

Research Article

Caracterización hidrográfica del estuario del río Valdivia, centro-sur de Chile

José Garcés-Vargas¹, Marcela Ruiz^{1,2}, Luis Miguel Pardo¹
Sergio Nuñez³ & Iván Pérez-Santos^{4,5}

¹Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Laboratorio Costero Calfuco
Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, P.O. Box 5090000, Valdivia, Chile

²Servicio Nacional de Pesca, P.O. Box 5110562, Valdivia, Chile

³Instituto de Investigación Pesquera, P.O. Box 4270789, Talcahuano, Chile

⁴Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Campus Concepción
Víctor Lamas 1290, P.O. Box 160-C, Concepción, Chile

⁵Centro COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción, Campus Concepción
Víctor Lamas 1290, P.O. Box 160-C, Concepción, Chile

RESUMEN. La costa sureste del Océano Pacífico entre 37° y 41°S, se caracteriza por la presencia de un gran número de estuarios micromareales (rango mareal menor a 2 m). Uno de los estuarios más importantes dentro de estas latitudes es el estuario del río Valdivia, cuya estructura y dinámica termal y halina es poco conocida. Mediante mediciones hidrográficas de temperatura y salinidad tomadas durante un ciclo estacional anual y el análisis de sus principales forzantes (marea, caudal del río, vientos y radiación solar) se explica la variabilidad así como sus cambios en la estratificación vertical. El análisis de la estructura termohalina de la columna de agua reveló que el estuario varió estacionalmente comportándose como un estuario de cuña salina en invierno y primavera producto del mayor caudal de los ríos afluentes, mientras que en verano y otoño se comportó como parcialmente mezclado, producto del menor caudal de los ríos. En invierno y primavera la columna de agua presentó inversión térmica, la cual fue asociada a pérdida de calor superficial y a la advección sub-superficial de aguas cálidas desde el océano adyacente hacia el interior del estuario que no se mezclaron con las de la superficie debido a la intensa estratificación salina. El cambio en el régimen estuarino de cuña salina a parcialmente mezclado según la estación del año y presencia de la inversión térmica estacional, son características hidrográficas necesarias tanto para la implementación de esfuerzos de conservación de hábitat vulnerables presentes en la zona (áreas de crianza de juveniles de especies explotadas), como para la utilización de este sistema para actividades de acuicultura y manejo de recursos marinos.

Palabras clave: hidrografía, boyantes, mezcla, inversión térmica, río Valdivia, Chile.

Hydrographic features of Valdivia river estuary south-central Chile

ABSTRACT. The area between 37° and 41°S of the southeastern Pacific coast, have a great number of microtidal (tidal range less than 2 m) estuaries. One of the most important estuaries in these latitudes is the Valdivia River estuary, whose thermal and haline structure is poorly known. Thus, this work, through hydrographic measurements of temperature and salinity taken during an annual seasonal cycle and the analysis of the main forcings (tide, river flow, wind and solar radiation) explain the variability and its changes in vertical stratification. The analysis of the the thermohaline structure of the water column revealed that the estuary varied seasonally behaving like a salt-wedge estuary in winter and spring due to a higher flow of tributaries. However, in summer and autumn behaved as partially mixed due the lower river flow. In winter and spring the water column showed a temperature inversion which was associated with a large surface heat loss and subsurface advection of warm waters from the adjacent ocean to into the estuary that is not mixed with the surface due to intense stratification by salinity. The change in the estuarine salt-wedge regime to partially mixed according to the season and the presence of thermal inversion seasonal are necessary hydrographic features to implement conservation efforts of vulnerable habitat into the zone (nursery areas of juvenile species), and use of this system for aquaculture activities and marine resources management.

Keywords: hydrography, buoyancy, mixing, thermal inversion, Valdivia river, Chile.

Corresponding author: José Garcés-Vargas (jgarces@docentes.uach.cl)

INTRODUCCIÓN

La circulación estuarina es compleja, caracterizada por corrientes mareales intensas, batimetría heterogénea, gran turbulencia energética y gradientes de densidad abruptos debido a la confluencia del océano y el agua proveniente de ríos (MacCready & Geyer, 2010). El viento modifica la circulación en zonas someras a través de los procesos de mezcla y puede llegar a ser, en ocasiones, la fuerza dominante de la circulación media sobre periodos extensos de tiempo (Tomczak, 1998).

Basados en la estratificación de la columna de agua, los principales factores que afectan a los estuarios son la descarga de río, mezcla y corrientes mareales, existiendo una competencia entre el forzamiento mareal y la boyantes (Valle-Levinson, 2010). La variabilidad de estos factores permite distinguir tres tipos de estuarios relativamente someros: cuña salina, parcialmente mezclado y bien mezclado. Los estuarios de cuña salina se caracterizan por una alta descarga del río, escasa mezcla mareal, débiles corrientes mareales debido a su naturaleza micromareal (rango mareal < 2 m). En estas condiciones, una fuerte haloclina separa las capas superiores e inferiores, cada una de las cuales tiene una composición homogénea, aunque la capa superior no necesariamente se encuentra sin salinidad (Kurup *et al.*, 1998). Por el contrario, en estuarios bien mezclados la descarga del río es baja, la mezcla mareal es máxima, las corrientes mareales son intensas debido a su naturaleza macromareal (rango mareal > 4 m). Bajo estas condiciones, la haloclina es muy débil o inexistente. Las condiciones intermedias se dan en estuarios parcialmente mezclados.

La clasificación de un estuario basado en la estratificación vertical no es permanente, ya que la relación entre la descarga del río y el volumen mareal puede cambiar en el tiempo como resultado de las variaciones en las precipitaciones sobre la cuenca hidrográfica de los ríos. El cambio depende en cierta medida del tamaño de la zona de captación de la cuenca y su capacidad de igualar las diferencias en la precipitación antes que lleguen al estuario. Las variaciones en la intensidad de las corrientes las variaciones en las precipitaciones sobre la cuenca hidrográfica de los ríos. El cambio depende en cierta medida del tamaño de la zona de captación de la

cuenca y su capacidad de igualar las diferencias en la precipitación antes que lleguen al estuario. Las variaciones en la intensidad de las corrientes mareales entre las mareas de sicigia y cuadratura también pueden causar un cambio de clasificación como sucede por ejemplo en el estuario del río Hudson en el este de Estados Unidos (Valle-Levinson, 2010). Por lo tanto, se considera que la descripción de un estuario requiere de un análisis integral tanto a escala espacial como temporal de los procesos estuarinos dominados por la salinidad, circulación por mareas y forzantes climáticos.

Si bien ningún estuario es igual a otro, la definición de patrones generales de su dinámica es útil para comprender las diferencias y similitudes entre los cientos de estuarios, identificar y priorizar esfuerzos de conservación de los servicios ecosistémicos, manejo de recursos y guía para futuras investigaciones (Engle *et al.*, 2007). Además, la estratificación estuarina es importante porque inhibe la mezcla vertical, que afecta la dinámica de la columna de agua y podría conducir a la hipoxia en las aguas debajo de la pycnoclina (Geyer, 2010).

Si bien, a nivel mundial los estuarios relativamente someros son de gran importancia económica y biológica, en Chile se les ha dado escaso interés y el conocimiento de su geografía y dinámica es escaso (Valdovinos, 2004). La costa sureste del océano Pacífico entre 37° y 41° S, se caracteriza por la presencia de un gran número de estuarios micromareales (Pino *et al.*, 1994). Uno de los estuarios más importantes por la gran descarga de su río entre estas latitudes es el estuario del río Valdivia.

Considerando que el estuario del río Valdivia es considerado uno de los más importantes de Chile e incluso de Sudamérica (Perillo *et al.*, 1999) y cumple roles ecosistémicos relevantes para especies comerciales (Vargas *et al.*, 2003; Pardo *et al.*, 2011, 2012a, 2012b). Este estudio dilucida la hidrografía del estuario, necesaria para la implementación de esfuerzos de conservación de hábitat vulnerables presentes en la zona (áreas de crianza de juveniles de especies explotadas) y la utilización de este sistema para actividades de acuicultura y manejo de recursos marinos. Para ello se realiza una descripción y análisis estacional de la temperatura y salinidad, y su relación con las principales forzantes (mareas, caudal del río, vientos y radiación solar), para establecer sus variaciones en la estratificación vertical.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área

El área de estudio se ubica cerca de Valdivia (39°49'22"S, 73°15'0,0"W), en el centro-sur de Chile. La zona está compuesta por la ensenada de San Juan, bahía de Corral y los ríos Valdivia, Tornagaleones, Cutipay, Cruces y Calle-Calle (Fig. 1). Los ríos Calle-Calle y Cruces dan origen al río Valdivia que junto con el río Tornagaleones fluyen hacia la bahía de Corral para desembocar finalmente en el océano Pacífico.

La superficie total de la cuenca del río Valdivia se estima en 11.280 km² (Muñoz, 2003). La profundidad del estuario en su eje central varía entre 7 y 22 m aproximadamente, siendo más profundo en su desembocadura. El ancho medio del canal principal del estuario del río Valdivia es de aproximadamente 700 m y la boca (bahía de Corral) tiene un ancho aproximado de 5 km. El régimen mareal de esta bahía presenta un comportamiento semi-diurno, con un rango promedio de 0,8 m, variando entre 1,48 y 0,53 m (Pino *et al.*, 1994), siendo por lo tanto micromareal.

La información del caudal proveniente del río Calle-Calle, permitió determinar que tiene un régimen pluvial estacional con un promedio anual de descarga de agua dulce de 592 m³ s⁻¹ siendo máximo en invierno (aproximadamente 1293 m³ s⁻¹ en julio) y mínimo en verano (aproximadamente 189 m³ s⁻¹ en marzo) (Fig. 2). Este régimen pluvial es representativo de la cuenca y por tanto se espera que la suma de los afluentes incremente el caudal que llega a la bahía de Corral.

Datos hidrográficos

En el presente estudio se analizaron las campañas de muestreos hidrográficos realizados por el Instituto de Investigación Pesquera de Chile (INPESCA) entre los años 2000 y 2001. Estas campañas se efectuaron durante primavera (septiembre 2000), verano (enero 2001), otoño (abril 2001) e invierno (junio 2001). En todas las estaciones los muestreos hidrográficos fueron realizados durante la marea llenante y vaciante, coincidiendo con la fase de sicigia.

En cada una de las estaciones hidrográficas se obtuvo registros verticales con intervalos de 0,5 a 1,0 m de temperatura y salinidad, abarcando desde la superficie hasta una profundidad de aproximadamente 0,5 m sobre el fondo. Los perfiles verticales fueron realizados por medio de una sonda oceanográfica CTD-Memory Probe. Para el análisis sólo se tomaron en consideración las estaciones hidrográficas que pasaron por el eje central del canal y que presentaron

mayor repetibilidad durante el periodo de muestreo (Fig. 1, Tabla 1). Estas estaciones correspondieron aproximadamente a los primeros 10 km desde la boca del estuario hacia el interior.

Para estudiar la variabilidad estacional de temperatura y salinidad en la columna de agua y cuantificar el grado de mezcla vertical se promediaron los perfiles verticales obtenidos durante la marea llenante y vaciante de cada muestreo. Para determinar la estratificación también se calculó el parámetro de mezcla (n_s) (Haralambidou *et al.*, 2010) en cada una de las estaciones para las diferentes estaciones del año. n_s se define como:

$$n_s = \frac{\partial S}{S_m} \quad (1)$$

donde $\partial S = S_{fond} - S_{sup}$, $S_m = 0,5(S_{fond} + S_{sup})$, siendo S_{fond} y S_{sup} la salinidad del fondo y de la superficie de la columna de agua, respectivamente. Si $n_s < 0,1$ la columna de agua es bien mezclada, cuando $0,1 < n_s < 1,0$ es parcialmente mezclada y finalmente si $n_s > 1,0$ se evidencia una cuña de agua salina.

Con la información de temperatura y salinidad, se calculó la frecuencia Brunt-Väisälä o frecuencia de boyantes (unidades en ciclos h⁻¹). Este parámetro fue usado para determinar la estratificación de la columna de agua, de acuerdo a Stewart (2008):

$$N^2 = -gE \quad (2)$$

en donde N es la frecuencia de boyantes, g es la gravedad y E es la estabilidad de la columna de agua, que se calculó según la expresión:

$$E = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta z} \quad (3)$$

donde, ρ es la densidad del agua (1,025 kg m⁻³) y z la profundidad.

Cuando N^2 es positivo, la columna de agua es estable. Así también cuando los valores son altos (bajos) la columna de agua es muy (poco) estratificada. Por el contrario, cuando los valores son negativos la columna es inestable.

Caudal del río

Se utilizaron promedios diarios del caudal del río derivado de observaciones horarias de la estación río Calle Calle-Balsa San Javier (39°46'00"S, 72°58'00"W) y río Calle-Calle en Pupunahue (39°48'00"S, 72°54'00"W) proporcionadas por la Dirección General de Aguas (DGA).

Ambas estaciones se encuentran ubicadas a ~40 km hacia el este de la boca del estuario del río Valdivia, con una distancia entre ellas de 6,8 km. Se utilizó la información de la estación río Calle-Calle

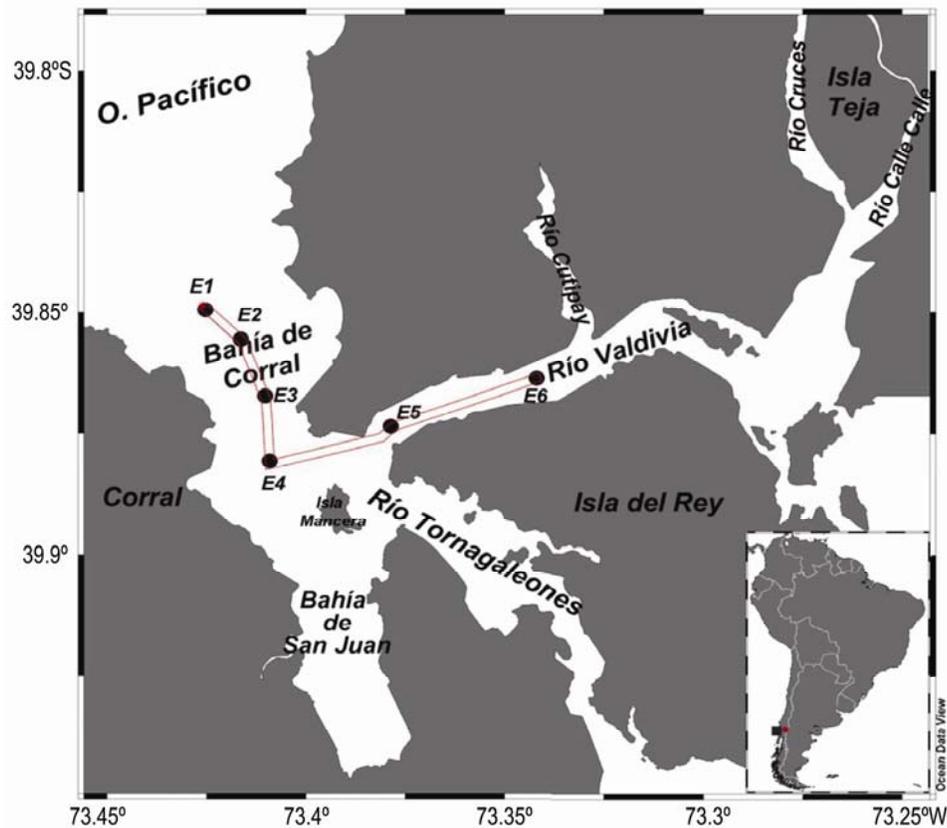


Figura 1. Estuario del río Valdivia. En rojo se indica la transecta a lo largo de la bahía de Corral y río Valdivia. Los círculos negros indican las estaciones hidrográficas. En el interior del mapa de Sudamérica se muestra la ubicación del área de estudio (cuadrado negro) y de la estación hidrológica río Calle-Calle (punto rojo).

Tabla 1. Detalle de los periodos y estaciones hidrográficas.

Estación	Fecha de muestreo		Número de estaciones	
	Llenante	Vaciantes	Llenante	Vaciantes
Primavera	23-09-2000	23-09-2000	4	4
Verano	13-01-2001	12-01-2001	5	5
Otoño	09-04-2001	08-04-2001	5	5
Invierno	28-06-2001	29-06-2001	6	4

Balsa San Javier entre el 1 de enero 2000 y 30 de mayo 2008 (tiempo en que dejó de operar) y de la estación río Calle-Calle en Pupunahue desde el 8 de marzo 2007 (tiempo en que comenzó a funcionar) hasta el 31 de diciembre 2008. La correlación entre ambas estaciones en el periodo de superposición fue de 0,99 ($P < 0,05$). La información presentada en la Figura 2 corresponde a la estación río Calle-Calle en Pupunahue derivada de un retro-análisis (hindcast), obtenida mediante regresión lineal entre las dos estaciones mencionadas, donde se estableció un

promedio mensual a largo plazo con sus respectivas desviaciones estándar entre los años 2000 y 2008.

Campos de variables

La información corresponde a campos diarios de temperatura superficial del mar (TSM), esfuerzo de los vientos superficiales y la radiación de onda corta en el área comprendida entre 38°30'S-41°00'S y 75°00'W-73°00'W. Se promediaron los tres días previos y el día en que se realizaron los muestreos

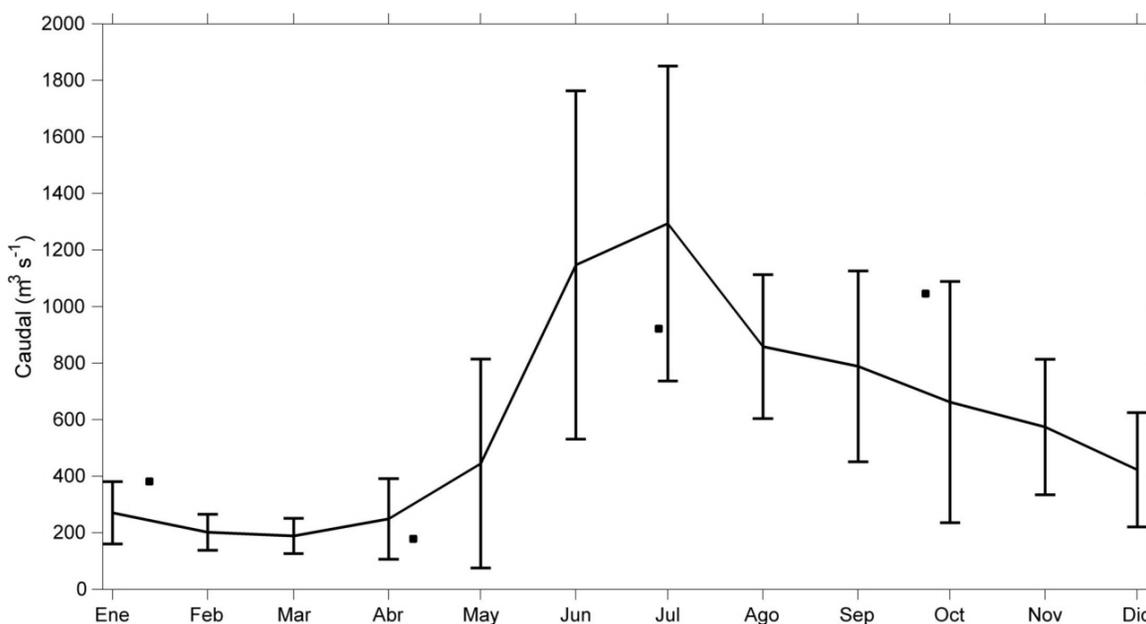


Figura 2. Promedio mensual a largo plazo (2000-2008) de los caudales (curva negra) y sus desviaciones estándar (barras negras) en la estación hidrológica río Calle-Calle en Pupunahue (39°48'S, 72°54'W). Los cuadrados negros corresponden al caudal durante los días en que se realizaron los muestreos hidrográficos.

hidrográficos. Se determinó este promedio debido a que existe un tiempo de respuesta del océano a las variaciones del viento, implícitas en la interacción océano-atmósfera. De esta manera, al promediar sobre algunos días se suaviza este efecto.

Temperatura superficial del mar (TSM)

La TSM correspondió a información combinada (*i.e.*, satelital e *in situ*), procesada mediante interpolación óptima (IO) con una resolución espacial de 0,25° x 0,25° obtenida de la NOAA/NESDIS/National Climatic Data Center. Esta información se deriva de datos del sensor "Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)" e información *in situ* procedente de barcos y boyas con las cuales corrige sus sesgos. Este producto muestra los mejores resultados en su resolución espacial y temporal que anteriores productos semanales que usaron IO (Reynolds *et al.*, 2007).

Esfuerzo del viento y transporte de Ekman superficial

Los vientos superficiales corresponden al producto desarrollado por IFREMER, obtenido del escatrorómetro SeaWind a bordo del satélite QuickSCAT. Este producto tiene una resolución temporal diaria y espacial de 0,5°x0,5° y está disponible en <http://www.ifremer.fr>. El error cuadrático medio de la

velocidad del viento es menor a 1,9 m s⁻¹ y el de dirección es 17° (Piolle & Bentamy, 2002). Se usaron las componentes zonal y meridional del esfuerzo del viento. Más detalles acerca del sensor SeaWind y el procesamiento de la información se puede encontrar en Piolle & Bentamy (2002).

Se calculó el transporte superficial de Ekman, M (m² s⁻¹) para cada punto de la grilla de las componentes del esfuerzo del viento usando la ecuación (Talley *et al.*, 2011):

$$\vec{M} = \frac{1}{\rho_w f} \vec{\tau} \quad (4)$$

donde $\vec{\tau}$ es el vector del esfuerzo del viento, ρ_w es la densidad del agua (1,025 kg m⁻³) y $f = 2\Omega \sin \varphi$ es el parámetro de Coriolis donde Ω es la velocidad angular de la Tierra (7,27x10⁻⁵ rad s⁻¹) y φ es la latitud de cada punto de grilla.

Radiación de onda corta

Los datos de la radiación de onda corta que llegan a la superficie, se basaron en un modelo de transferencia radiativa que incluyó datos radiativos medidos directamente y desarrollados por el proyecto International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP; Zhang *et al.*, 2004). El modelo de transferencia radiativa consiste en tomar todas las mediciones

globales disponibles del tiempo donde se especifiquen las propiedades de las nubes, la atmósfera y la superficie, y con ello generar el producto de la radiación de onda corta. En este trabajo se usó el producto distribuido por el proyecto Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) (Yu & Weller, 2007). Inicialmente los datos del ISCCP tienen una resolución temporal de 3 h y una resolución espacial de $2,5^\circ$. Sin embargo, OAFlux le aplicó un promedio diario e interpoló linealmente para obtener una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$.

La información de los campos de TSM, esfuerzo del viento y radiación de onda corta procede principalmente de sensores a bordo de satélites como se ha indicado precedentemente. Los mayores errores ocurren en zonas cercanas a la costa y por esta razón, existe un espacio entre los datos buenos y el continente.

RESULTADOS

Comportamiento regional del esfuerzo del viento, TSM y radiación solar

Para entender la estructura halina y termal del estuario del río Valdivia se investigó el comportamiento de la TSM, el esfuerzo del viento superficial y la radiación de onda corta en la región de estudio (Fig. 3).

Durante septiembre los vientos soplaron desde el noroeste y oeste, con magnitudes homogéneas que promediaron 0,1 Pa, que produjeron un transporte de Ekman paralelo a la costa (Fig. 3a). En tanto que en enero los vientos vinieron del suroeste con magnitudes muy bajas (alrededor de 0,02 Pa), que generaron un transporte superficial de Ekman hacia afuera de la costa, aunque débil (menor a $0,5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), y favorable a la surgencia (Fig. 3b). En abril los vientos soplaron del sur con magnitudes superiores fuera de la costa (0,11 Pa) que en el interior (0,05 Pa). Esto causó un transporte superficial de Ekman costa afuera de alrededor de $0,5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ cerca de Valdivia, propiciando condiciones de afloramiento (Fig. 3c). En contraste, en junio los vientos soplaron del noroeste (40°S) y del suroeste, más hacia el sur. La intensidad promedio fue de 0,20 Pa siendo sus magnitudes mayores a las registradas en las épocas anteriores (Fig. 3d).

La TSM en septiembre fue relativamente homogénea en toda la región con temperaturas entre $10,0^\circ$ y $11,5^\circ\text{C}$ que se incrementaron de sur a norte (Fig. 3a). En enero, la TSM incrementó drásticamente debido a la intensa radiación solar, cercana a 300 W m^{-2} (Fig. 4b), con temperaturas más bajas cerca de la costa a excepción de una pequeña región entre 39°S - $39^\circ40'\text{S}$. Por su parte, en abril cuando la radiación

solar comenzó a declinar (Fig. 4c), un gradiente costa-oceano de aproximadamente 3°C fue muy evidente, propio de condiciones de afloramiento, con temperaturas menores cerca de la costa de alrededor de $12,0^\circ\text{C}$ (Fig. 3c). En junio, cuando la radiación solar fue menor, alrededor de 55 W m^{-2} (Fig. 4d), también se observó un gradiente costa-oceano pero mucho menos evidente con temperaturas que fluctuaron entre $12,0^\circ\text{C}$ (fuera de la costa) y $11,0^\circ\text{C}$ (cerca de la costa) (Fig. 3d).

Variabilidad estacional hidrográfica y estratificación de la columna de agua

La marea modifica las características hidrográficas de la columna en todas las estaciones del año. Así, la cuña salina ingresa más hacia el interior del estuario cuando la marea está en llenante que durante la marea vaciante. A pesar que éstas características se evidenciaron en los muestreos analizados, el cambio más evidente se produjo durante abril (Fig. 5). En este mes, en la llenante, la columna de agua fue relativamente estratificada con una haloclina muy superficial (alrededor de 1 m) y temperaturas homogéneas (Fig. 5, panel izquierdo). Sin embargo, en la vaciante se presentó un frente termohalino que fue evidente desde la superficie hasta el fondo, *i.e.*, verticalmente homogéneo, desde los 4 km hacia el interior del río Valdivia mientras que hacia la boca se observó una débil estratificación (Fig. 5, panel derecho).

Considerando el resultado anterior (Fig. 5), el estudio de la variabilidad estacional se realizó con el promedio de los perfiles muestreados en la llenante y la vaciante, con el fin de eliminar la influencia de la marea y cuyos valores estadísticos se muestran en la Tabla 2. Así, durante septiembre, la temperatura presentó un rango homogéneo en toda la columna, variando entre $10,5^\circ$ y $11,0^\circ\text{C}$. Hacia la boca del estuario se observó una ligera inversión térmica, señalando la entrada de aguas ligeramente más cálidas por la sub-superficie (Fig. 6a). Por otro lado, la salinidad presentó un rango amplio que fue de 0 a 35, con una haloclina bien definida (representada por la isohalina de 15). Esta haloclina fue más superficial en la zona de la boca entre 1 y 2 m, y se profundizó hacia el interior del estuario (5 m a 5 km de la boca) permitiendo observar una cuña salina (Fig. 6b). Hacia la boca y en la posición de la haloclina (0-5 km), se observó una fuerte estratificación de la columna de agua por salinidad (Fig. 6c).

En enero, la temperatura del agua mostró los valores más altos con una termoclina bien marcada y temperaturas que fluctuaron entre 18°C (superficie de la zona interior) y 12°C (fondo en la zona de la boca) (Fig. 6d). Los valores de salinidad variaron entre 5 y

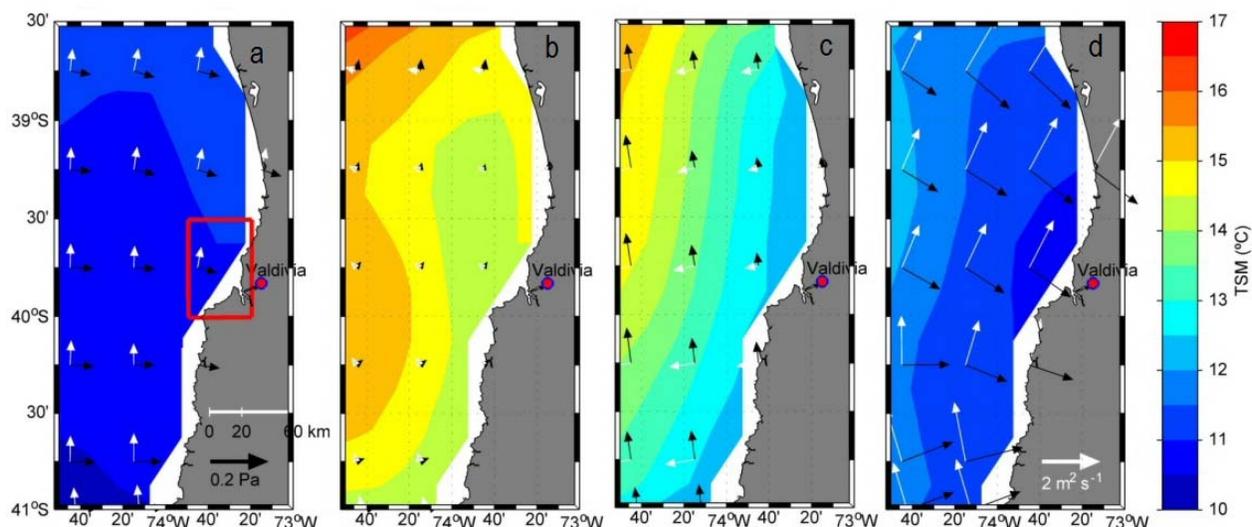


Figura 3. Campos promedios de la TSM (color, [°C]), esfuerzo del viento (vectores negros, [Pa]) y transporte superficial de Ekman (vectores blancos, [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]) de los tres días previos y el día en que se realizaron los muestreos hidrográficos. a) 20-23 de septiembre 2000, b) 10-13 de enero 2001, c) 6-9 de abril 2001 y d) 25-28 de junio 2001. El rectángulo rojo, muestra el área de estudio. En la parte inferior derecha de a) y d) se muestra una flecha que indica la escala del esfuerzo del viento y el transporte superficial de Ekman, respectivamente.

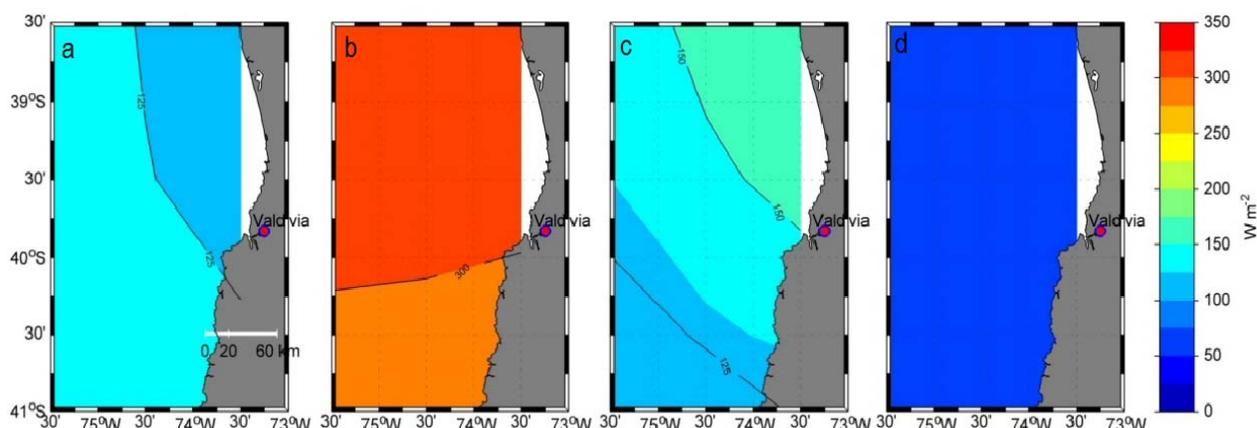


Figura 4. Campo promedio de la radiación de onda corta [W m^{-2}] de los tres días previos y el día en que se realizaron los muestreos hidrográficos. a) 20-23 de septiembre 2000, b) 10-13 de enero 2001, c) 6-9 de abril 2001 y d) 25-28 junio 2001.

35 entre la superficie y el fondo, respectivamente. La haloclina (representada por la isohalina de 25) se encontró alrededor de los 3 m en la boca, profundizándose hacia la parte más interna del estuario (7 m a 10 km de la boca) (Fig. 6e). A diferencia de la primavera, la fuerte estratificación registrada también en el verano hacia la boca del estuario (Fig. 6f) fue esta vez producida por la temperatura y la salinidad.

En abril, nuevamente el patrón de temperatura mostró una gran homogeneidad en cada uno de los perfiles, presentándose una termoclina débil. La temperatura varió entre $14,0^\circ\text{C}$ en la superficie hacia

el interior del estuario y $10,7^\circ\text{C}$ en el fondo de la mayoría de las estaciones (Fig. 6g). El rango de salinidad fue mucho más estrecho (salinidades de 19-34), coincidiendo con el mes de menor caudal (Fig. 2). Esta situación no permitió que se formara una haloclina bien marcada a lo largo de la sección (Fig. 6h). La mayor estratificación se localizó en los dos primeros metros de la columna de agua (Fig. 6i), relacionada también con los gradientes verticales de temperaturas y salinidad.

Una inversión térmica más pronunciada se observó en junio cuando las temperaturas superficiales descendieron hasta 10°C . La termoclina se encontró

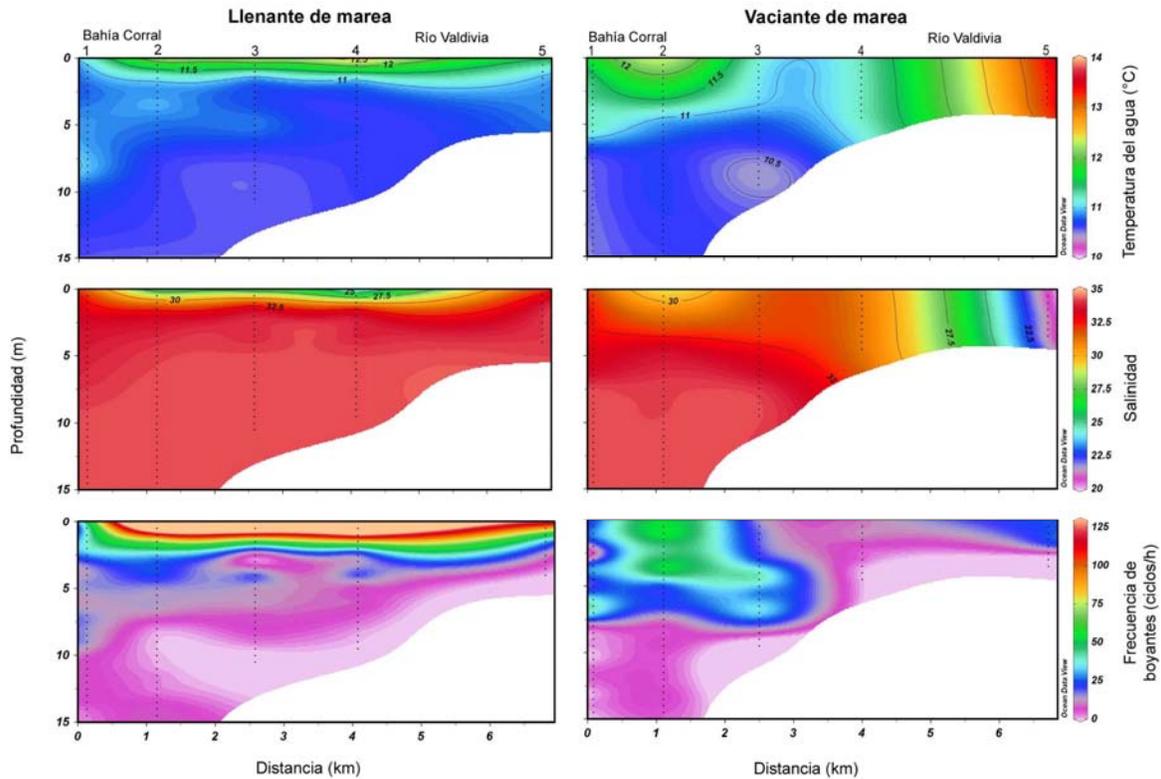


Figura 5. Secciones de temperatura, salinidad y frecuencia de boyantes a lo largo de la transecta indicada en la Figura 1 para el otoño (8-9 de abril 2001). Panel izquierdo: Marea llenante y panel derecho: Marea vaciante.

Tabla 2. Estadística de los muestreos hidrográficos estacionales realizados en el estuario del río Valdivia (2000-2001).

Campañas/parámetros	Temperatura (°C)	Salinidad	Densidad (kg m ⁻³)	Frecuencia de boyantes (ciclos h ⁻¹)
Septiembre 2000				
Promedio	10,8	23,6	17,9	58,3
Máximo	11,0	33,0	25,3	331,9
Desviación estándar	±0,1	±12,0	±9,3	±63,6
Enero 2001				
Promedio	15,3	24,1	17,5	45,7
Máximo	17,3	33,9	25,6	168,2
Desviación estándar	±1,5	±11,0	±8,7	±41,4
Abril 2001				
Promedio	11,1	32,1	24,5	24,6
Máximo	13,3	34,3	26,3	131,3
Desviación estándar	±0,7	±3,3	±2,6	±26,5
Junio 2001				
Promedio	10,8	18,9	14,3	62,0
Máximo	11,6	32,8	25,0	232,0
Desviación estándar	±0,5	±13,7	±10,6	±58,2

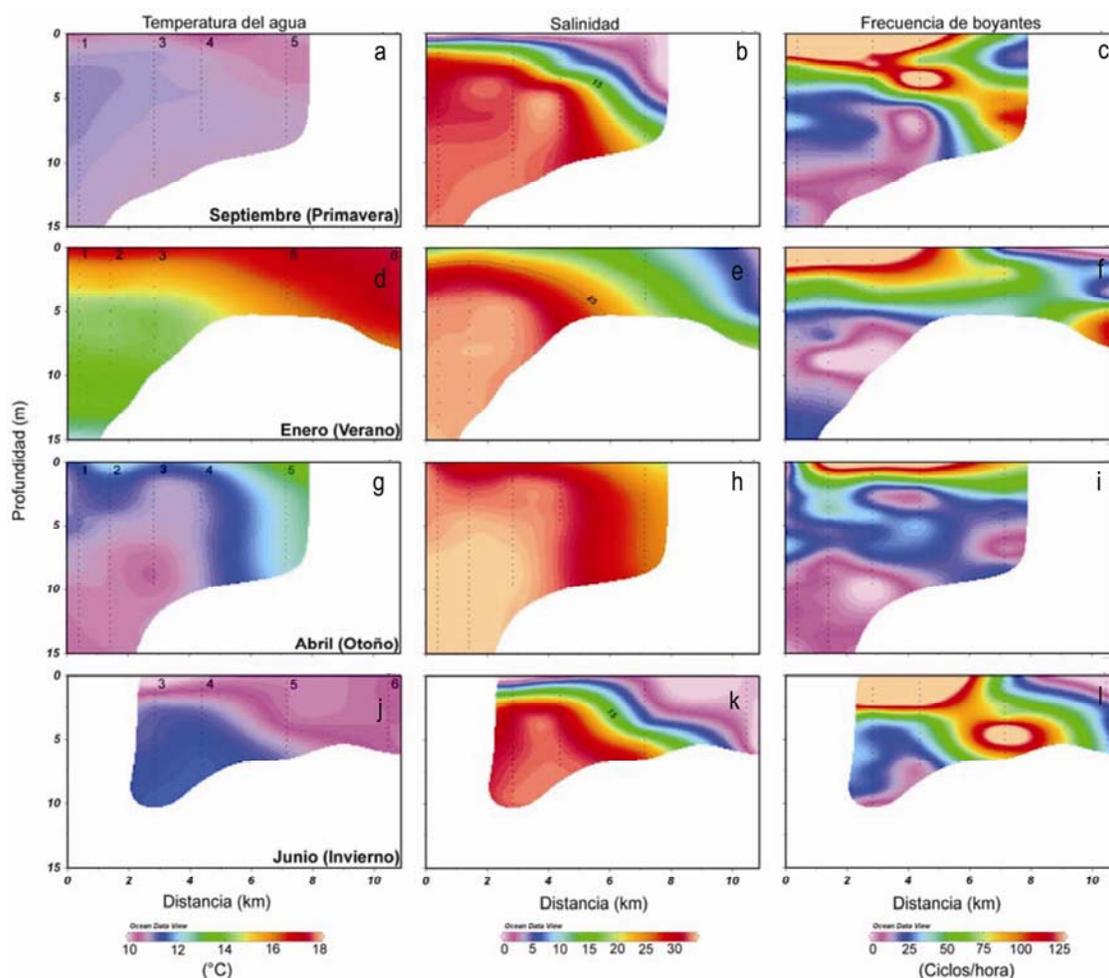


Figura 6. Secciones del promedio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$, panel izquierdo), salinidad (panel central) y frecuencia de boyantes (ciclos hora^{-1} , panel derecho) a lo largo de la transecta mostrada en la Figura 1. a), b) y c) 23 de septiembre 2000, d), e) y f) 12-13 de enero 2001, g), h) e i) 8-9 de abril 2001 y j), k) y l) 28-29 de junio 2001.

más superficial (2 a 2,5 m) en la zona de la boca y se profundizó (5 m) hacia el interior del estuario (Fig. 6j). El rango de salinidad fluctuó entre 0 y 35. En la boca del estuario la haloclina (isohalina de 15) fue superficial y comenzó a profundizarse desde la parte media hasta alcanzar el interior, permitiendo ver una marcada cuña salina que penetró hacia el interior del estuario (Fig. 6k). Al igual que en la primavera la entrada de la cuña salina produjo una fuerte estratificación de la columna de agua (Fig. 6l) en la región donde se registró el fuerte gradiente de salinidad.

Los resultados del parámetro de mezcla (n_s) mostraron que en general a medida que uno se aleja de la boca del estuario, la mezcla vertical disminuye (Fig. 7). En abril el estuario fue parcialmente mezclado en toda su extensión, a excepción de la estación 1, donde

se comportó como bien mezclado. En enero, cambió de parcialmente mezclado en casi toda su extensión a cuña salina hacia la parte más interna del estuario. Durante junio y septiembre el n_s fue en promedio aproximadamente 1,5 siendo por tanto de cuña salina, con la mayor estratificación vertical de todas las estaciones del año (Fig. 7).

DISCUSIÓN

El presente trabajo muestra la estructura termal y halina del estuario del río Valdivia en distintas épocas del año, mostrando una gran variabilidad debido a la interacción de los forzantes, marea, caudal del río, viento y radiación solar. Estos mismos forzantes han sido importantes en estuarios de parecidas características como por ejemplo, el estuario de Pontevedra en el noroeste de España (Prego *et al.*, 2001).

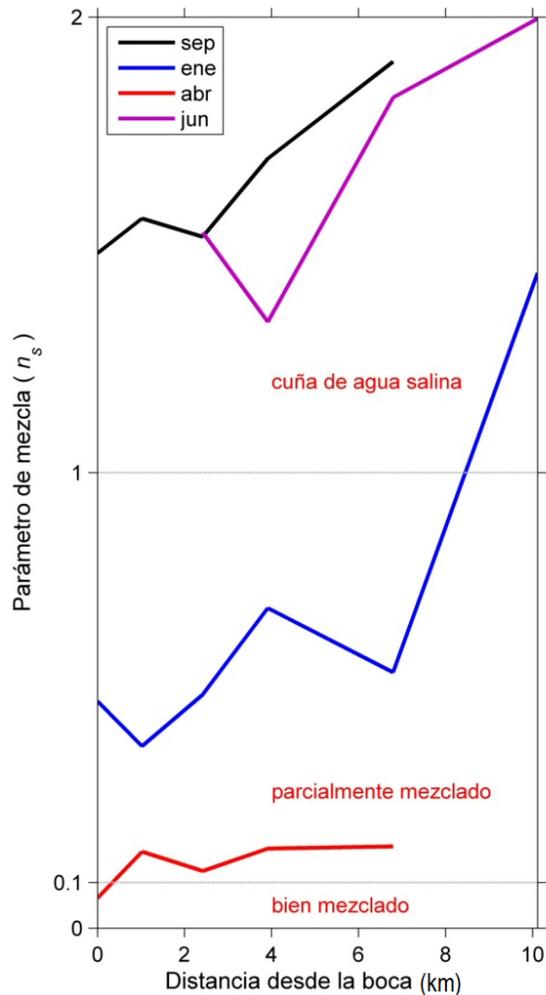


Figura 7. Parámetro de mezcla (n_s) del promedio de los perfiles verticales obtenidos durante la marea llenante y vaciante. Cada curva corresponde a cada una de las estaciones del año muestreadas. Las líneas punteadas establecen los límites en su clasificación. Si $n_s < 0,1$ la columna de agua es bien mezclada, cuando $0,1 < n_s < 1,0$ es parcialmente mezclada y si $n_s > 1,0$ es de cuña de agua salina.

En junio cuando el estuario fue clasificado de cuña salina, el caudal del río fue alto y los vientos se dirigieron hacia la boca del estuario forzando a que la cuña de agua salina (isohalina de 30) ingresara hacia el interior. Este viento también permitió que aguas más cálidas ingresaran al estuario por debajo y no se mezclaran con las aguas superficiales más frías provenientes del río debido a la intensa estratificación producida por la salinidad. Hay que añadir que los días en que se realizaron las mediciones casi no hubo radiación solar y debió haber una gran pérdida de calor a través de evaporación y conducción (términos proporcionales a la intensidad del viento llamados

también flujos turbulentos) y la re-irradiación de calor por medio de ondas largas que se mantuvieron relativamente constantes alrededor de todo del año (Garcés-Vargas & Abarca del Río, 2012). Esto habría causado que la capa superficial se redujera drásticamente, a diferencia de la capa inferior (la que no ha sido afectada por la interacción océano-atmósfera), que se mantiene aproximadamente con la misma temperatura ya que no se mezcla con la superior debido a la intensa estratificación señalada anteriormente. Ambos procesos ocasionarían la inversión térmica.

En septiembre, la situación también fue parecida; sin embargo, la cuña salina ingresó sólo hasta la mitad del estuario (5 km desde la boca), debido a que el caudal era más alto y los vientos más débiles que en junio, provenientes principalmente del oeste. Esta situación provocó una inversión térmica menos evidente debido a que también hubo una mayor radiación solar y una menor pérdida de calor por flujos turbulentos (menor intensidad del viento). Estas inversiones térmicas se han observado tanto en aguas costeras influenciadas por ríos como en estuarios. Así, por ejemplo se ha evidenciado en Chile central (bahía de Dichato, 30°30'S), donde existe una fuerte estratificación de la columna de agua debido al aporte de los ríos Itata y Biobío en invierno (Sobarzo *et al.*, 2007), y en el estuario de Pontevedra (clasificado como parcialmente mezclada) en la misma estación del año (Alvarez *et al.*, 2003).

En enero el estuario se comportó como parcialmente mezclada. La influencia de agua salada llegó hacia el interior debido a que el caudal del río fue mucho menor que en septiembre y junio. Lo más probable es que el viento, que favoreció el transporte de Ekman hacia fuera de la costa, impidió que esta influencia salina haya llegado más hacia adentro. La intensa radiación solar y una menor pérdida de calor por flujos turbulentos permitieron que la temperatura superficial fuera mayor que la del fondo.

En abril, cuando el estuario se clasificó como parcialmente mezclada, la descarga del río fue la menor, con la estratificación vertical más débil que en los otros meses analizados. Además, un mayor transporte de Ekman hacia afuera de la costa permitió que la influencia de agua salina (isohalina de 30) solo llegara hasta alrededor de los 6 km de la boca del estuario. Igualmente, debido a que la radiación solar disminuyó drásticamente y hubo una mayor pérdida de calor por flujos turbulentos, la temperatura superficial fue ligeramente superior a la del fondo.

Durante abril se produjeron los mayores cambios en la estructura termohalina entre la llenante y vaciante relacionadas con la drástica disminución del

caudal del río. Durante la marea llenante el agua proveniente del mar invadió gran parte de la columna de agua, ingresando más hacia el interior que en cualquier otra estación del año, llegando a ingresar más allá del río Cutipay (14 km de la boca), donde se registraron salinidades promedio en la columna de agua de 31,9 (figura mostrada). Por esta razón, el rango de salinidad fue estrecho y la columna de agua bastante homogénea, con una pequeña estratificación vertical superficial. Sin embargo, durante la vaciante, se observó un frente halino que abarcó toda la columna de agua, desde la parte media hasta el interior del estuario (10 km de la boca). Este frente se formó debido al retroceso del agua de mar y al avance del río hasta la parte media. En este sentido es importante destacar que si se caracteriza el estuario por la marea existente, durante la llenante sería parcialmente mezclada y en la vaciante desde el interior hasta 4 km de la boca sería totalmente mezclado y de ahí en adelante parcialmente mezclado.

Ibañez *et al.* (1997) postuló que existen dos tipos de estuarios de cuña salina y considera como factor determinante la descarga del río. En el primer tipo, un régimen de cuña salina se establece cuando el caudal del río es bajo, mientras que cuando el flujo es alto la cuña se elimina por el arrastre y el estuario se convierte en un río. En el segundo tipo, una cuña de sal se establece cuando el caudal del río es alto, mientras que un estuario parcialmente mezclado se desarrolla cuando el flujo es bajo. Desde este punto de vista, el estuario del río Valdivia pertenecería al segundo tipo y se ajusta a su característica micromareal, parecido al comportamiento del estuario del Río de la Plata (Meccia, 2008). A diferencia de otros estuarios de cuña salina que, en su mayoría, son del primer tipo, como el estuario de Yura en Japón (Kasai *et al.*, 2010), Ebro y Rhone en España y Francia, respectivamente (Ibañez *et al.*, 1997), Strymon en el norte de Grecia (Haralambidou *et al.*, 2010) y Douro en Portugal (Vieira & Bordalo, 2000).

El hecho que el estuario del río Valdivia sea clasificado como de cuña salina, discrepa con el estudio realizado anteriormente por Pino *et al.* (1994), quienes mencionaron que el estuario es parcialmente mezclado, específicamente del "Tipo 2b" de acuerdo al diagrama de circulación-estratificación de Hansen & Rattray (1966). Esto se debería a que los muestreos realizados por estos autores, correspondieron a un sector muy pequeño dentro del estuario y para una sola estación del año. Así, ellos establecieron una sección transversal con tres estaciones en la desembocadura del río Valdivia (aproximadamente en la posición de la estación 5 de la Figura 1) durante 12,5 h de un día de diciembre de 1990. Para establecer

si la metodología empleada para la clasificación del estuario obtenida por Pino *et al.* (1994) difiere de la obtenida en la presente investigación, se calculó el parámetro de mezcla (Ecuación 1) de acuerdo a los perfiles promedios durante el ciclo de la marea mostrados por ellos (su figura 6). El parámetro de mezcla varió entre 0,75 y 0,91, lo que efectivamente concuerda con la clasificación de parcialmente mezclado. Una explicación posible de que en esa estación del año sea parcialmente mezclado es que durante diciembre de 1990 el caudal fue cercano a la mitad de su promedio mensual climatológico según los registros de la DGA. Esto correspondió aproximadamente al promedio climatológico de otoño, donde los resultados muestran que el estuario del río Valdivia se comporta como un estuario parcialmente mezclado.

Cabe considerar que, si la descarga del río fuese afectada por condiciones anómalas (sequía o inundaciones) o antropogénicas, el estuario podría tener variaciones en la estratificación vertical. Sin embargo, en este estudio, las mediciones hidrográficas se realizaron cuando la descarga del río presentó valores cercanos a sus promedios a largo plazo dentro de las desviaciones estándar (Fig. 2), por lo tanto, correspondería a la dinámica normal del estuario.

Como se desprende de este trabajo, existe amplia variabilidad de las condiciones hidrográficas y por tanto es necesario un estudio similar durante la fase de cuadratura para ver si las variaciones en las condiciones hidrográficas y estratificación son tan marcadas como las que se evidenciaron durante la fase de sicigia. Además, es importante realizar otras investigaciones que consideren el rol de grandes eventos de surgencia inducidos por el viento, donde se espera cambios en la circulación y las propiedades termohalinas como se ha visto en otros estuarios micromareales (*e.g.*, estuario de Pontevedra, De Castro *et al.*, 2000; Alvarez *et al.*, 2003).

CONCLUSIONES

El estuario del río Valdivia es un sistema dinámico, cuyas propiedades termohalinas variaron estacionalmente debido a la variabilidad del caudal del río y los forzantes atmosféricos y oceánicos, que causaron que su estratificación cambie como se observa también en estuarios de otras latitudes (*e.g.*, estuarios del río Rhone y Ebre, Ibañez *et al.*, 1997). Si bien, la marea modifica la estructura de la columna de agua, los cambios más radicales se relacionaron con la variabilidad estacional del caudal del río, específicamente cuando fue menor. En primavera e invierno, el estuario se comportó como de cuña salina cuando la

cuenca recibió los mayores caudales, mientras que en verano y otoño se comportó como parcialmente mezclado cuando la cuenca recibió los menores caudales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto DID S-2009-41 de José Garcés-Vargas. Se agradece al proyecto FIP N° 2000-29 a través del INPESCA por haber proporcionado los datos hidrográficos y a la DGA por haber facilitado los datos de caudal.

REFERENCIAS

- Alvarez, I., M. De Castro, R. Prego & M. Gomez-Gesteira. 2003. Hydrographic characterization of a winter-upwelling event in the Ria of Pontevedra (NW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 56(3-4): 869-876.
- De Castro, M., M. Gomez-Gesteira, R. Prego, J.J. Taboada, P. Montero, P. Herbello & V. Perez-Villar. 2000. Wind and tidal influence on water circulation in a Galician ria (NW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 51(2): 161-176.
- Engle, V.D., J.C. Kurtz, L.M. Smith, C. Chancy & P. Bourgeois. 2007. A classification of US estuaries based on physical and hydrologic attributes. *Environ. Monit. Assess.*, 129(1-3): 397-412.
- Garcés-Vargas, J. & R. Abarca del Río. 2012. The surface heat fluxes along the eastern Pacific coast from 10°N to 40°S. *Austr. Meteorol. Oceanogr. J.*, 62: 71-82.
- Geyer, W.R. 2010. Estuarine salinity structure and circulation. In: A. Valle-Levinson (ed.). *Contemporary issues in estuarine physics, transport and water quality*. Cambridge University Press, New York, pp. 12-26.
- Hansen, D.V. & M. Rattray. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.*, 23: 319-326.
- Haralambidou, K., G. Sylaios & V.A. Tsihrintzis. 2010. Salt-wedge propagation in a Mediterranean microtidal river mouth. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 90(4): 174-184.
- Ibañez, C., D. Pont & N. Prat. 1997. Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: a basis for defining and classifying salt-wedge estuaries. *Limnol. Oceanogr.*, 42(1): 89-101.
- Kasai, A., Y. Kurikawa, M. Ueno, D. Robert & Y. Yamashita. 2010. Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 86(3): 408-414.
- Kurup, G.R., P. Hamilton & J.C. Patterson. 1998. Modelling the effect of seasonal flow variations on the position of salt wedge in a microtidal estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 47(2): 191-208.
- MacCready, P. & W.R. Geyer. 2010. Advances in estuarine physics. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2: 35-58.
- Meccia, V. 2008. Estudios de la circulación forzada por el viento en el estuario del Río de la Plata y sus implicancias en la estratificación: resultados del análisis de datos y simulaciones numéricas, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires 151 pp.
- Muñoz, A. 2003. Guía de los humedales del río Cruces. CEA Ediciones, Valdivia, 143 pp.
- Pardo, L.M., C.S. Cardyn & J. Garcés-Vargas. 2012a. Spatial variation in the environmental control of crab larval settlement in a micro-tidal austral estuary. *Helgol. Mar. Res.*, 66: 253-263.
- Pardo, L.M., P. Mora-Vásquez & J. Garcés-Vargas. 2012b. Asentamiento diario de megalopas de jaibas del género *Cancer* en un estuario micromareal. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 40(1): 142-152.
- Pardo, L.M., K. Gonzalez, J.P. Fuentes, K. Paschke & O.R. Chaparro. 2011. Survival and behavioral responses of juvenile crabs of *Cancer edwardsii* to severe hyposalinity events triggered by increased runoff at an estuarine nursery ground. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 404(1-2): 33-39.
- Perillo, G.M.E., M.C. Piccolo & M. Pino-Quivira. 1999. *Estuaries of South America: their geomorphology and dynamics*. Springer, Berlin, 223 pp.
- Pino, M., G.M.E. Perillo & P. Santamarina. 1994. Residual fluxes in a cross-section of the Valdivia river estuary, Chile. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 38(5): 491-505.
- Piolle, J.F. & A. Bentamy. 2002. Mean wind fields (MWF product)-User Manual-Volume 2: QuikSCAT. C2-MUT-W-04-IF, CERSAT, Plouzané, 47 pp.
- Prego, R., A.W. Dale, M. De Castro, M. Gómez-Gesteira, J.J. Taboada, P. Montero, M.R. Villareal & V. Pérez-Villar. 2001. Hydrography of the Pontevedra Ria: intra-annual spatial and temporal variability in a Galician coastal system (NW Spain). *J. Geophys. Res.*, 106(C9): 19845-19857.
- Reynolds, R.W., T.M. Smith, C. Liu, D.B. Chelton, K.S. Casey & M.G. Schlax. 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20(22): 5473-5496.
- Sobarzo, M., L. Bravo, D. Donoso, J. Garcés-Vargas & W. Schneider. 2007. Coastal upwelling and seasonal cycles that influence the water column over the

- continental shelf off central Chile. *Prog. Oceanogr.*, 75(3): 363-382.
- Stewart, R.H. 2008. Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M. University, College Station, Texas, 345 pp.
- Talley, L.D., G.L. Pickard & W.J. Emery. 2011. Descriptive physical oceanography: an introduction. Academic Press, Amsterdam, 555 pp.
- Tomczak, M. 1998. Definition of estuaries; empirical estuary classification. <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/chapter11.html>. Reviewed: 5 abril 2012.
- Valdovinos, C. 2004. Ecosistemas estuarinos. In: C.L. Werlinger (ed.). *Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos*. Fondo Nacional del Libro y la Lectura, Concepción, 18: 397-414.
- Valle-Levinson, A. 2010. Definition and classification of estuaries. In: A. Valle-Levinson (ed.). *Contemporary issues in estuarine physics*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1-11.
- Vargas, C.A., S.E. Araneda & G. Valenzuela. 2003. Influence of tidal phase and circulation on larval fish distribution in a partially mixed estuary, Corral Bay, Chile. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, 83(1): 217-222.
- Vieira, M.E.C. & A.A. Bordalo. 2000. The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge. *Oceanol. Acta*, 23(5): 585-594.
- Yu, L. & R. Weller. 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981-2005). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 88(4): 527-539.
- Zhang, Y.C., W.B. Rossow, A.A. Lacis, V. Oinas & M.I. Mishchenko. 2004. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data. *J. Geophys. Res.*, 109(D19): doi:10.1029/2003JD004457.

Received: 18 April 2012; Accepted: 24 January 2013