

# Correlación entre las distribuciones de velocidad y *backscatter* y la concentración de zooplancton en un estuario modificado

## Correlation between velocity and backscatter distributions and zooplankton concentration in a modified estuary

L. P. Thomas\*, B. M. Marino, M. G. Pereyra

Grupo de Flujos Geofísicos y Ambientales, Facultad de Ciencias Exactas  
CIFICEN, CONICET - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires  
Pinto 399, B7000GHG Tandil, Argentina

Recibido: 09/11/14; aceptado: 29/05/15

Las señales del *backscatter* correspondientes a organismos planctónicos y sedimentos suspendidos son identificadas comparando la información proporcionada por sensores CTD + OBS y un ecosonda en el sector costero de un estuario modificado. Las mediciones se complementan con las distribuciones transversales de velocidad y *backscatter* proporcionadas por un ADCP y los perfiles de temperatura, salinidad y turbidez en estaciones fijas. El propósito es relacionar la agregación del material biológico con la hidrodinámica y morfología locales tanto cuando el estuario se encuentra naturalmente estratificado como cuando se produce el mezclado de las aguas debido, por ejemplo, a la ocurrencia de tormentas severas. La interpretación de los registros hidroacústicos muestra que el zooplancton tiende a concentrarse selectivamente en regiones de corriente débil y con escaso contenido de sedimentos suspendidos, lo cual no es sólo relevante desde un punto de vista práctico y físico sino biológico ya que estos organismos constituyen el primer eslabón de la cadena trófica acuática.

*Palabras clave:* Estuarios, Hidrodinámica, Dragado intensivo, Instrumentos acústicos.

The backscatter signals corresponding to planktonic organisms and suspended sediments are identified by comparing CTD + OBS sensors and echosounder data in the coastal sector of a modified estuary. The measurements are complemented with transverse velocity and backscatter distributions obtained with an ADCP and profiles of temperature, salinity and turbidity in fixed stations. The purpose is to relate the aggregation of biological matter to the local hydrodynamics and morphology when the estuary is naturally stratified and when the mixing of waters occurs due to, for example, the occurrence of severe storms. The interpretation of hydroacoustic records shows that zooplankton tends to accumulate selectively in regions with slow currents and scarce content of suspended sediments, which is not only important from practical and physical points of view but also biological, since these organisms are the first link in the aquatic food chain.

*Keywords:* Estuaries, Hydrodynamics, Intensive dredging, Acoustic instruments.

### I. INTRODUCCIÓN

La evolución de la infraestructura portuaria y el dragado continuo para mantener las condiciones de navegabilidad ocasionan cambios en los ambientes estuariales asociados con la distribución de la biota y el régimen sedimentario, afectando no sólo el entorno cercano sino también las áreas alejadas del puerto<sup>(1-4)</sup>. Por lo tanto el alcance de estos cambios y su mitigación constituyen aspectos clave para la planificación estratégica de los recursos estuarinos. El uso no planificado de los mismos y la ocurrencia de eventos impredecibles deterioran el sistema causando dificultades crecientes para desarrollar actividades generadoras de empleo e impactando sobre la calidad de vida de los habitantes de la región.

De por sí, los estuarios son sistemas dinámicos a causa de la compleja interacción entre la descarga de los ríos, portadora de sólidos suspendidos y nutrientes, y la

intrusión salina. En ellos, la concentración y la distribución del material biológico suelen ser afectadas por la estratificación, la velocidad y turbulencia de las corrientes, los vórtices que pueden comportarse como barreras físicas para algunas formas de vida acuática y las pequeñas variaciones de temperatura, nutrientes y sedimentos suspendidos<sup>(5-7)</sup>. En cambio, los gradientes horizontales y verticales de temperatura y salinidad generados por el avance mareal tienen un efecto positivo ya que producen áreas de alta productividad biológica<sup>(8-9)</sup>. Estos factores operan en diferentes escalas temporales y espaciales estableciendo una dinámica que es importante analizar con criterios físicos integrados a la visión ingenieril dominante en estos casos.

El estuario del río Quequén Grande (ERQG), localizado en el SE de la provincia de Buenos Aires (Argentina), atraviesa un centro urbano de unos 100 mil habitantes que ha exhibido un notable crecimiento

---

\* E-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

durante las últimas décadas debido al turismo y al desarrollo del puerto de aguas profundas por el que se exporta la producción de una extensa región agrícola-ganadera. Durante el último siglo, los tramos costero e intermedio fueron afectados por la expansión portuaria, dragados, procesos de control de la sedimentación y deriva litoral, obras para estabilizar las riberas y el reciente alargamiento de las escolleras, cambiando sustancialmente las características físicas y morfológicas originales y alterando la distribución y el transporte de sólidos suspendidos <sup>(10)</sup>. Los últimos 2 km presentan 12-14 m de profundidad (mantenida por el dragado continuo) que contrasta con los 3-5 m encontrados aguas arriba (Fig. 1a), estableciéndose un escalón o salto abrupto de profundidad en la cabeza del puerto. Un conjunto de pequeñas cascadas a 15 km de la desembocadura constituye la cabecera del estuario e imponen condiciones de borde especiales para los flujos. La escasez de información obtenida en forma sistemática y planificada en el tiempo para evaluar las consecuencias de los cambios impuestos, sumada a sus características hidrodinámicas particulares, convierten a este estuario en un atractivo lugar de estudio.

Por su parte, la retrodispersión de señales acústicas (o *backscatter*) de alta frecuencia se usa comúnmente para detectar, clasificar y cuantificar organismos acuáticos. Sin embargo, la identificación de cada especie y la estimación de su abundancia no resulta sencillo debido a la diversidad de especies que cohabitan y a la variación de las propiedades acústicas de los individuos y cardúmenes durante las diferentes etapas de su desarrollo <sup>(11-12)</sup>. En particular, las distribuciones de zooplancton son heterogéneas, complejas, irregulares e influenciadas por los procesos físicos en diferentes escalas que varían desde la de la turbulencia (milímetros a centímetros) <sup>(13)</sup> a la de la cuenca (decenas a cientos de kilómetros) <sup>(14)</sup>. Para tiempos característicos del orden del periodo mareal, la advección es el mecanismo de transporte más importante cubriendo un amplio rango espacio-temporal para el cual los desplazamientos individuales y el desarrollo natural de las especies son despreciables. Así, las agregaciones de zooplancton tienen tamaño suficiente para contribuir como blancos acústicos y, al carecer de movilidad propia significativa durante las mediciones, derivan con las corrientes pero no sedimentan como las partículas inorgánicas. Por lo tanto, su concentración se relaciona a, y es un indicador de, las características de los flujos presentes.

El objetivo de este trabajo es relacionar la distribución de la señal acústica retrodispersada de un ecosonda con la presencia de zooplancton en condiciones de mezclado y estratificación de las aguas en el sector costero del ERQG. Estas mediciones son complementadas con otras de temperatura, salinidad, velocidad y material particulado suspendido efectuadas con otros equipos. La interpretación física de los resultados obtenidos con este procedimiento, aplicado por primera vez en este estuario, pretende contribuir con información cuantitativa de base para futuros

relevamientos y ayudar en la toma de decisiones que no afecten la sustentabilidad del sistema acuático.

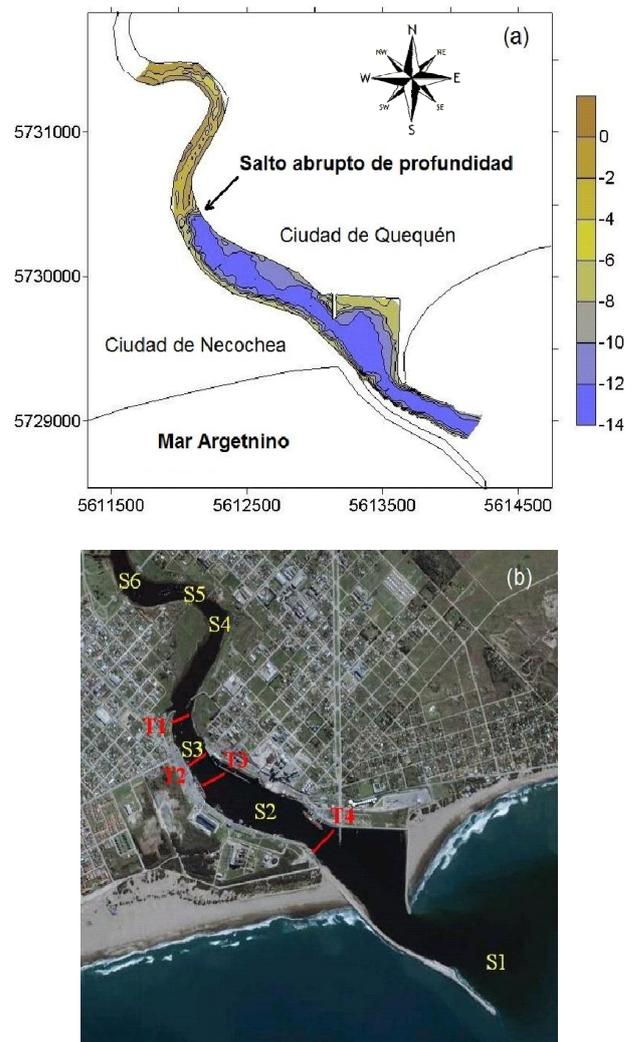


Figura 1: (a) Batimetría de los últimos 3.7km del ERQG (las coordenadas se expresan en m de acuerdo a la proyección de Gauss-Krüger), y (b) sitios de medición de las estaciones S1-S6 y las secciones transversales T1-T4.

## II. METODOLOGÍA

Se realizaron dos prospecciones acústicas durante ciclos completos de marea, una en el mes de enero (verano) con estuario mezclado y otra en agosto (invierno) con estuario estratificado. Se utilizó un ecosonda científico portátil *SIMRAD EY500* equipado con un transductor mono-haz de banda angosta que opera en la frecuencia de 200 kHz con un ancho de haz de potencia media de 7°. Este instrumento y un GPS se montaron sobre una embarcación de pequeño porte y, navegando a una velocidad de 3.5 nudos, se efectuaron derroteros longitudinales y en zig-zag. La amplitud de la señal ecoica se calibró siguiendo el procedimiento estándar empleando una esfera de tungsteno como blanco acústico de referencia <sup>(15)</sup>. Los registros fueron post-procesados y analizados utilizando el programa *SonarData Echoview*. El rango útil de profundidad se estableció entre 1m por debajo de la superficie libre (capa donde la señal retrodispersada satura) y el lecho.

Luego se exportaron los datos correspondientes al total de transectas realizadas y de ellos se extrajeron las coordenadas geográficas (latitud y longitud) que son convertidas a distancias expresadas en metros sobre un plano por medio de la proyección Gauss-Kruger graficando con el software *Surfer*. A partir de la señal retrodispersada en el lecho se obtuvo la batimetría del área de estudio mostrada en la Fig. 1a.

La respuesta acústica de cada organismo acuático depende de la frecuencia a la que trabaja el ecosonda, la especie y su tamaño, el ángulo de orientación, la presencia de cavidades gaseosas, etc. Para cada especie y/o clase de tamaño/edad identificada mediante un método de muestreo directo, el correspondiente histograma de retrodispersión sonora se aproxima por una curva de mejor ajuste caracterizada por el valor máximo del nivel  $S_v$  (de retrodispersión sonora por unidad de volumen) del histograma, la desviación estándar, etc. Luego, toda señal detectada con esos niveles de retrodispersión es asociada a los blancos acústicos registrados. Para el presente estudio, es suficiente la identificación de cuatro grupos funcionales distintivos usando los respectivos valores del coeficiente  $S_v$ , promediados cada 10 m de recorrido de la embarcación, con sus desviaciones estándar<sup>(16-17)</sup>: cardúmenes, peces individuales, plancton y sedimentos suspendidos. Los valores del coeficiente  $s_A$  de retrodispersión sonora por unidad de área se promediaron horizontalmente, definiendo estratos de 3 m de espesor para calcular un valor promedio de  $s_A$  y obtener un mapa de la distribución horizontal en las diferentes capas usando el método de triangulación con interpolación lineal.

La temperatura, la salinidad y la concentración de sólidos suspendidos se midieron con el bote detenido empleando un CTD *Sea-Bird SBE19* en seis puntos fijos, o estaciones, identificados como S1-S6 en la Fig. 1b, con una resolución vertical de unos 0.07 m determinada por la tasa de adquisición y la velocidad de inmersión del equipo. El CTD opera con una frecuencia de muestreo de 2 Hz y un sensor doble OBS 3+Plus en el rango 0 – 600 NTU.

Las distribuciones transversales de la velocidad del agua y de la intensidad del *backscatter* en las secciones T1-T4 (Fig. 1b) se obtuvieron con un ADCP *Teledyne RD Instruments* de 1200 kHz operado en el Modo 1<sup>(18)</sup> con un tamaño de haz de 0.25 m y una frecuencia de muestreo de 0.64 s. La velocidad del agua en la dirección del eje del estuario se determina combinando las componentes N y E de la velocidad medida.

Las muestras de plancton se colectaron empleando una red Hensen de 300 micras de abertura de malla mediante arrastres verticales y oblicuos desde las cercanías del fondo y hasta la superficie, y se conservaron en formol (concentración final de 4%) para su posterior análisis en el laboratorio.

El ecosonda trabaja a una frecuencia (200 kHz) sensible no sólo a los blancos biológicos sino también a los sólidos en suspensión si su concentración y tamaño son suficientemente altos<sup>(19-20)</sup>. En particular, la

sensibilidad se relaciona con el tamaño  $a$  de la partícula por medio del parámetro adimensional  $k_s a$ , donde  $k_s$  es el número de onda del sonido en el agua. Por otro lado, el OBS detecta sedimentos suspendidos en un amplio rango a partir de dimensiones muy pequeñas ( $\approx 1 \mu\text{m}$ ) puesto que el tamaño de la partícula se relaciona con el número de onda de la luz  $k_l \ll k_s$ . Además, la señal del OBS originada por los sedimentos suspendidos constituye un efecto de primer orden mientras que las características del blanco (tamaño, forma, reflectividad, etc.) son efectos de orden inferior<sup>(21)</sup>. Una simple correlación entre los perfiles de turbidez obtenidos con el OBS y con el ecosonda permite inferir la presencia de sedimentos suspendidos. Diferencias significativas entre ambas señales sugieren la presencia de material biológico, la cual debe ser consistente con el análisis de las muestras colectadas.

### III. RESULTADOS

#### Distribuciones de zooplancton

La distribución espacial de los valores del coeficiente  $s_A$  con estuario mezclado mostrada en la Fig. 2 corresponde a mediciones efectuadas inmediatamente después de que una tormenta severa afectara la zona. Se observa que la mayor intensidad del *backscatter* se encuentra en el rango 0-200  $\text{m}^2/\text{min}^2$ , distribuyéndose los valores máximos a lo largo del sector portuario y, en menor medida, en las depresiones del lecho ubicadas aguas-arriba del escalón. La mayor concentración de blancos acústicos se presenta en el área portuaria próxima al escalón y cerca del lecho durante la fase de marea entrante (Fig. 2a) lo que es corroborado por el contenido de las muestras colectadas en S3, compuestas mayormente de zooplancton marino característico de ambientes costeros, diferentes especies de crustáceos, larvas de peces y pequeñas medusas. Durante el reflujó (Fig. 2b), la mayor densidad de blancos acústicos se encuentra sobre el lecho de la zona portuaria.

Al diferenciar los blancos de acuerdo a su profundidad, se observa además la tendencia de los organismos a permanecer sobre la ribera NE. Los valores medios de  $s_A$  (356 y 504  $\text{m}^2/\text{min}^2$  para el reflujó y flujo, respectivamente), excluyendo del cálculo las contribuciones de los cardúmenes ( $S_v > -46 \text{ db}$ ), reflejan la abundancia de plancton a lo largo del estuario sugiriendo que su circulación no es importante, ya que el orden de magnitud de la cantidad de organismos es prácticamente el mismo durante ambas fases de la marea aunque con una distribución espacial diferente. También indican que el recambio de agua en la zona portuaria no se completa en un ciclo mareal.

En condiciones normales de estratificación estuarial, las distribuciones de  $s_A$  (Fig. 3) durante la fase de marea entrante también muestran una alta concentración de blancos acústicos sobre la margen NE. La menor cantidad de plancton y mayor número de cardúmenes y peces en comparación con los resultados obtenidos en un sistema mezclado se debe al cambio estacional. El análisis de las muestras colectadas en este ambiente

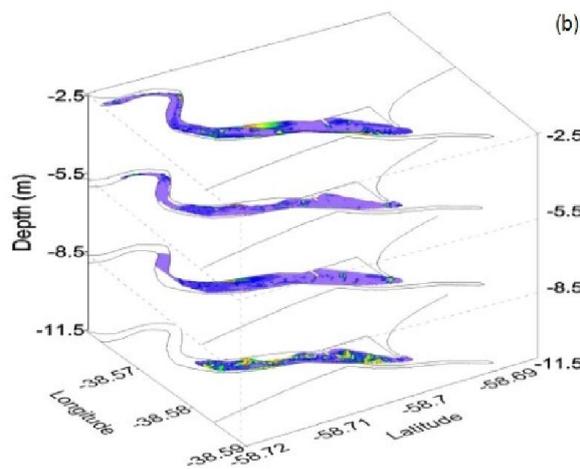
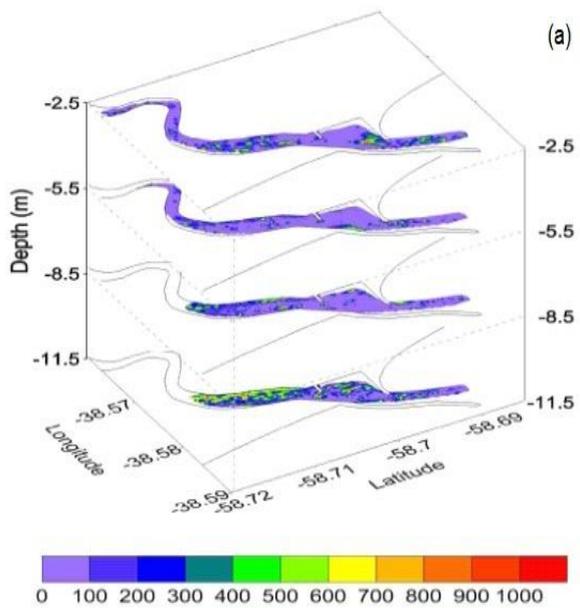


Figura 2: Distribución de los valores de  $s_A$  (en  $m^2/min^2$ ) integrados en estratos de 3m durante el (a) flujo y (b) reflujos en un estuario mezclados.

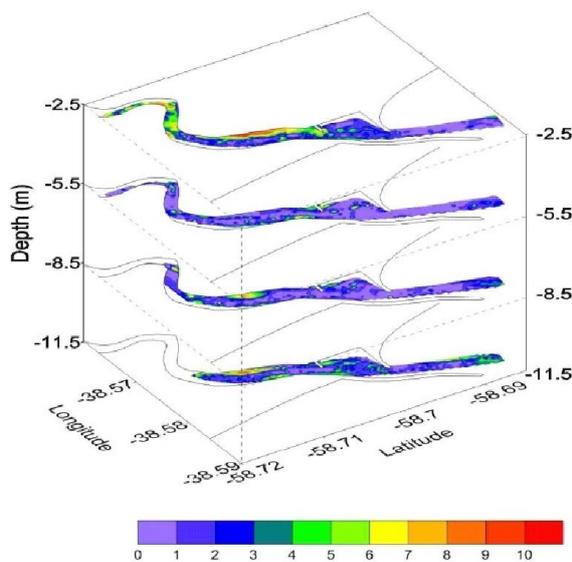


Figura 3: Distribución de los valores de  $s_A$  (en  $m^2/min^2$ ) durante el flujo en un estuario estratificado.

indica un predominio de las larvas de nauplios de cirripedios y copépodos, descartando como componente principal del *backscatter* a la materia orgánica particulada (distinta de organismos vivos) en suspensión por presentarse en cantidades escasas.

Los perfiles de salinidad y densidad obtenidos en las estaciones S5, S2 y S1 durante el flujo en un sistema estratificado manifiestan la presencia de una halóclina entre 0.50 y 0.90m de profundidad en el estuario (Figs. 4a-b), y otra menos clara y más delgada en la zona marítima (Fig. 4c). Los perfiles de temperatura y salinidad en S5 muestran dos capas bien definidas a diferente temperatura debido al escaso mezclado entre ellas siendo la temperatura de la capa superficial ligeramente más alta por el calentamiento solar. Corriente-arriba del escalón (Fig. 4a) la turbidez es elevada debido a los sedimentos suspendidos transportados por el río en la capa superficial; estos no aumentan su concentración significativamente y permanecen en ella aún en la zona portuaria (Fig. 4b) y en el mar adyacente (Fig. 4c). Además de las debidas a la marea, no se detectaron variaciones importantes de estos parámetros con el tiempo.

### Distribuciones de velocidad y *backscatter*

De acuerdo a las distribuciones de velocidad encontradas durante la fase de marea entrante y con el estuario estratificado, el flujo es uniforme en todas las secciones transversales aunque más débil en la zona portuaria. Cuando el reflujos comienza, la corriente no es uniforme en profundidad ni a lo ancho del estuario, experimentando una notoria intensificación sobre la margen SO debido a la presencia de un meandro antes de entrar al tramo recto de la zona portuaria (Figs. 5a-b). En la parte poco profunda del estuario (Fig. 5a), la velocidad es alta generando un esfuerzo de corte sobre el lecho suficiente para barrer con los sedimentos de fondo como se infiere de las distribuciones de *backscatter* (Fig. 6a). Corriente-abajo del escalón (Figs. 5c-d), dos capas con diferentes magnitudes de velocidad se forman en la columna de agua: una capa superficial más rápida de agua salobre, y otra por debajo de ella que se mueve lentamente compuesta de agua de mar. Este comportamiento se debe a la estratificación natural y a que el espesor de la capa superficial es similar al de aquella en el meandro corriente-arriba del escalón (esto es, tiene la profundidad de la cresta del escalón). Además, en este sector estuarial se observa una diferencia entre los valores de velocidad sobre las márgenes SO y NE: La corriente comienza sobre la ribera SO en T2 y cubre toda la sección transversal T4 a la altura de las escolleras antes de entrar al mar.

Las Figs. 6 ilustran como los sedimentos son transportados a la zona portuaria en la capa superficial durante el reflujos. Las señales del *backscatter* indican que estos se depositan principalmente sobre la margen SO del puerto en cercanías del escalón donde más dragado es necesario. Cuando el flujo comienza nuevamente, la mayoría de los sólidos suspendidos ya

decantaron y la velocidad de la corriente es lo suficientemente baja para que los sedimentos restantes

la zona marítima (c), obtenidos durante un mismo derrotero con marea entrante en el estuario estratificado.

sean transportados corriente-arriba del escalón. Los análisis realizados a muestras de agua y sedimentos indican que las partículas que sedimentan en este sector en períodos del orden del ciclo mareal ( $\approx 12$  h) se componen de arenas finas y limo grueso con un tamaño medio de unos  $90 \mu\text{m}$  conformando la carga de fondo, mientras que limo de menor tamaño y arcilla conforman la carga de lavado que es advectada por las corrientes.

Las mediciones de conductividad (Fig. 4) muestran que la salinidad en la capa superficial se encuentra en el rango  $0 < S < 10$  ups (y como consecuencia, la densidad  $\rho \approx 1000\text{-}1007 \text{ kg/m}^3$ ), mientras que en la capa inferior es  $S = 34$  ups (agua de mar pura y  $\rho \approx 1025 \text{ kg/m}^3$ ). Una eventual diferencia de temperatura entre las capas no aporta una diferencia significativa de densidad. Luego, una mayor densidad de la capa superior como para generar inestabilidades de Rayleigh-Taylor y los movimientos convectivos transportadores de sedimentos como los descritos por Hoyal *et al.* (22) y McCool y Parsons (23), debe provenir de las partículas en suspensión, las que tendrían que presentar una concentración de alrededor de  $20.0 \text{ g/l}$  para que eso ocurra. Pero esta concentración de material particulado suspendido es demasiado elevada respecto de los valores máximos medidos ( $\sim 0.1 \text{ g/l}$ ). En consecuencia, la decantación de los sedimentos por este proceso es improbable cuando la estratificación es bien establecida, y de hecho tales intrusiones no fueron detectadas. Por lo tanto, la sedimentación en la zona portuaria se produce por la ocurrencia de un proceso doble-difusivo que lleva a las partículas al fondo en forma individual.

#### IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La estimación del espesor de la interfase en un sistema estratificado permite calcular el gradiente máximo de velocidad desarrollado en los ciclos mareales. La velocidad de la capa superior induce una inestabilidad de corte y el mezclado en la interfase hasta que el número de Richardson  $Ri$  alcanza el valor crítico. Fong y Geyer(24) y Hetland(25) calcularon el espesor de la capa al cual se cumple este criterio, basándose en la diferencia de densidad entre ambas capas y en la velocidad de la capa superficial proporcionada por el transporte de Ekman. Aquí se usa ese criterio para relacionar el espesor de la capa superficial con la diferencia máxima de velocidades entre ambas capas que tiene lugar aguas arriba del escalón. Para un sistema de dos capas es  $Ri = g'\Delta h/\Delta u^2$ , donde  $g' = g\Delta\rho/\rho$  es la gravedad reducida,  $\Delta\rho$  y  $\Delta u$  son las diferencias de densidad y velocidad entre las capas, respectivamente, y  $\Delta h$  es el espesor de la interfase. Por lo tanto, en S5 es  $\Delta\rho/\rho \approx 0.02$  y  $\Delta h \approx 0.4 \text{ m}$ . Como el valor mínimo para una estratificación estable es  $Ri = 0.25$ , el valor máximo de  $\Delta u$  resulta  $0.56 \text{ m/s}$ , que es consistente con las mediciones efectuadas con el ADCP.

Una capa superficial de espesor similar se encuentra en el puerto (Fig. 4b) pero con mayor temperatura y menores diferencias de densidad y salinidad (entre las

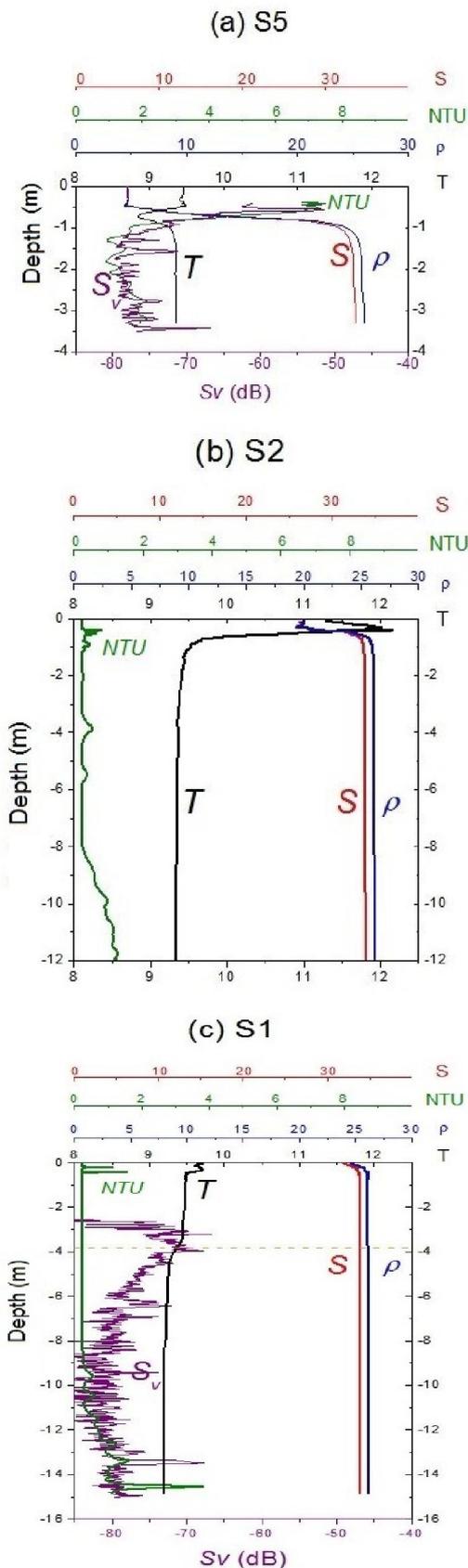


Figura 4: Perfiles típicos de salinidad  $S$ , densidad  $\rho$ , turbidez  $NTU$ , temperatura  $T$  y nivel de backscatter volumétrico  $S_v$  corriente-arriba del escalón (a), en la zona portuaria (b) y en

aguas superficiales y más profundas), y caracterizada por una baja señal del OBS en comparación con

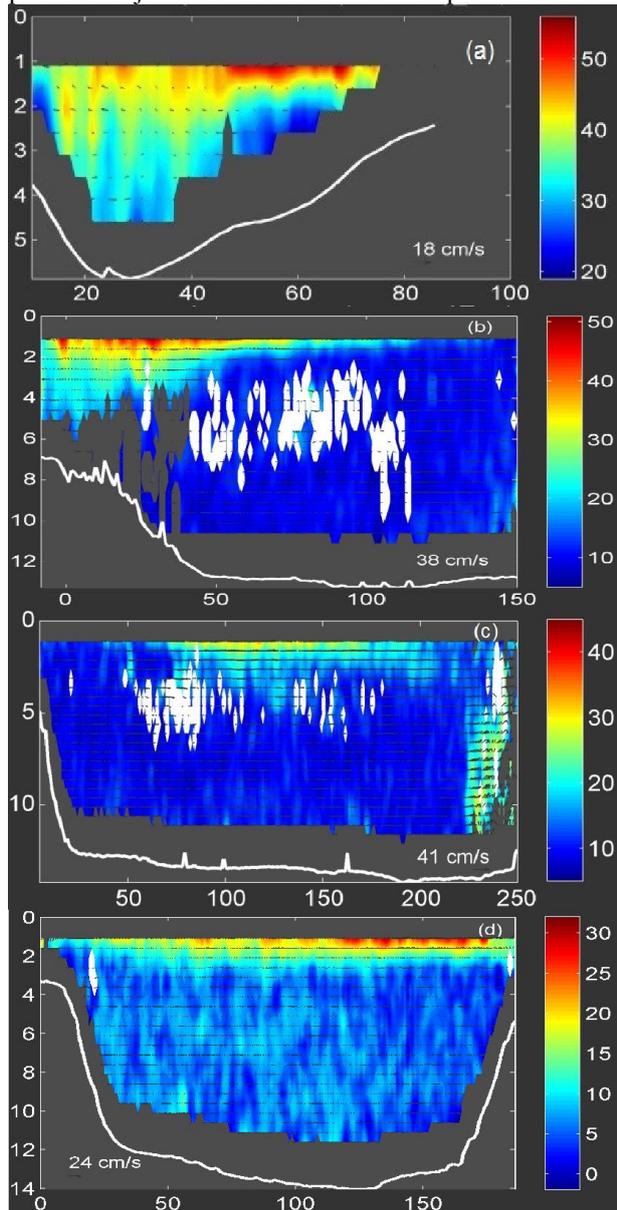


Figura 5: Distribuciones de las componentes longitudinal (falso color) y transversal (flechas) de la velocidad (cm/s) en (a) T1, (b) T2, (c) T3 y (d) T4 durante una travesía al comienzo del reflujo. Las áreas blancas corresponden a peces y cardúmenes.

aquella en S5, indicando la ocurrencia de mezclado ligero. Esto se explica al considerar que esta capa superior se extiende y fluye más lentamente, tomando así más tiempo en desplazarse a lo largo de la zona portuaria, quedando más expuesta al calentamiento solar y favoreciendo la decantación de los sedimentos acarreados por el río.

Para cuantificar el mezclado en la capa superficial, se considera el cociente entre las densidades del agua y del agua de mar para el cual se toman los valores  $\rho$  y  $\rho_m \approx 26$  en unidades Sigma-t, respectivamente. De las mediciones resulta que  $\rho/\rho_m \approx 0.2$  en S4 y S5 y  $\rho/\rho_m \approx 0.9$  en S1 lo que implica que la capa superficial aguas arriba del escalón se compone de agua con baja

concentración de sal y se va mezclando a medida que se aproxima al mar aumentando en salinidad.

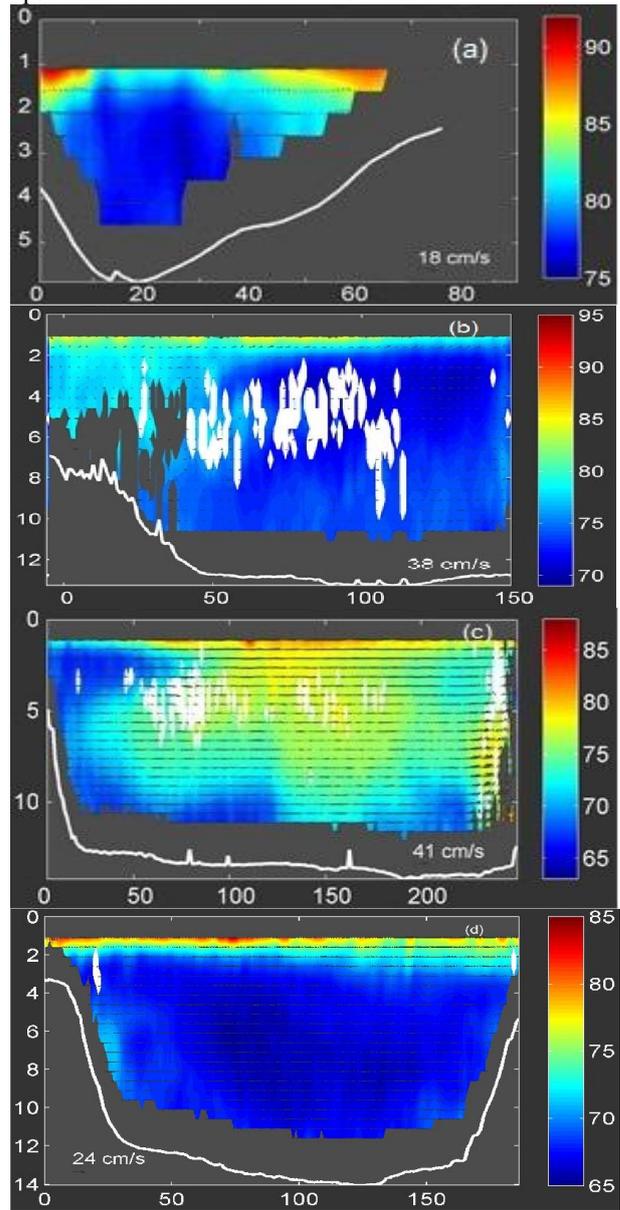


Figura 6: Distribuciones de la intensidad del backscatter correspondientes a mediciones realizadas transversalmente en (a) T1, (b) T2, (c) T3 y (d) T4 durante una travesía al comienzo del reflujo. Las áreas blancas corresponden a peces y cardúmenes.

Por otro lado, la Fig. 7 presenta el perfil de turbidez obtenido con el OBS (en color azul) y el correspondiente al backscatter del ecosonda (en color negro) en S3. Ambos indican la presencia de sedimentos de fondo en suspensión por debajo de 7 m. Los resultados además muestran que la respuesta del ecosonda es de unos -60 dB para los sedimentos suspendidos en esta parte de la columna de agua y alrededor de -80 dB para aquellos que se encuentran por encima de esta profundidad. Aplicando la misma correlación en otras estaciones, se encuentra que la intensidad del backscatter en S5 (Fig. 4a) se debe a la existencia de materia particulada en suspensión en toda la columna de agua, mientras que en S1 (Fig. 4c) los

sedimentos se concentran por debajo de los primeros 10 m de profundidad.

Los registros ecoicos y los muestreos sugieren una distribución vertical del zooplancton con tendencia a ocupar la parte más baja de la columna de agua al pie del escalón y sobre la margen NE de la zona portuaria. La profundidad a la que se agregan estos organismos previene que sean arrastrados fácilmente durante la fase de inundación; también evitan la capa superficial donde las corrientes son más intensas durante el reflujó y donde se producen cambios bruscos de salinidad. De hecho, cuando la estratificación se encuentra bien establecida, la salinidad cambia en la capa superficial desde el valor correspondiente al agua de mar al final del flujo al de agua salobre al final del reflujó. Una distribución similar de zooplancton se encuentra luego

*negros) y turbidez (puntos azules). (b) Ecograma en S3; la línea vertical verde indica el lugar donde se midió con OBS.*

de una tormenta severa que mezcla las aguas, aunque los especímenes marinos dominan en este caso. Como consecuencia, la profundidad a la cual estos organismos permanecen sugiere la conveniencia de ocupar lugares tranquilos alejados de las corrientes intensas. Este fenómeno fue documentado para otros ambientes, entre otros, por Gomes *et al.* <sup>(26)</sup>.

La tendencia del plancton a agregarse sobre la margen NE de la zona portuaria es consecuencia de las corrientes generadas durante el reflujó y de la particular morfología del ERQG. De acuerdo a las mediciones de velocidad, la margen curvada del meandro que conecta la parte poco profunda con la zona portuaria genera, durante el reflujó, una corriente importante sobre la margen NO del puerto. Los sedimentos de mayor tamaño decantan rápidamente en la zona cercana al escalón sobre esa margen. Las corrientes sobre la margen NE presentan velocidades menores y no reciben un flujo apreciable de sedimentos (Figs. 5 y 6) por lo que las condiciones parecen, entonces, ser más apropiadas para que los organismos se desarrollen.

El zooplancton se encuentra disperso en toda el área portuaria durante el reflujó y concentrado al pie del escalón durante la fase de inundación, de acuerdo a la distribución de los valores medios de  $S_A$ . Los lugares donde los sólidos suspendidos decantan y el zooplancton se concentra no parecen depender de las condiciones meteorológicas. Aun cuando una tormenta mezcle las aguas de mar y río y las corrientes se intensifiquen cuando la marea tiene una amplitud mayor que la normal, los procesos hidrodinámicos subyacentes y sus consecuencias sobre la distribución del zooplancton parecen ser los mismos.

Por otra parte, a pesar de que la estratificación estuarial puede determinarse a partir de las mediciones efectuadas con CTD, la distribución de la intensidad del *backscatter* obtenido con un ecosonda también provee información adicional útil. En efecto, los pequeños organismos suelen ser susceptibles a ínfimos cambios de salinidad o temperatura. En esta situación, una interfase casi imperceptible para el CTD pero donde el zooplancton es afectado, es marcada en forma evidente en los ecogramas.

## V. CONCLUSIONES

La interpretación física de las mediciones efectuadas con equipos de alta resolución espacio-temporal, permitió asociar las características hidrodinámicas de los últimos kilómetros del ERQG con la presencia distintiva de material biológico. La obtención de registros acústicos complementados con muestreos de agua y mediciones en puntos fijos mostraron que el zooplancton tiende a ubicarse en sitios y profundidades específicos determinados por la circulación estuarial. Las agregaciones tienen tamaño suficiente para contribuir como blancos acústicos, son advectadas por las corrientes y no sedimentan como las partículas inorgánicas. Además, el mezclado o los flujos

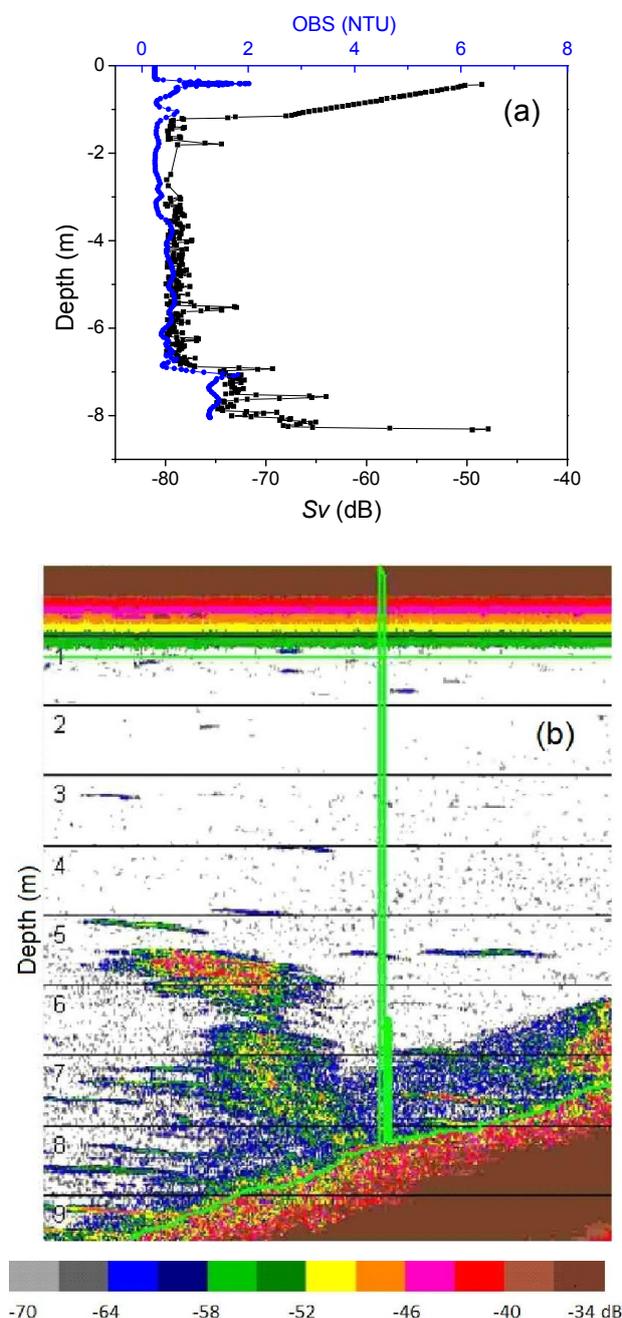


Figura 7: (a) Correlación entre *backscatter* acústico (puntos

convectivos pueden variar su concentración, pero no cambiar sustancialmente su cantidad total durante un tiempo del orden de un ciclo mareal.

Las corrientes principales, generadas por los movimientos mareales y la descarga del río, ocurren a lo largo del estuario. Ni la rotación terrestre ni las corrientes transversales parecen afectar la hidrodinámica debido a su tamaño reducido. Si bien es común reportar resultados de mediciones efectuadas a lo largo de un eje equidistante de las márgenes del ERQG, se muestra aquí que las distribuciones asimétricas de los organismos planctónicos y del transporte de sedimentos son debidas a una distribución de velocidad que requiere una descripción más compleja.

Los resultados obtenidos pueden integrarse a otras mediciones y observaciones para mejorar la comprensión de los procesos físicos presentes y de la evolución de los sistemas estuarinos en general, con el objeto de establecer el manejo integral y sustentable de los recursos asociados.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación fue subsidiada por proyectos de la ANPCyT y el CONICET, Argentina. Los autores agradecen a Adrián Madirolas, Ariel G. Cabreira y Ricardo Szupiany por sus contribuciones en los trabajos de campo y procesamiento de la información.

## VI. REFERENCIAS

- 1 – Rosenberg, R. *Mar. Pollut. Bull.*, **8**, 102–104 (1977).
- 2 – Lewis, M.A., D.E. Weber, R.S. Stanley y J.C. Moore. *Environ. Pollut.*, **115**, 161–171 (2001).
- 3 – De Jong, V.N. y D.J. De Jong. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **55**, 969–991 (2002).
- 4 – Bale, A.J., R.J. Uncles, A. Villena-Lincoln y J. Widdows. *Hydrobiologia*, **588**, 83-95 (2007).
- 5 – Boucher, J., F. Ibanez y L. Prieur. *J. Mar. Res.*, **45**, 113-173 (1987).
- 6 – Sabates, A. y M.P. Olivari. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **135**, 11-20 (1996).
- 7 – Molinero, J.C., F. Ibanez, S. Souissi, E. Bosc y P. Nival. *J. Mar. Sys.*, **69**, 271-282 (2008).
- 8 – Cabreira, A.G., A. Madirolas, G. Alvarez Colombo, E.M. Acha y H.W. Mianzan. *ICES J. Mar. Sci.*, **63**, 1718-1725 (2006).
- 9 – Madirolas, A., E.M. Acha, R.A. Guerrero y C. Lasta. *Sci. Mar.*, **61**, 431-438 (1997).
- 10 – Pereyra, M.G. “Hidrodinámica de un estuario antropogénicamente modificado: El caso del estuario del río Quequén Grande”. Tesis Doctoral. UNCPBA, Tandil (2013).
- 11 – Warren, J.D. y P.H. Wiebe. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, **65**, 1321-1333 (2008).
- 12 – Lavery, A.C., D. Chu y J.N. Moum. *ICES J. Mar. Sci.*, **67**, 379-394 (2010).
- 13 – Seuront, L., F. Schmitt y Y. Lagadeuc. *Deep-Sea Res. Pt. I*, **48**, 1199-1215 (2001).
- 14 – Haury, L.R., J.A. McGowan y P.H. Wiebe. In: “Spatial Pattern in Plankton Communities”, Steele J.H. (Ed). Plenum, New York, pp. 277–327 (1978).
- 15 – Foote, K.G., H.P. Knudsen, G. Vestnes, D.N. MacLennan y E.J. Simmonds. *ICES Cooperative Research Report N° 144*, 69 pp. (1987).
- 16 – Stanton, T.K., D. Chu y D.B. Reeder. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **29**, 260-268 (2004).
- 17 – Ressler, P.H. *Deep-Sea Res. Pt. I*, **49**, 2035-2051 (2002).
- 18 – Teledyne RD Instruments, WinRiver II Quick Start Guide. P/N 957-6230-00 [http://www.rdinstruments.com/smartlink/wr/support\\_docs/WINRIV2QS.PDF](http://www.rdinstruments.com/smartlink/wr/support_docs/WINRIV2QS.PDF) (2007).
- 19 – Thorne, P.D. y R. Meral. *Continent. Shelf Res.*, **28**, 309–317 (2008).
- 20 – Thorne, P.D. y D.M. Hanes. *Continent. Shelf Res.*, **22**, 603–632 (2002).
- 21 – Downing, J. *Continent. Shelf Res.*, **26**, 2299–2318 (2006).
- 22 – Hoyal, D.C.J.D., M.I. Bursik y J.F. Atkinson. *J. Geophys. Research*, **104**, 7953-7966 (1999).
- 23 – McCool, W.W. y J.D. Parsons. *Continental Shelf Research*, **24**, 1129-1142 (2004).
- 24 – Fong, D.A. y W.R. Geyer. *J. Geophys. Res.*, **106**(C1): 1067–1084 (2001).
- 25 – Hetland, R.D. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 1667-1688 (2005).
- 26 – Gomes, C.L., A. Marazzo y J.L. Valentin. *Crustaceana*, **77**, 941-954 (2004).