

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ESTUARIO DEL RÍO SANTA CRUZ CON FINES AMBIENTALES

Paula Consoli-Lizzi, Federico Zabaleta, Sergio Liscia

UIDET Hidromecánica - Facultad Ingeniería - UNLP.
Calle 47 N° 200, La Plata (CP1900), Argentina - paula_consoli@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El río Santa Cruz nace en el Lago Argentino, que recibe aportes de origen principalmente glaciario y nival, y cruza la meseta patagónica de Oeste a Este. En la actualidad se encuentran en etapa de construcción sobre su traza los aprovechamientos hidroeléctricos Cónдор Cliff y La Barrancosa, que se prevé generen 3280 y 1900 GWh/año respectivamente. Es de público conocimiento que el proyecto de los mismos ha sido desarrollado atendiendo a consideraciones ambientales, y que en atención a las mismas su ejecución ha sido motivo de debates sociales e intervención judicial.

El río Santa Cruz recorre 350 km antes de desembocar en el Mar Argentino. En su último tramo se origina una zona de transición que exhibe una combinación de características fluviales y marinas, generando un ambiente conocido como estuario del río Santa Cruz. El mismo constituye un ecosistema único y acoge una variedad de especies, entre las cuales es de destacar el Macá Tobiano, un ave endémica en peligro de extinción.



Figura 1. Imagen satelital del estuario durante pleamar (derecha) y durante bajamar (izquierda). Se han indicado algunos sitios de interés.

En la Figura 1 se presenta el área de interés, donde la comparación de los niveles observados en pleamar y bajamar evidencia que los parámetros físicos del estuario están gobernados no sólo por los aportes fluviales sino también por las mareas de gran amplitud existentes en esas latitudes. Los aportes fluviales comprenden el río Santa Cruz y el río Chico, cuyos caudales módulos son de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ y $15 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Dado que durante el llenado de las presas se prevé una modificación del hidrograma del río, es de esperar que con ello cambien temporalmente los campos de velocidades, salinidad y temperaturas y el tiempo de residencia del estuario.

El objetivo de este trabajo es caracterizar el comportamiento del estuario del río Santa Cruz, para lo cual se plantea como herramienta el desarrollo de un modelo numérico del mismo. Las variables a modelar comprenden inicialmente niveles, campos de velocidades y salinidad, si bien se espera extender el modelo para representar la dinámica de temperaturas, sedimentos y nutrientes. Con el mismo, se abordan dos grupos de escenarios: la situación actual sin intervención, que permite comprender el sistema y calibrar el modelo en base a mediciones en campo, y la modelación ante escenarios de llenado, cuya finalidad es valorar el impacto sobre los parámetros físicos de la ría. Como fin último, la comparación de ambas situaciones provee una herramienta para que los tomadores de decisiones

identifiquen el hidrograma de llenado más deseable a partir de la evaluación de las afectaciones de las diversas alternativas sobre la salinidad.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo, calibración y validación de un modelo numérico requiere en primera instancia de relevamientos y mediciones en campo. Considerando que a excepción de registros de aforos líquidos, la información previa era escasa, como parte del proyecto de las presas ha sido necesario colaborar en el diseño de campañas que permitan interpretar y cuantificar el funcionamiento del estuario. Entre las observaciones efectuadas en los últimos años, se incluyen mediciones de niveles durante el pasaje de ondas de marea, transectas de velocidad, aforos líquidos, caracterización del lecho, topobatimetrías, mediciones continuas (niveles, velocidades, salinidad, temperatura del agua y turbidez) y muestreos puntuales de agua (para determinación de sólidos suspendidos y nutrientes). En particular, los registros continuos con los que se cuenta corresponden a Isla Pavón y Punta Quilla, donde predominan los efectos del régimen fluvial y marino respectivamente, mientras que los muestreos puntuales de Puente Viejo, Isla Pavón y río Chico aportan información sobre los parámetros fluviales. Asimismo, desde el año 2018 ha comenzado a operar una estación hidrometeorológica como parte de la red de monitoreo integral de la cuenca, que aporta información de temperaturas, vientos, precipitaciones, radiación y humedad relativa, los cuales influyen en la evolución de algunos de los parámetros monitoreados.

La información disponible reveló algunas generalidades que han sido tenidas en cuenta al seleccionar el modelo a emplear. El alcance de la onda de marea hasta Puente Viejo (ex RN3) delimitó el área de estudio. La distribución uniforme en la vertical de salinidad y temperaturas producto del mezclado debido a la gran amplitud de mareas determinó que un modelo 2D es representativo de la dinámica del sistema. La salinidad, principal determinante del ambiente en que se desarrolla la biota, responde a dos forzantes principales: evoluciona en su valor medio a lo largo del régimen hidrológico del río Santa Cruz, y exhibe una variación semidiurna de mayor magnitud a causa del régimen de mareas.

Atendiendo a las características del sistema, el software seleccionado para desarrollar el modelo del estuario es el Delft3D, desarrollado por Delft University of Technology de Holanda. Delft3D está compuesto por una serie de módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, de transporte de sólidos, de calidad de agua y de transporte de sustancias en general, entre otros. Para este estudio se aplicó el módulo D-Flow que permite calcular las variables hidrodinámicas (velocidad, presión, turbulencia), además de calcular el intercambio de temperatura y salinidad. El módulo hidrodinámico está basado en la simplificación de aguas poco profundas para las ecuaciones de Navier-Stokes, y permite incorporar los efectos de mareas, vientos, gradientes de salinidad y temperatura, olas, turbulencia y secado y mojado.

En cuanto a la implementación del modelo en sí, se ha generado un mallado consistente en dos grillas estructuradas ensambladas. La primera representa al río Santa Cruz hasta antes de la confluencia con el Río Chico y posee 52128 elementos, con un total de 37 celdas en el ancho del río (siendo éste de unos 200 m, cada una representa unos cinco metros de lado en campo). La segunda grilla abarca toda la zona del estuario y el mar abierto mediante 20608 elementos, con 58 celdas en el ancho, que corresponden a una discretización de unos 50 metros en la boca del estuario, que presenta 3 km de ancho.

Los contornos abiertos (agua-agua) se han impuesto alejados del área bajo estudio. En cuanto a los ríos, se ha extendido el dominio hasta secciones exentas de influencias de mareas, imponiendo salinidad nula y caudales según hidrogramas históricos o propuestos para el llenado. Asimismo, la grilla se ha extendido en el mar en un radio de 40 km desde la boca del estuario, imponiendo una condición de niveles originados por mareas astronómicas y salinidad propia del mar.

La calibración del modelo se ha efectuado contrastando las salidas del mismo con mediciones de niveles, velocidades y perfiles de salinidad, ajustando sucesivamente el tamaño de celdas, la interpolación de la batimetría y la rugosidad del cauce.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal como se ha indicado, los resultados del modelo abarcan en una primera etapa el estudio de la situación de base, y en segundo lugar la evaluación de los efectos del llenado.

La primera instancia es de interés considerando que el modelo es capaz de reproducir la gran variabilidad espacial y temporal de los parámetros en toda la extensión del dominio y reproducirla para eventos ya ocurridos, monitorización que no es viable en campo, donde sólo es posible seguir la evolución de las variables en sitios o momentos puntuales.

Los resultados evidencian que el comportamiento hidrodinámico del estuario es el resultado de tres forzantes principales, siendo preponderante el efecto de las mareas semidiurnas por sobre los caudales de los ríos Santa Cruz y Chico. La amplitud de la variación de los niveles del mar debido a las mareas astronómicas es de entre 4.00 m y 12.50 m, lo que resulta en variaciones de gran magnitud de los distintos parámetros hidráulicos. Dos veces por día extensas playas se sumergen y se exponen al aire libre. En la mayor parte del estuario velocidades y niveles quedan determinados casi en su totalidad por las mareas, mientras que el efecto de los caudales de los ríos se empieza a evidenciar durante bajamar unos 12 km aguas arriba de la confluencia de los ríos.

La Figura 2 muestra que durante el flujo y reflujos de la marea se generan fuertes corrientes en todo el estuario, alcanzando velocidades de 2.5 m/s en su boca y valores de 2.0 m/s en los canales de mayor profundidad. Ello resulta en caudales de ingreso y egreso del orden de $100000 \text{ m}^3/\text{s}$ a través la boca del estuario, que disminuyen hacia el interior (ver Figura 3). Éstos son varios órdenes de magnitud superiores a los aportados por los ríos Santa Cruz y Chico, cuyos valores medios son $700 \text{ m}^3/\text{s}$ y $15 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

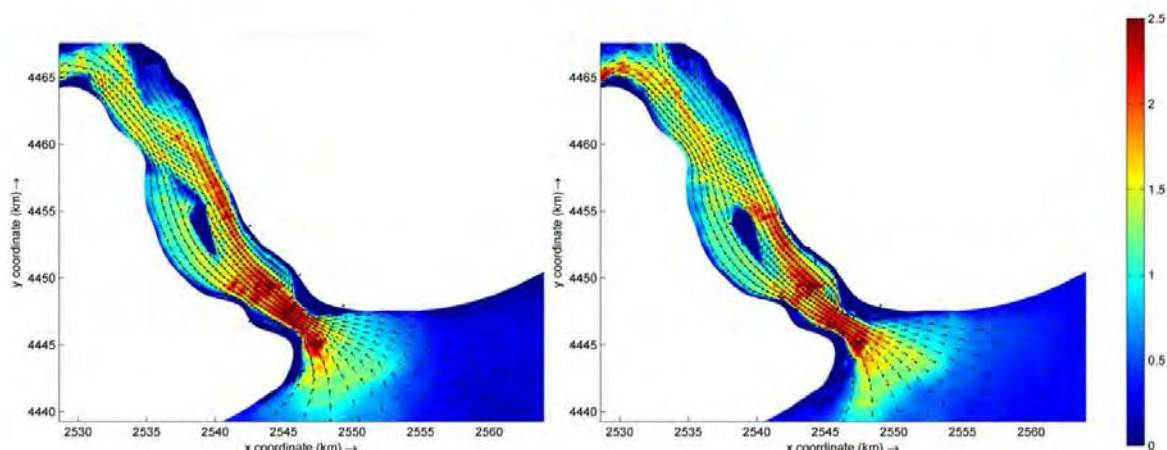


Figura 2. Velocidades instantáneas durante corrientes de flujo (izquierda) y reflujos (derecha). Magnitud de la velocidad expresada en m/s.

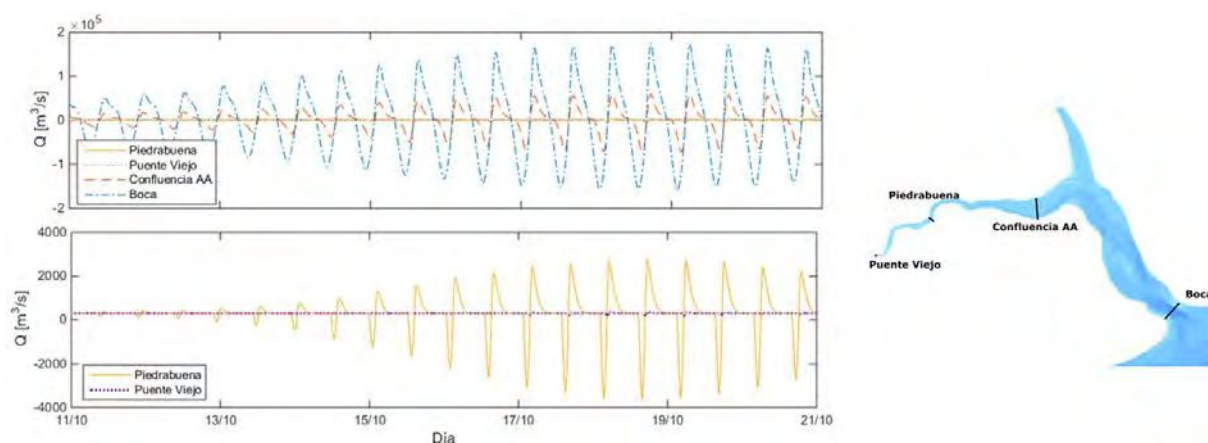


Figura 3. Evolución de caudales a lo largo de 5 días en cuatro secciones del área bajo estudio. El gráfico inferior muestra un detalle del superior, y las secciones consideradas se indican en el croquis de la derecha.

Estos resultados son consistentes con el tiempo de residencia en el estuario. El mismo ha sido calculado haciendo uso del modelo, aplicando diferentes metodologías basadas en el monitoreo de la evolución temporal del volumen de un trazador inerte tras un vertido puntual. Según se observa en la Figura 5, el tiempo de residencia es función del caudal del río Santa Cruz y se estima cercano a 19 días para un caudal del 300 m³/s y 13 días para un caudal de 1100 m³/s. A fin de mejorar la comprensión de los fenómenos de transporte en el estuario, también se ha utilizado el modelo para seguir la trayectoria de partículas trazadoras, permitiendo una visualización como la presentada en Figura 6: mientras que el avance neto de la misma antes de la confluencia de los ríos es relativamente rápido, a medida que avanza por el tramo final del estuario se ve sujeta a una deriva de avance y retroceso que retrasa su salida al mar.

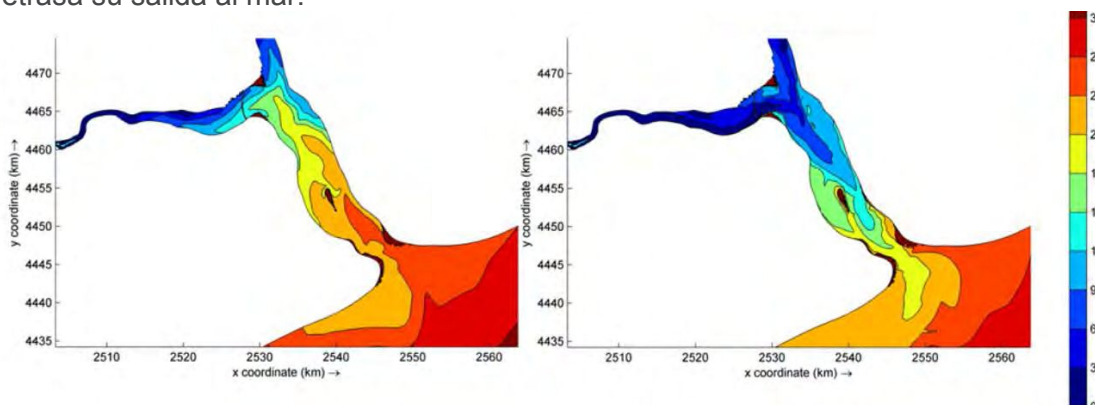


Figura 4. Distribución de salinidad durante pleamar (izquierda) y bajamar (derecha). Salinidad expresada en UPS

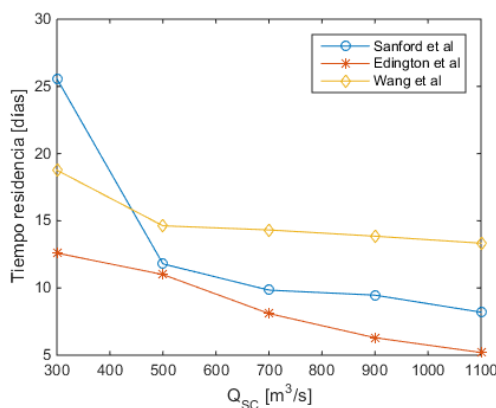


Figura 5. Tiempo de residencia en el estuario en función del caudal del río Santa Cruz, calculado siguiendo la metodología de diversos autores.

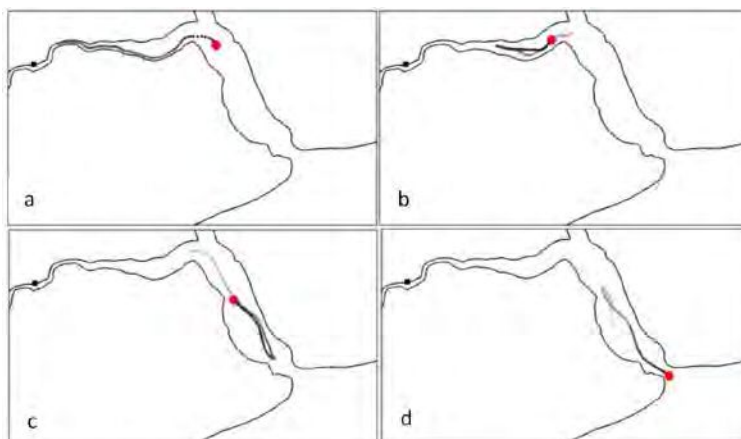


Figura 6. Ejemplo de la trayectoria de una partícula liberada en Piedrabuena hasta su salida del estuario. La línea en escala de grises tras la partícula indica la trayectoria previa, siendo más oscura cuanto más reciente.

Como segundo objetivo del trabajo, considerando que la salinidad es determinante del hábitat en que se desarrolla la biota, ésta se ha definido como parámetro de cuantificación de afectaciones durante el llenado de los embalses. Se han planteado sucesivamente diferentes hidrogramas de llenado, incluyendo series de caudales basadas en criterios tales como mantener diariamente los caudales superados el 100% del tiempo en los registros históricos, reducir la afectación de la salinidad durante el período de internada del Macá Tobiano, o respetar el caudal mínimo ecológico calculado para el río Santa Cruz por expertos de la Universidad de Valladolid (ver hidrogramas de Figura 8). Para estos hidrogramas se ha caracterizado la evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario, comparándola con la situación inalterada de años medios e hídricamente pobres. Teniendo en cuenta que además de variar el hidrograma del río existen fluctuaciones semidiurnas de los niveles, los resultados se han reportado a través de percentiles.

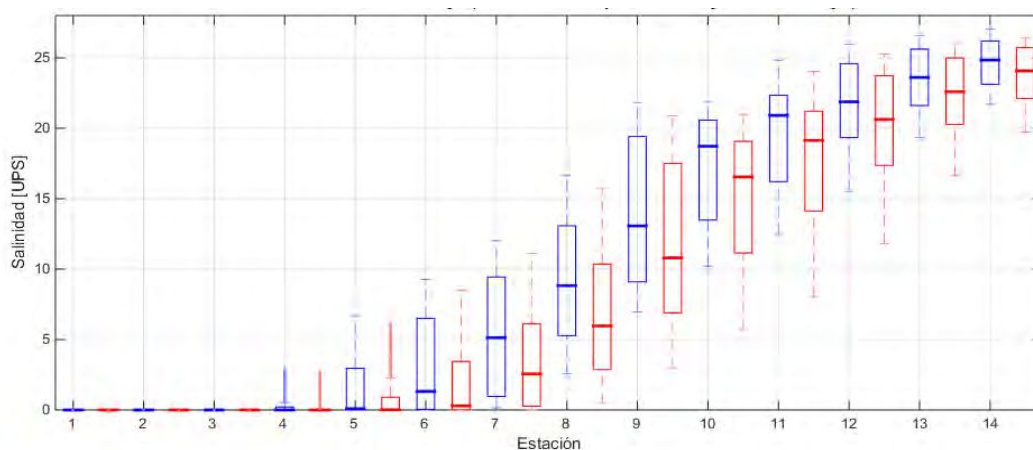


Figura 7. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la salinidad durante un escenario de llenado para el mes de mayo (rojo) y su contraste con la situación sin intervención en septiembre (azul).

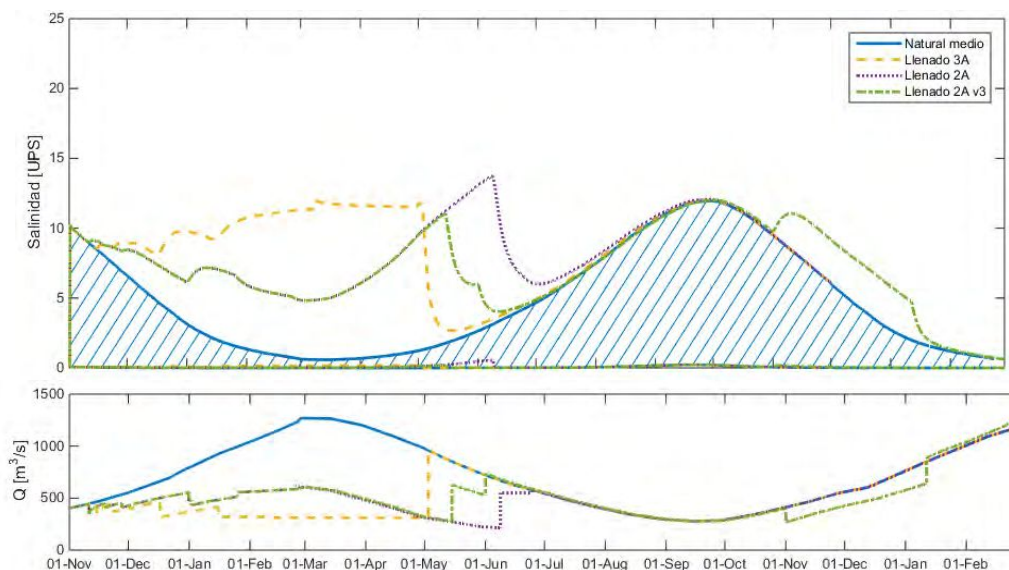


Figura 8. Comparación de la evolución de la salinidad en un año medio y durante diferentes escenarios de llenado, en un punto fijo ubicado 5 km aguas arriba de la confluencia de los ríos. El gráfico inferior presenta los hidrogramas de aportes del río Santa Cruz al estuario en cada escenario.

En el ejemplo de la Figura 7, las cajas delimitan los percentiles 25 y 75 para estaciones ubicadas desde aguas arriba hacia aguas abajo (estación 1 en Puente Viejo y 14 en el mar). Al comparar el mes de mayor afectación de la salinidad de un escenario particular (mayo) con el de mayor afectación (septiembre, mes de mínimo caudal medio mensual en un año medio), se aprecia que la propuesta no genera condiciones de salinidad que superen a las que suelen ocurrir naturalmente. Por otra parte, una comparación de varios escenarios se ofrece en la Figura 8, donde para una estación fija se presenta la evolución temporal de la salinidad, delimitando con líneas envolventes el rango de variación semidiurna.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo numérico del estuario del río Santa Cruz utilizando el software Delft 3D. Haciendo uso de datos medidos en campo, se ha calibrado el mismo, de manera que es representativo de la hidrodinámica y procesos de transporte. Los resultados más relevantes se han presentado en forma de mapas espaciales, series temporales que describen niveles, velocidades y salinidad, y han permitido el cálculo del tiempo de residencia, de manera que se ha profundizado la comprensión del funcionamiento del sistema en su situación actual. A continuación, se ha cuantificado la afectación de la salinidad ante diferentes escenarios de llenado de las presas, generando una herramienta para que los expertos puedan seleccionar un hidrograma de llenado contemplando no sólo la generación de energía, como es práctica habitual, sino atendiendo también consideraciones ambientales.

Actualmente se está trabajando en integrar la información de la nueva red hidrometeorológica para calibrar la modelación de temperatura del agua, y se avanza en la extensión del modelo para estudiar transporte de sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Perillo, G. (1995). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Bahía Blanca: ELSEVIER.
- Garvine, R., McCarthy, R., & Wong, K.-C. (1991). The Axial Salinity Distribution in the Desaware Estuary and its Weak Response to River Discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Wang, C.-F., Hsu, M.-H., & Kuo, A. (2004). Residence time of the Danshuei River estuary,

Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Deltares. (2014). *Delft3D-Flow, User Manual v.3.15.34158*.

Dukhovskoy, S. M. (2012). Analysis methods for characterizing salinity variability from multivariate time series applied to the Apalachicola Bay estuary. *Journal of atmospheric and ocean technology*, 29, 613-628.

Edinger J.E., B. E. (1998). Modelling flushing and mixing in a deep estuary. *Water, Air, and Soil Pollution* 102, 345–353.

Inspección Universidad Nacional de La Plata (2018). *Estudio, caracterización y evaluación del impacto de las represas Cóndor Cliff y La Barrancosa en el estuario del río Santa Cruz*.

Ezcurra & Schmidt S.A. (2018). *Modelación hidrodinámica, dispersión y transporte de sedimentos. Estuario del Río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz*.