

## MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE EXPERIMENTO CON TRAZADORES EN LAGUNA DEL PLATA, CORDOBA, ARGENTINA

Corral M. \*, Pozzi C. \*, Plencovich G. \*, Hillman G. \*, Pagot M. \*, Rodríguez A. \*, Oroná C. \*

\* *Inst. Sup. de Rec. Hidricos y Laboratorio de Hidráulica*  
*Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*  
*Dirección: Av. Hipólito Irigoyen 162, CP: 5000. Córdoba, Argentina.*  
*Teléfono (Fax): 54 351 433-4446. E-mail: mcorral@com.uncor.edu*

**Palabras Clave:** hidrodinámica, Laguna del Plata, COHERENS.

**Resumen.** *La laguna de Mar Chiquita es el mayor sistema endorreico salado de América del Sur, declarado "humedal de importancia internacional" por la convención RAMSAR debido a su gran biodiversidad ecológica (Hillman, 2003). Los principales agentes hidrodinámicos actuantes en el sistema son los factores meteorológicos como el viento y en menor medida los fenómenos fluviales, a través del régimen de crecidas. Debido a sus características geométricas (120 Km en dirección E-O y 100 Km en dirección N-S, con una profundidad media de 8 m), la acción del viento puede llegar a ser dominante en la circulación y el intercambio de masas de agua. En la zona Sur-Oeste de la Mar Chiquita se encuentra la Laguna del Plata conectada mediante un canal a la laguna en períodos secos, mientras que en períodos húmedos se transforma en una bahía. En 1970 la Laguna del Plata y Mar Chiquita, no tenían conexión hidrológica, y existían significativas diferencias en términos de salinidad. En períodos posteriores mientras la salinidad del agua en Mar Chiquita se incrementó, el Río Primero, tuvo un efecto diluyente en la relativamente pequeña Laguna del Plata (UNC, 1998). En este trabajo se han realizado simulaciones hidrodinámicas con el modelo 3D COHERENS, para caracterizar la circulación en la Laguna del Plata y la influencia de la Mar Chiquita como condición de borde de esta bahía. En primer lugar se presentan los resultados asociados a un escenario con un eventual ingreso de una crecida de agua dulce proveniente del Río Suquia, para observar la dilución que provoca este tributario en la laguna. Además se ha simulado el ingreso de agua salada desde la Mar Chiquita, debido a un temporal típico de viento N y NE, comparada con las mediciones con trazadores realizadas en la campaña de monitoreo.*

## 1 INTRODUCCIÓN

La laguna de Mar Chiquita o Mar de Ansenusa (Figura 1), es el sistema endorreico más importante de la República Argentina con una extensión de aproximadamente 6000 km<sup>2</sup>. El sistema hidrológico constituido por la Laguna de Mar Chiquita y los Bañados del Río Dulce constituyen el más complejo y mayor sistema cerrado de lago salado de América del Sur, declarado “humedal de importancia internacional” por la convención RAMSAR debido a su gran biodiversidad ecológica (Hillman, 2003). Sin embargo a pesar de su importancia, su grado de estudio o nivel de conocimiento es muy inferior al compararlo a la Laguna de los Patos (Reati *et al.*, 1997).

La profundidad de la Laguna de Mar Chiquita (alrededor de 8 m) tiene marcadas variaciones, dependiendo fundamentalmente del caudal del río Dulce y de los demás tributarios en menor proporción (Ríos Suquía y Xanaes), como así también de los procesos de precipitación y evaporación en el espejo de agua (Hillman, 2003; Pagot, 2003).

Los principales agentes hidrodinámicos actuantes en el sistema son los fenómenos fluviales, a través del régimen de crecidas y los factores meteorológicos como el viento. Debido a la geometría de la laguna (120 Km en dirección E-O y 100 Km en dirección N-S, con una profundidad media de 8 m) la acción del viento puede llegar a ser dominante en la circulación y el intercambio de masas de agua.

Los vientos predominantes son del Norte (16,4%) seguidos por la dirección Sudeste (16,0%), con intensidades observadas de hasta 70 km/h que generan una sobreelevación o “setup” cercana a 1 m (UNC-LH, 2003). El viento tiene una influencia notable en las variaciones de nivel de la laguna, haciendo descender la cota en las costas de Miramar para vientos del N, NE o NO, siendo frecuentes oscilaciones (wind setup o marea meteorológica) de medio metro, de acuerdo a los trabajos más recientes (UNC-LH, 2003).

El contenido de sales de la laguna sufre grandes variaciones espaciales y temporales, asociadas a las condiciones meteorológicas que se dan a lo largo del área de aporte. En particular ocurren procesos de estratificación salina en la desembocadura de los tributarios de agua dulce, que hacen que la hidrodinámica se torne más compleja por la mezcla de masas de agua de diferente densidad.

Es importante destacar que en la zona Sur-Oeste de la Mar Chiquita se encuentra la Laguna del Plata conectada mediante un canal a la laguna en períodos secos, mientras que en períodos húmedos se transforma en una bahía. En 1970 la Laguna del Plata y Mar Chiquita, no tenían conexión hidrológica, y existían significativas diferencias en términos de salinidad. En períodos posteriores mientras la salinidad del agua en Mar Chiquita se incrementó, el Río Primero, tuvo un efecto diluyente en la relativamente pequeña Laguna del Plata (UNC, 1998).

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados numéricos obtenidos con el modelo tridimensional COHERENS (Luyten *et al.*, 1999) de dos escenarios típicos y mediciones de salinidad durante una campaña de monitoreo. El primer escenario ha sido un eventual ingreso de una crecida de agua dulce proveniente del Río Suquía, para observar la dilución que provoca este tributario en la laguna, mientras que el segundo es el ingreso de agua salada desde la Mar Chiquita debido a un temporal típico de viento N y NE, en el cual se

han medido en campaña trayectorias del flujo con trazadores lagrangianos y parámetros de calidad del agua.

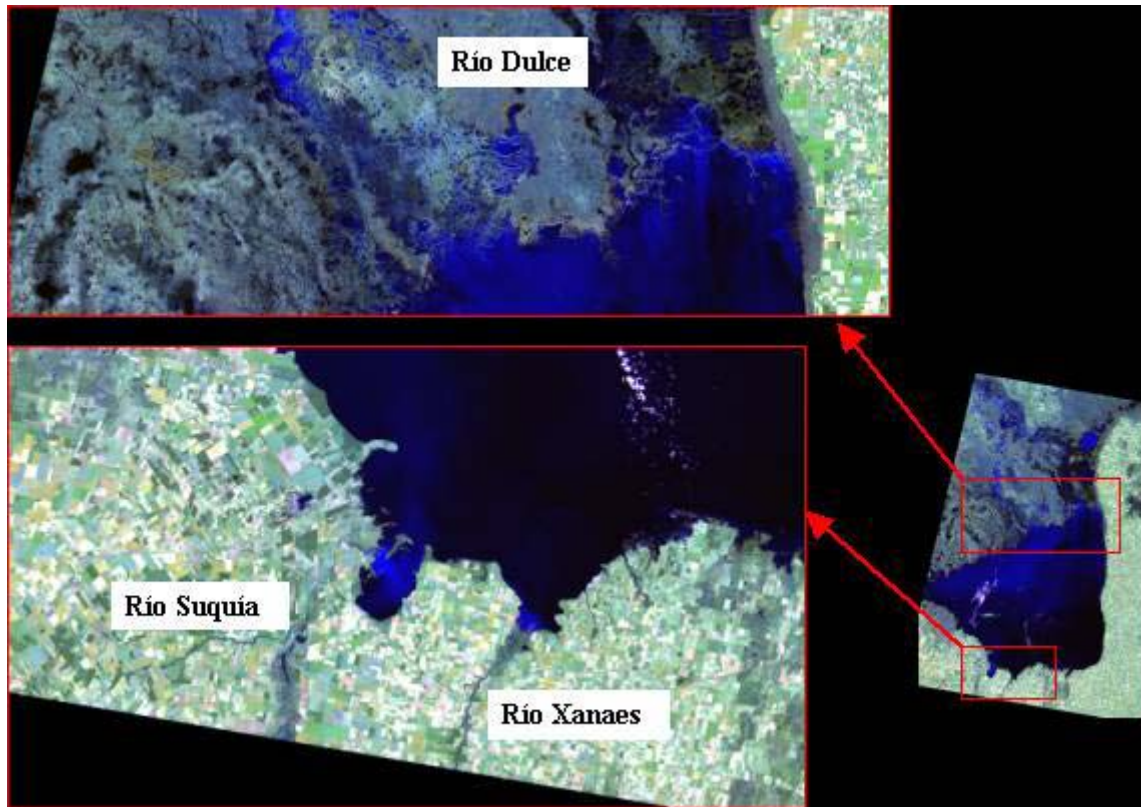


Figura 1: Laguna Mar Chiquita (derecha) y tributarios principales (izquierda)

## 2 METODOLOGÍA

Para la simulación numérica se ha empleado el modelo numérico tridimensional COHERENS, desarrollado para costas y plataformas marinas. El mismo se compone de un módulo hidrodinámico, que se puede acoplar al módulo biológico y de contaminación para resolver procesos estacionales y de mesoescala. El código fuente ha sido desarrollado en el período 1990-1998 por un grupo multinacional como parte del proyecto MAST de la Unión Europea.

Durante las últimas décadas una serie de modelos tridimensionales para costas y plataformas han sido desarrollados por diversas instituciones de investigación (Nihoul y Jamart, 1987; Dyke y Daviesm, 1992 y Lynch y Davies, 1995). Entre las principales ventajas del modelo COHERENS se destaca que utiliza la técnica “mode-splitting” para resolver la ecuación de momentum 2-D y 3-D como en el Princeton Ocean Model (POM). Además se dispone de diversos esquemas para la turbulencia que varían desde simples expresiones

algebraicas de una o dos ecuaciones de energía turbulenta (Mellor, 1998) hasta modelos k- $\epsilon$ .

El modelo COHERENS por ejemplo ha sido aplicado para el estudio de la intrusión de la cuña salina en el Río de La Plata (Destuynder, 2002).

Para computar la trayectoria de los trazadores se ha elaborado una rutina en *Matlab* denominada *traza* que toma los vectores velocidad obtenidos con COHERENS y calcula el cambio de posición en x e y para cada instante de tiempo.

### 3 SUPOSICIONES

En la modelación específica de la Laguna del Plata, de dimensiones 5 Km en dirección NW-SE y 9 Km en dirección SW-NE) se ha utilizado una grilla rectangular de 91 x 91 celdas con una resolución horizontal de 100 m x 100 m y vertical de 10 capas.

La grilla representa la laguna del Plata, la desembocadura del Río Primero y la interconexión con la laguna de Mar Chiquita. En la Figura 2 se presenta una imagen satelital que muestra el dominio seleccionado para este análisis.

El paso de tiempo para el modo barotrópico ha sido de 2,5 seg, mientras que para el baroclínico de 4,17 minutos, respetando la condición de Courant-Friedrichs-Levy. Para la turbulencia se ha adoptado un esquema de una ecuación, mientras que para la advección de momento se ha utilizado el esquema “upwind”.



Figura 2: Laguna del Plata y su conexión con la Mar Chiquita



A continuación se presentan los escenarios representados.

### 3.1 Escenario 1: Ingreso de agua dulce desde Río Suquía

El escenario 1 consiste en un eventual ingreso de una crecida de agua dulce proveniente del Río Suquía, para observar la dilución que provoca este tributario en la laguna. Para esto se han realizado simulaciones hidrodinámicas del ingreso de la pluma de agua dulce a la laguna del Plata, la cual posee aguas salobres con concentraciones que superan la del mar 40 PSU (ver tabla de mediciones).

Las estaciones han sido elegidas teniendo en cuenta la morfología del cuerpo de agua, sobre la base de una imagen satelital. Las estaciones comprenden dos secciones en el Río Suquía, cuatro puntos dentro de la Laguna del Plata y uno en la laguna Mar Chiquita, en la zona de la desembocadura de la laguna del Plata (Figura 3).



Figura 3: Ubicación de los puntos de monitoreo sobre Imagen Satelital LANDSAT 7.

En los puntos ubicados en el río se tomaron muestras para su posterior análisis en laboratorio y se realizó el aforo para determinar el aporte. Dentro de la Laguna del Plata y en la Mar Chiquita, se realizó la medición de parámetros in situ con una sonda multiparamétrica y se tomaron muestras para su análisis en laboratorio.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados correspondientes a los puntos de muestreo.

Se ha realizado el análisis de varios parámetros químicos como: Nitratos, Fósforo Total, pH, Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Hierro, Conductividad, Salinidad, Sólidos Disueltos Totales, Material en Suspensión y Turbiedad. En este trabajo sólo se presentan los resultados obtenidos para salinidad y material en suspensión.

FECHA	Punto	Salinidad	MES
		g/L ( $\sigma^t_{20}$ )	mg/L
12/10/2005	<b>RS1</b>	0.72	68.4
13/03/2006			205
12/10/2005	<b>RS2</b>	0.70	86.8
13/03/2006			238

Tabla 1: Análisis de muestras en Río Suquía

FECHA	Punto	Salinidad	MES
		g/L ( $\sigma^t_{20}$ )	mg/L
12/10/2005	<b>LP1</b>	31.41	46.3
13/03/2006			89.6
12/10/2005	<b>LP2S</b>	27.29	67.6
13/03/2006			72.6
12/10/2005	<b>LP2F</b>	32.07	82.6
13/03/2006			62
12/10/2005	<b>LP3</b>	31.63	80.6
13/03/2006			70.3
12/10/2005	<b>LP4S</b>	34.72	63
13/03/2006			91.3
12/10/2005	<b>LP4F</b>	34.50	120.6
13/03/2006			77.3
12/10/2005	<b>LMC</b>	35.54	133
13/03/2006			82.6

Tabla 2: Análisis de muestras en Laguna del Plata y Mar Chiquita

Las mediciones puntuales en la Laguna del Plata permiten observar que la salinidad es prácticamente uniforme, de características salobres y con una concentración similar a la de la Mar Chiquita .

Para caracterizar la descarga del Río Primero se han utilizado datos del relevamiento de la sección transversal, tirantes y velocidades. Si bien durante la campaña en mayo se registraron caudales típicos del período de estiaje del río, para la modelación hidrodinámica se ha supuesto que la sección se encuentra a cauce lleno, lo que resulta en un aporte estimado de 100 m<sup>3</sup>/s (Figura 4). Es importante mencionar que el agua del Río Suquía es “dulce” (ver Tabla 1) por lo que la salinidad se ha adoptado como cero en este tributario y que las velocidades han sido supuestas en régimen uniforme.

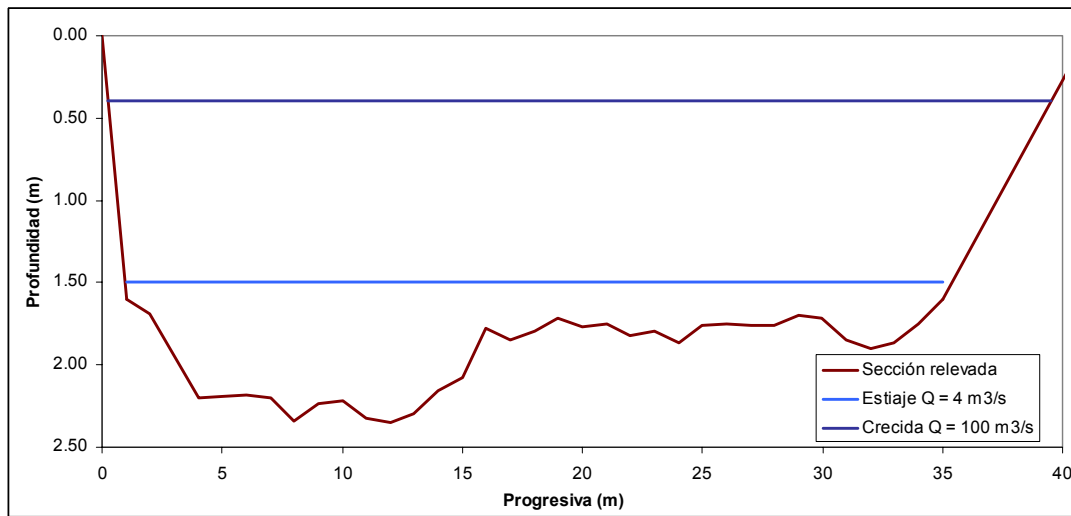


Figura 4: Sección transversal del Río Suquía para diferentes caudales

Como condiciones iniciales en la Laguna del Plata se ha supuesto que las velocidades iniciales en el sistema son nulas y que la salinidad es uniforme e igual a 40 PSU, basado en la homogeneidad de las mediciones que se presentan en la Tabla 2.

### 3.2 Escenario 2: Ingreso de agua salada desde Laguna de Mar Chiquita con trazadores

El escenario 2 consiste en el ingreso de agua salada desde la Mar Chiquita debido a un temporal típico de viento de dirección NE. La velocidad y dirección del viento han sido medidos con un anemómetro de mano (Tabla 3).

Velocidad	Valor (Km/h)	Valor (m/s)	Dirección
Mínima	9.0	2.5	NE
Máxima	15.0	4.2	NE
Media	10.0	2.8	NE

Tabla 3: Velocidad y dirección del viento durante campaña del 13 de marzo de 2006

Durante la campaña del 13 de marzo de 2006 se ha ingresado a la laguna con una embarcación para colocar los trazadores lagrangianos en sus posiciones iniciales, determinadas en función de imágenes satelitales y del objetivo propuesto para el muestreo. Particularmente se buscaba caracterizar la circulación superficial en la laguna y la posible trayectoria que podrían seguir los materiales en suspensión aportados por el Río Suquía, como sólidos que pueden llevar asociados nutrientes como fósforo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Escenario 1: Ingreso de agua dulce desde Río Suquía

Se presentan en la Figura 5 la elevación de la superficie del agua en el entorno del ingreso del Río Primero con el caudal estimado para crecida de 100 m<sup>3</sup>/s (condición típica de crecida). Tal como se observa la superficie del agua se eleva como máximo hasta 0,08 m y la influencia de la descarga afecta una extensión radial menor a 1 Km. Esto permite estimar que la descarga del Río Primero no tiene influencias importantes en la hidrodinámica del sistema y por lo tanto se necesitan condiciones de crecidas importantes para que este tributario se comporte como un agente forzante de la circulación en el sistema.

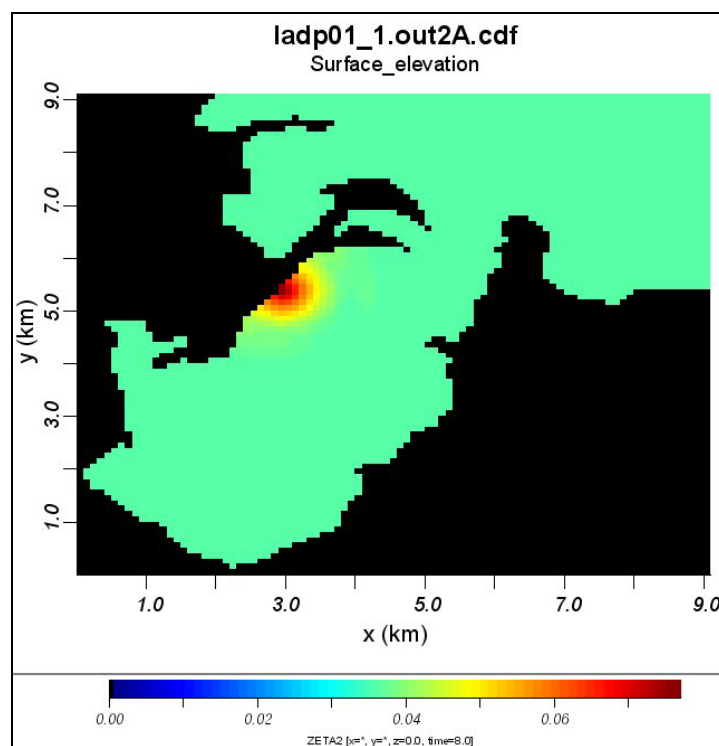


Figura 5: Nivel en la laguna del Plata con  $Q = 100$  m<sup>3</sup>/s

En la Figura 6 se presenta el campo de salinidad obtenido en la simulación. Se puede observar que el gradiente de salinidad y por lo tanto de densidad es abrupto en una extensión radial menor a 1,5 Km y que fuera de esta zona la salinidad es uniforme. A su vez el gradiente de salinidad se presenta en todas las capas verticales, por lo que se comporta como un frente uniforme en vertical que avanza hasta lograr la dilución total.

La figura permite estimar que bajo condiciones de crecidas, sólo una porción pequeña de un radio aproximado de 500 m conserva la salinidad por debajo de 10 PSU mientras que para caudales menores como el de estiaje (4 m<sup>3</sup>/s) esta zona se reduce considerablemente y



prácticamente la totalidad de la laguna se encuentra en condiciones salobres.

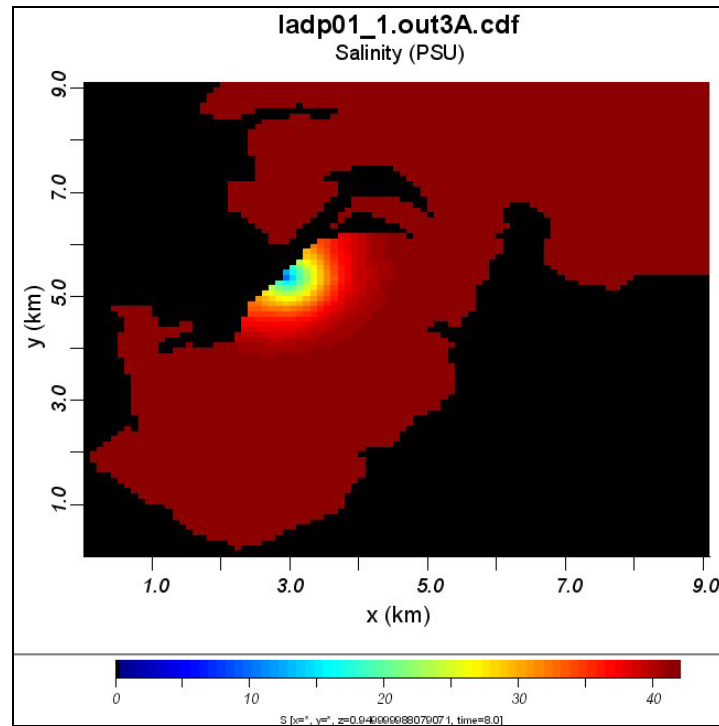


Figura 6: Simulación de salinidad en la laguna del Plata con  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.2 Escenario 2: Ingreso de agua salada desde Laguna de Mar Chiquita

En la Figura 7 se puede apreciar que la circulación superficial debida a viento constante del NorEste produce vectores prácticamente paralelos que se dirigen hacia el SurOeste, con mayor intensidad en las costas (velocidad aproximada de  $0,30 \text{ m/s}$ ) y menor en la franja central de la laguna (velocidad media de  $0,10 \text{ m/s}$ ). En la conexión de la laguna con la Mar Chiquita el flujo es entrante y con velocidades del orden de los  $0.35 \text{ m/s}$ . No se observan vórtices de gran escala en las simulaciones.

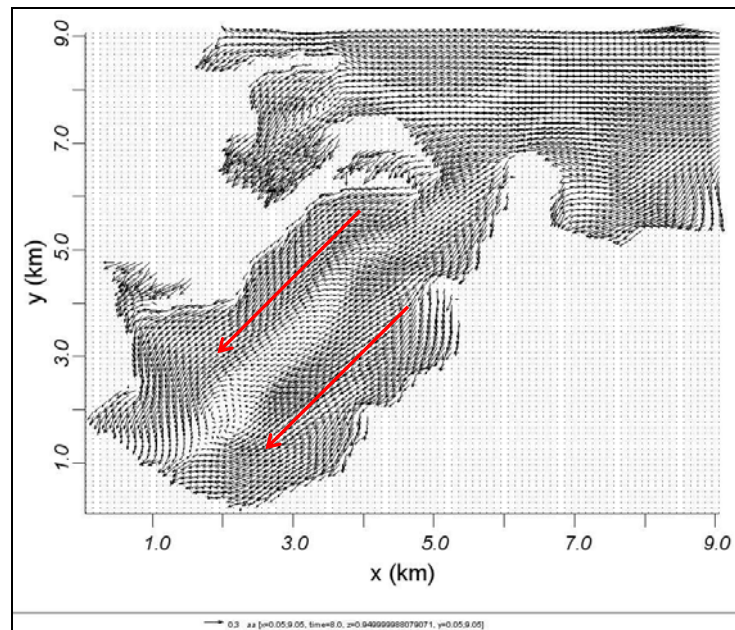


Figura 7: Velocidad en capa superficial (m/s) con viento NE de velocidad 2,8 m/s

Para la capa media (Figura 8) el sentido de circulación es diferente, si bien en las costas los vectores conservan la dirección SurOeste en el centro se han desarrollado vectores que se dirigen hacia el NorEste con velocidad media de 0,15 m/s. Además se desarrollan dos celdas de circulación de gran escala y de forma simétrica con respecto al eje longitudinal de la laguna, pero el superior gira en sentido antihorario y el inferior en sentido horario. En la conexión de la laguna con Mar Chiquita los vectores salen de la laguna a una velocidad media de 0,15 m/s, por lo que se invierte el perfil de distribución de velocidad en este sector.

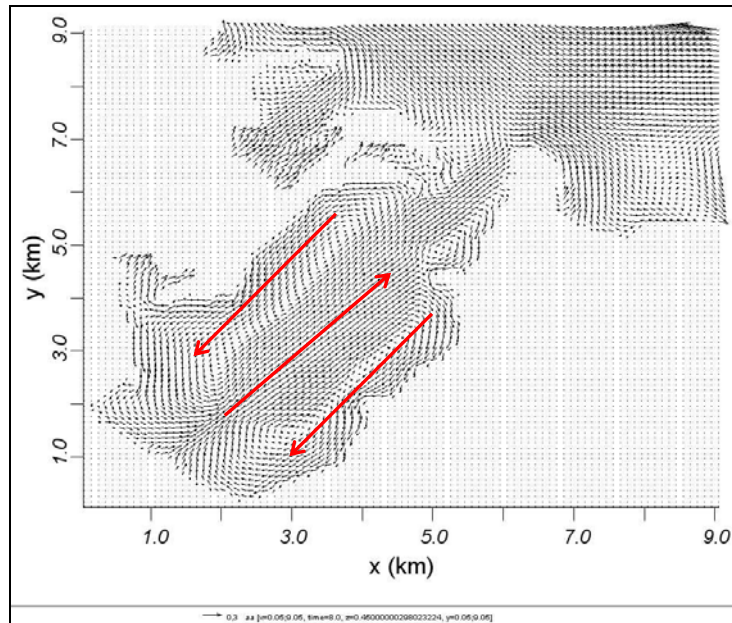


Figura 8: Velocidad en capa media (m/s) con viento NE de velocidad 2,8 m/s

En la capa de fondo si bien las velocidades son prácticamente nulas, se observa una situación similar a la capa media. Además se visualiza en la zona central una franca dirección de los vectores saliendo hacia la Mar Chiquita.

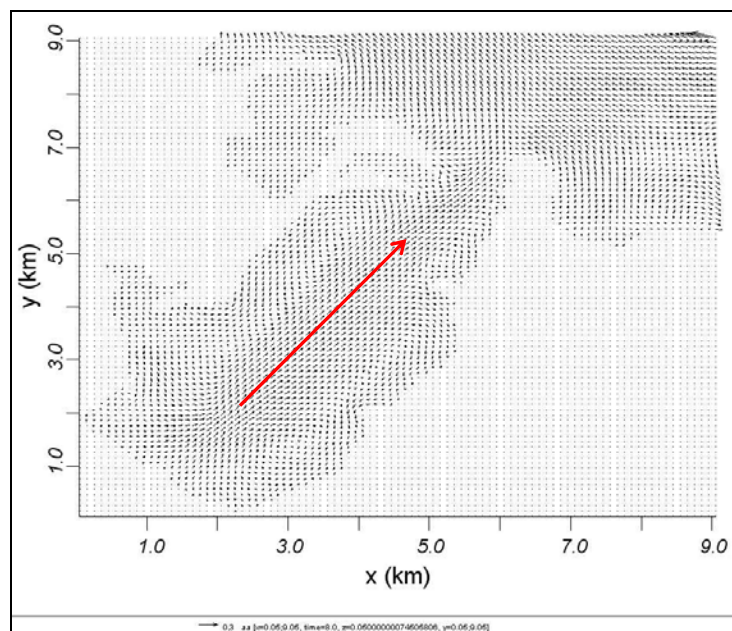


Figura 9: Velocidad en capa de fondo (m/s) con viento NE de velocidad 2,8 m/s

Con la rutina desarrollada para el cálculo de las trayectorias se han obtenido los resultados presentados en la Figura 10. En esta figura se grafica la posición inicial de los cinco trazadores, en color azul las trayectorias numéricas y en rojo las trayectorias medidas. Es importante mencionar que la duración del experimento ha sido de 8 hs.

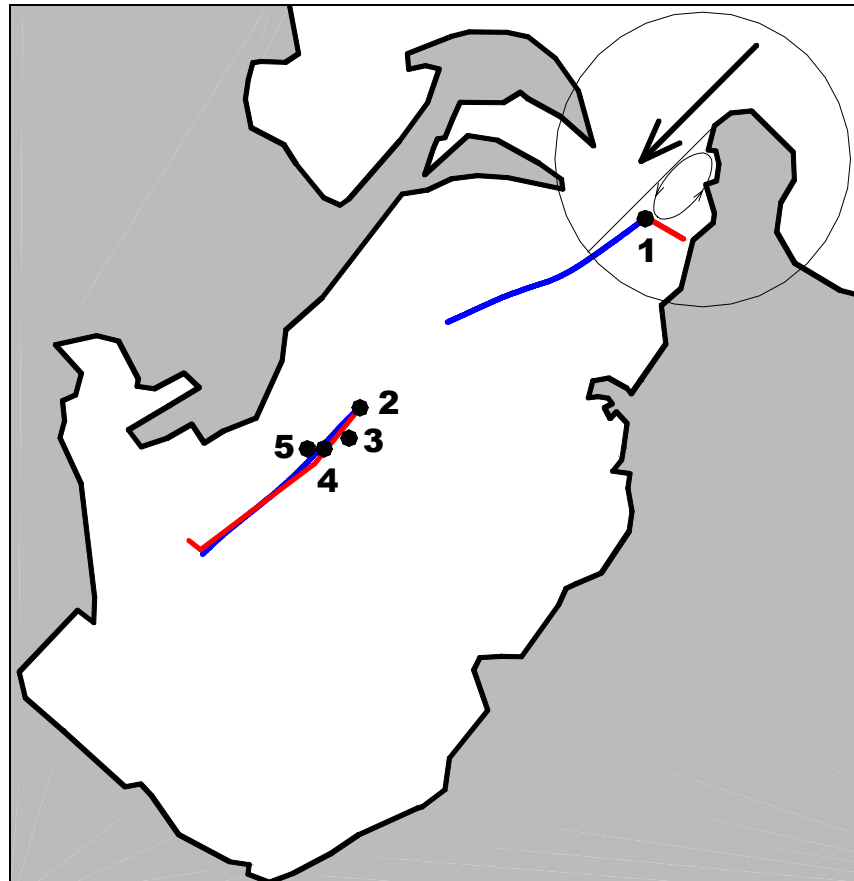


Figura 10: Trazadores numéricos (azul) y mediciones (rojo)

En la Figura 10 se puede observar que los trazadores ubicados en cercanías de la desembocadura del Río Suquia (trazadores 2 al 5) se han desplazado hacia el SurOeste y la simulación numérica obtiene muy buenos resultados en este caso. Esto se debe a que en ese sector las tensiones de corte del viento se encuentran poco influenciadas por la topografía del lugar y el viento proveniente del NorEste ingresa de una manera franca hacia la laguna.

A diferencia con el trazador 1, la simulación numérica indica que el agua superficial debe ingresar a la laguna, pero en las mediciones de campo el trazador se dirige hacia la costa Este. Esto se puede deber a que la saliente del terreno natural ubicada al Este (ver círculo en sector superior derecho de la Figura 10) actúe como un obstáculo del viento y por lo tanto la “sombra” de esta barrera no permita desarrollar tensiones de corte hacia el interior de la laguna y la posible formación de un vórtice haya desplazado el trazados hacia la costa Este. Sin embargo estas hipótesis no pueden ser contrastadas con mediciones.

## **5 CONCLUSIONES**

La descarga del Río Primero no tiene influencias importantes en la hidrodinámica del sistema y por lo tanto se necesitan condiciones de crecidas del orden de los 100 m<sup>3</sup>/s para que este tributario se comporte como un agente forzante de la circulación en el sistema. De la misma manera sucede con la salinidad de la Laguna del Plata.

Los resultados de las mediciones en la Laguna del Plata permiten observar que la salinidad es prácticamente uniforme, de características salobres y con una concentración superior a la del mar, a igualdad de la medida en la Mar Chiquita

La circulación superficial debida a un temporal típico del NorEste produce vectores prácticamente paralelos que se dirigen hacia el SurOeste, con mayor intensidad en las costas y menor en la franja central de la laguna. En la capa media se desarrollan dos celdas de circulación que giran en sentido antihorario (vórtice superior) y en sentido horario (vórtice inferior), mientras que en el fondo la situación es similar.

En la conexión de la laguna con la Mar Chiquita el flujo superficial es entrante, el de la capa media y de fondo es saliente. Esto permite interpretar que el perfil de velocidad en esta sección se invierte.

Los trazadores numéricos que se han desplazado en forma adecuada son los ubicados en la zona central de la laguna, debido a que las tensiones de corte del viento se encuentran poco influenciadas por la topografía del lugar y el viento proveniente del NorEste ingresa de una manera franca hacia la laguna. A diferencia los trazadores posicionados cercanos a los contornos no han representado correctamente las condiciones medidas, debido a efectos no considerados.

## **6 AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se ha desarrollado desde el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfYN de la UNC en el marco de proyectos de investigación financiados por el CONICET, Agencia Córdoba Ciencia, Secretaría de Investigación y Postgrado de la UNC (Secyt) y el programa de la Comunidad Europea denominado ECOSUD (Estuaries and Coastal Areas, Basis and Tools for a more Sustainable Development) (ICA-CT-2001-10027).



## 7 REFERENCIAS

- Destuynder, V., *Modelación Hidrodinámica Tridimensional del Río de la Plata*, Tesis de ingeniería para la Universidad de Lyon (Francia). Director: Tarela, P.A. (2002)
- Dyke P.P.G. and Davies A.M. (Editors), *Mathematical models of the North Sea and surrounding continental shelf seas*. Proceedings of JONSMOD 90, Birkenhead, U.K., 2–5 April 1990. *Continental Shelf Research*, 12(1), 211 pp.(1992).
- Hillman, G., *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita*. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina. (2003)
- Luyten P.J., Jones J.E., Proctor R., Tabor A., Tett P. and Wild-Allen K., *COHERENS – A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation*. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 914 pp. (1999)
- Lynch D.R. and Davies A.M. (Editors), *Quantitative skill assessment for coastal ocean models*. Coastal and Estuarine Studies, Vol. 47, American Geophysical Union, Washington D.C., 510 pp. (1995).
- Mellor, G., *User Guide for a Three Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*, Princeton University, 1-43. (1998)
- Nihoul J.C.J. and Jamart B.M. (Editors), *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Elsevier Oceanography Series, Vol. 45, 624 pp. (1987).
- Pagot, M., *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce*. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina. (2003).
- Reati, G.J., Florin, M., Fernandez, G.J. Y Montes, C., *The Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): a little know, secularly fluctuating, saline lake*. *International Journal of Lake Research*, Vol. 5. (1997).
- Universidad Nacional de Córdoba, *Valoración del Impacto Ambiental en la Región de Mar Chiquita y la Cuenca afectada por el Canal Federal*, Informe Final al CFI, Cba. Argentina. (1998).
- Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica, *Diseño de Defensas para la localidad de Miramar, Mar Chiquita, Córdoba*. Informe Final para DIPAS, Cba. Argentina. (2003).