor control y certidumbre sobre el comportamiento dentro del estuario, de cara a futuras investigaciones y proyectos relacionados con el Río Maipo, dados los posibles cambios en las condiciones en la zona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen financiamiento provisto por ANID (Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo) mediante los Proyectos FONDECYT N°11191077 y N°11190378. Los autores agradecen financiamiento provisto por fondos internos del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María y al SHOA por proporcionar datos de marea en el Puerto de San Antonio.

REFERENCIAS

- Aguirre, C., & Barraza, J. (2023). Análisis (CR)² — Marejadas “anormales”, cada vez más frecuentes [Publicado el 24 de enero de 2023].
- ANID. (2024). Investigan posibles causas tras cierre de desembocadura del río Maipo. Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación [Publicado el 18 de junio de 2024].
- Asgari, F., Mohajeri, S. H., & Mehraein, M. (2024). ProADV: A toolkit for enhancing water dynamics research using acoustic doppler velocimeter devices. *SoftwareX*, 27, 101868. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101868>
- Behrens, D. K., Bombardelli, F. A., & Largier, J. L. (2015). Landward propagation of saline waters following closure of a bar-built estuary: Russian River (California, USA). *Estuaries and Coasts*, 39(3), 621-638.
- Bruner de Miranda, L., et al. (2017). Capítulo 3: Estuary Classification. En *Fundamentals of Estuarine Physical Oceanography* (pp. 73-117, Vol. 8). Ocean Engineering & Oceanography.
- Clarke, D. W., Boyle, J. F., & Plater, A. J. (2017). Particle-size evidence of barrier estuary regime as a new proxy for ENSO climate variability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(10), 1520-1534.
- CR2. (2015). Report to the Nation: The 2010-15 Mega-Drought [Technical report from the Center for Climate and Resilience Research, Santiago-Chile, 28 pp.].
- Flores, R. P., Williams, M. E., & Horner-Devine, A. R. (2022). River plume modulation by infragravity wave forcing. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097467. <https://doi.org/10.1029/2021GL097467>
- Gajardo, S., & Williams, M. (2022). *Construcción y uso de instrumentos para mediciones costeras* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6307-6327.
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 175-197. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302>
- Inostroza, H. (1972). *Atlas oceanográfico de Chile* [Pub.3041, 171 pp.]. Instituto Hidrográfico de la Armada.
- Jusari, N., Suárez, L., Flores, R., Williams, M., Escauriaza, C., Cortés, J., & Guerra, M. (2023). Estimación del flujo de sedimentos en suspensión en el estuario del río Maipo mediante métodos acústicos y ópticos. *XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, 1-12.
- McDougall, T. J., & Barker, P. M. (2011). *Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox* (inf. téc.) (28 pp., ISBN 978-0-646-55621-5). SCOR/IAPSO WG127.
- McSweeney, S. L., Kennedy, D. M., & Rutherford, I. D. (2017). A geomorphic classification of intermittently open/closed estuaries (IOCE) derived from estuaries in Victoria, Australia. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41, 421-449.
- Morales, J. A., & Borrego, J. (1999). Propagación de la onda marea en el Estuario del Río Tinto (Huelva, España). *Geogaceta*, 27, 115-118.
- Munk, W. H. (1950). Origin and generation of waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.9753/icce.v1.1>
- Nidzicko, N. J., Hench, J. L., & Monismith, S. G. (2009). Lateral Circulation in Well-Mixed and Stratified Estuarine Flows with Curvature. *Journal of Physical Oceanography*, 39(4), 831-851.
- Roco, A., Flores, R. P., Williams, M. E., & Saldías, G. S. (2024). Observations of river-wave interactions at a small-scale river mouth. *Coastal Engineering*, 189, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104456>
- Rouse, H., & Appel, D. W. (1959). *Advanced Mechanics of Fluids*. Wiley.
- Schettini, C. A., Valle-Levinson, A., & Truccolo, E. C. (2017). Circulation and transport in short, low-inflow estuaries under anthropogenic stresses. *Regional Studies in Marine Science*, 10, 52-64.
- Williams, M. E., & Stacey, M. T. (2016). Tidally discontinuous ocean forcing in bar-built estuaries: The interaction of tides, infragravity motions, and frictional control. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 571-585.
- Winckler, P., Aguirre, C., Farias, L., Contreras, M., & Italo, M. (2020). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the Chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163(1-2), 1-20.