

## **SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL EN LA LAGUNA DE LOS PATOS, BRASIL**

**Hillman G.<sup>1</sup>, Rodriguez A.<sup>1</sup>, Pagot M.<sup>1</sup>, Tyrrell D.<sup>2</sup>, Corral M.<sup>1</sup>, Oroná C.<sup>1</sup>, Möller O.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Laboratorio de Hidráulica. FCEFyN. UNC.  
Av. Vélez Sarsfield 1609, Ciudad Universitaria, Pabellón Ingeniería. SIP.  
Córdoba, Argentina.

e-mail: [ghillman@com.uncor.edu](mailto:ghillman@com.uncor.edu)

<sup>2</sup> Institute of Marine Studies, University of Plymouth. United Kingdom.

<sup>3</sup> Departamento de Oceanografía Física. FURG. Río Grande. Brasil.

**Palabras Clave:** Hidrodinámica, Simulación bidimensional, Estuario.

**Resumen.** En este trabajo se presenta la modelación hidrodinámica bidimensional de la Laguna de los Patos en el marco del proyecto de investigación "Ecosud" (Estuaries and Coastal Areas. Basis and Tools for a more Sustainable Development) financiado por la Comunidad Europea. La laguna está ubicada al sur de Brasil entre las ciudades de Río Grande y Porto Alegre, en el estado de Río Grande do Sul. La laguna tiene una extensión de 250 km aproximadamente paralelos a la costa y una superficie de 10.360 km<sup>2</sup>. La zona estuarina presenta una extensión de 60 km, recibiendo importantes tributarios, los cuales acarrear contaminantes provenientes de actividades agropecuarias e industriales, a las que se suman vertidos sin tratamiento de ciudades como Pelotas y Río Grande, próximas a la Laguna. La magnitud del sistema, lo convierte en un recurso de gran importancia para el desarrollo de actividades económicas y recreativas, por lo que resulta interesante mejorar el conocimiento del comportamiento hidrodinámico de distintos sectores potencialmente productivos, como el Saco de Mangueira. Se realizaron distintas simulaciones con un modelo bidimensional, RMA-2 (Cuerpo de Ingenieros U.S.), buscando caracterizar la hidrodinámica de la laguna bajo la combinación de distintos agentes forzantes, brindando elementos que permiten analizar el comportamiento de la laguna y el estuario durante periodos específicos de interés según la disponibilidad de datos.

## 1 INTRODUCCION

La Laguna de Los Patos situada entre 30° y 32° de latitud al sur de Brasil, tiene un área de aproximadamente 10.360 Km<sup>2</sup> con una longitud NE-SO de aproximadamente 250 Km y 40 Km de ancho. Se conecta en su extremo sur con el Océano Atlántico a través de un estuario de 22 Km de largo, 2 Km de ancho y 12 m de profundidad en el canal central. Sus características permiten dividirla en tres regiones: la zona sur o estuarina, una región central y la región superior influenciada por el río Guaiba. Este comportamiento general ha sido estudiado extensamente por varios autores (e.g. Delaney, 1965 y Castello, 1985).

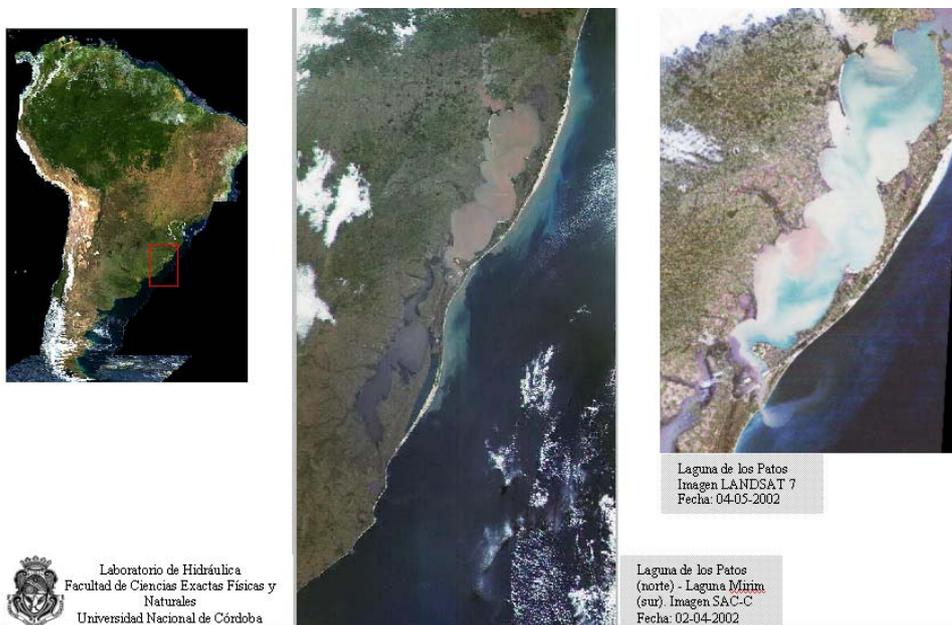


Figura 1. Ubicación de la laguna de Los Patos

La laguna recibe agua dulce de los ríos Guaiba, Tacuarí, Camaquã, Jacuí, del arroyo Sao Gonçalo por el oeste y del arroyo Bolaxa a través del Saco de Mangueira, por el estuario en el sur. El Saco se conecta con el estuario a través del puente de Los Franceses (de 300 m de ancho), su profundidad media ronda los 1,5 m, tiene una longitud aproximada de 10 km (ver Figura 2x). Al quedar inmerso en un sector densamente poblado por industrias, puertos y asentamientos urbanos, el Saco recibe gran cantidad de aportes de residuos industriales, provenientes de industrias instaladas en el perilago.

Favorecido por la conexión que el Saco posee con el estuario, se produce un intercambio dinámico con el agua de la Laguna de los Patos, generando procesos de circulación y recambio, lo cual, acompañado por las ventajas batimétricas y geográficas, convierten este sector en un lugar privilegiado para el desarrollo de actividades económicas asociadas a la acuicultura.

La identificación y el análisis de los agentes forzantes que gobiernan la hidrodinámica del Saco, fueron el objetivo principal de este trabajo, constituyendo las bases para análisis complementarios de calidad de agua y sedimentos, necesarios en la definición de sectores aptos para la instalación de industrias asociadas a la acuicultura (Cría de camarones)(Freitas et al., 2002).

## **2 PROBLEMÁTICA**

La zona estuarina se extiende por 60 km, recibiendo importantes tributarios. A través del Canal Sao Gonçalo, se drena la Laguna Mirim, acarreando gran cantidad de residuos provenientes de actividades agropecuarias a las que se suman vertidos sin tratamiento de la ciudad de Pelotas (323.000 hab.). Mientras que en torno a la ciudad de Río Grande (186.500 hab.) el estuario recibe gran cantidad de residuos provenientes de empresas Petroquímicas y de Fertilizantes. La descarga de todos los residuos inorgánicos y orgánicos (nutrientes, metales pesados, pesticidas) dentro de la laguna causan diversos impactos negativos los cuales podrán ser mejor comprendidos a través de modelaciones de dispersión de contaminantes y calidad de agua (Fernandes, 2001).

Existen algunos antecedentes recientes de simulaciones realizadas con modelos bidimensionales, como Telemac System (EDF París) (Tyrrel et al., 2003), lo que ha permitido comparar y distinguir ventajas y desventajas, al igual que la capacidad y robustez que cada uno de los modelos brinda bajo la acción de los principales factores forzantes.

Los resultados buscan caracterizar la hidrodinámica de la laguna y particularmente del Saco de Mangueira (Figura 2) bajo la combinación de distintos agentes forzantes, brindando elementos que permitan analizar el comportamiento de la laguna y el estuario durante períodos específicos de interés según la disponibilidad de datos.

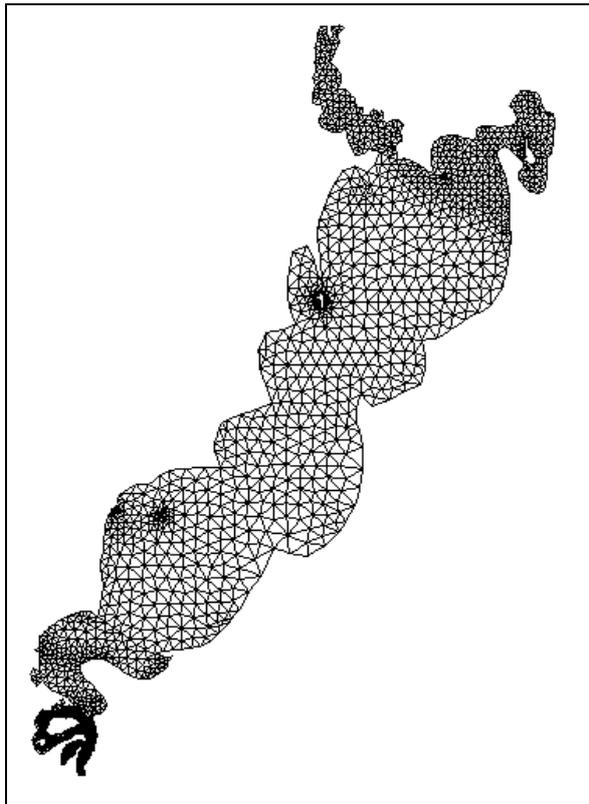
## **3 MODELACIÓN**

### **3.1 Descripción del modelo**

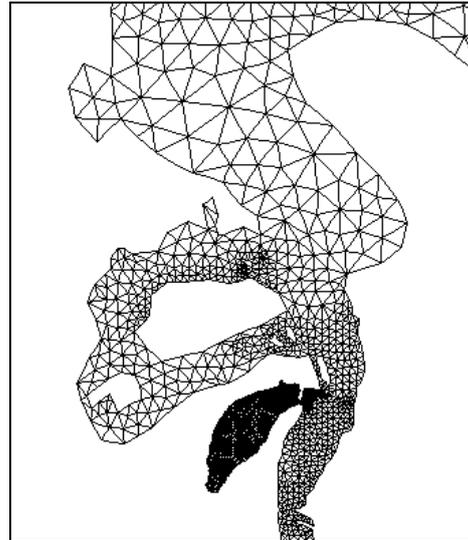
RMA2 es un modelo numérico hidrodinámico en elementos finitos bidimensional promediado en la vertical. Calcula los niveles de la superficie libre y las componentes horizontales de la velocidad para flujo subcrítico en campos bidimensionales de flujo. RMA2 calcula la solución por elementos finitos de las ecuaciones de Navier – Stokes bajo la forma de Reynolds para flujos turbulentos. Las pérdidas friccionales se estiman a través de la ecuación de Manning, mientras que para caracterizar la turbulencia se utilizan coeficientes de viscosidad de remolino. Se pueden analizar problemas tanto en flujo permanente como

impermanente.

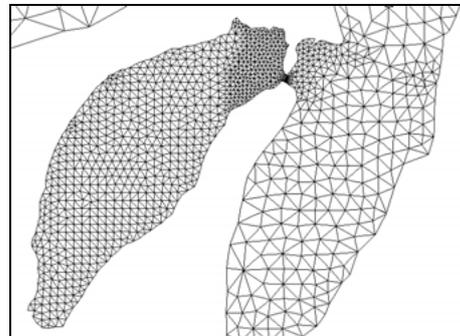
La discretización de la malla, se realizó, considerando elementos triangulares de distintas resoluciones, partiendo de elementos de 5000 m en el centro de la laguna, 1500 m en el estuario, 200 metros en el interior del Saco de Mangueira y hasta de 30 metros en la entrada al Saco (puente de Los Franceses).



a. Dominio de cálculo



b. Discretización del Estuario: 1500 m a 200 m.



c. Discretización del Saco de Mangueira: 200 m a 30 m.

Figura 2. Malla de elementos finitos de la Laguna de los patos. a. Discretización en todo el dominio. b. Discretización en el estuario. c. Discretización en el Saco. N° total de elementos triangulares 5645.

### 3.2 Calibración

Los datos utilizados para calibrar el modelo abarcan 4 días comprendidos entre el 4 y el 7 de Agosto de 1999, considerando un paso de tiempo ( $\Delta t$ ) de 1 hs. Durante este mismo período, se relevaron perfiles verticales de velocidad mediante un Perfilador de corrientes acústico ADCP, datos de viento y niveles. Todos ellos en la estación denominada

Practicagem, ubicada en el último tramo del estuario (Figura 3). También se recolectaron datos de caudales medios mensuales en los principales tributarios a la laguna (Tabla 1), los cuales se supusieron constantes durante todo el período de simulación.

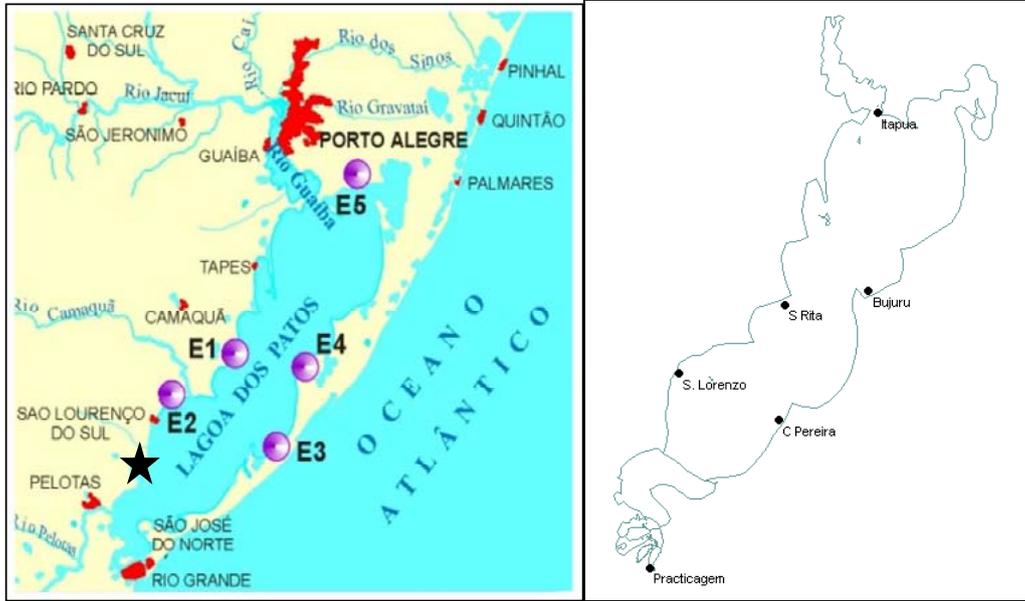


Figura 3. Ubicación de las distintas estaciones hidrometeorológicas

1999	Taquari	Jacuí	Camaquã	Taquari + Jacuí	Sao Goncalo	Guaiba
jan	158	165	117	323	162	380
fev	252	350	177	602	301	709
mar	183	214	133	397	199	467
abr	357	556	243	913	457	1074
mai	224	295	159	519	260	611
jun	695	1221	458	1916	958	2255
jul	757	1342	497	2099	1050	2469
ago	409	659	277	1068	534	1257
set	546	928	364	1474	737	1735
out	665	1161	439	1826	913	2148
nov	313	470	216	783	392	922
dez	235	317	166	552	276	650

Tabla 1

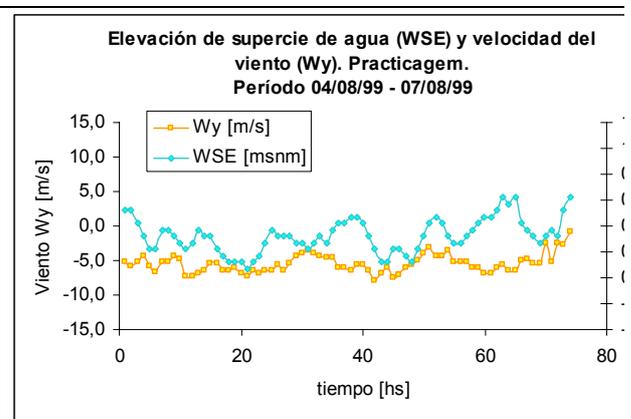


Figura 4. Datos de velocidad de viento y WSE observa Practicagem.

La calibración del modelo se realizó a partir de datos de velocidad relevados por el ADCP y consistió en el ajuste de las variables asociadas a rugosidad (“n” de Manning = 0,015), viscosidad de remolino ( $E=3000$  Pas/seg;  $Pe= 8$ ) y un coeficiente de viento, el cual varía según la formulación de Van Dorm (USACE, 1996).

En el caso de la viscosidad de remolino se utilizaron dos métodos disponibles en RMA2, por asignación directa del valor, considerando una viscosidad de 2000 Pas/seg, y mediante la asignación automática de la viscosidad por elemento, la cual se calcula en función del número de Pecklet, el tamaño del elemento y un rango de velocidad. Si bien esta última herramienta ha permitido lograr viscosidades de remolino del orden de 100 pas/seg, los resultados no indican gran sensibilidad a esta variable, aunque permite distinguir con mayor claridad la presencia de vórtices dentro del cuerpo de agua y le brindan mayor estabilidad al proceso de modelación.

Los resultados obtenidos permitieron lograr una correlación directa entre la magnitud de velocidad observada y la modelada, con un  $R^2$  de 0,84 (Figuras 5 y 6). A su vez se compararon para el mismo intervalo de tiempo, valores de elevación de superficie de agua observados (WSE) en la estación de Santa Rita (E1) y modelados, lo cual arrojó un  $R^2$  de 0,67 (Figura 4).

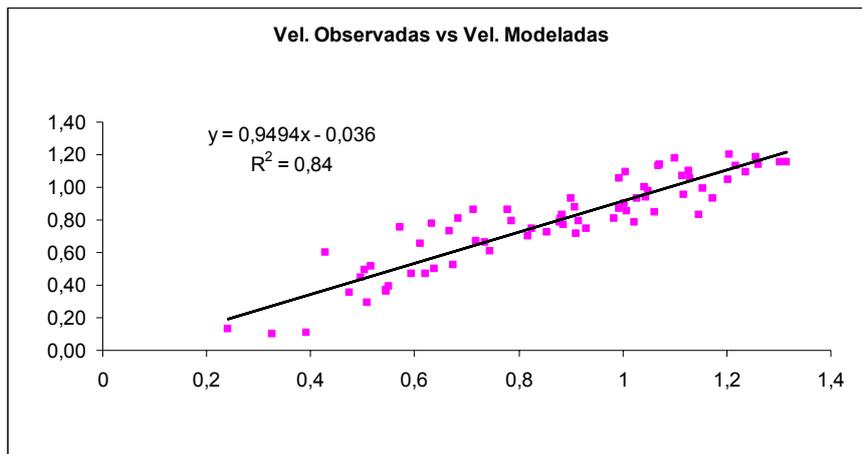


Figura 5. Correlación entre velocidades observadas (eje horizontal) y modeladas (eje vertical) en Practicagem

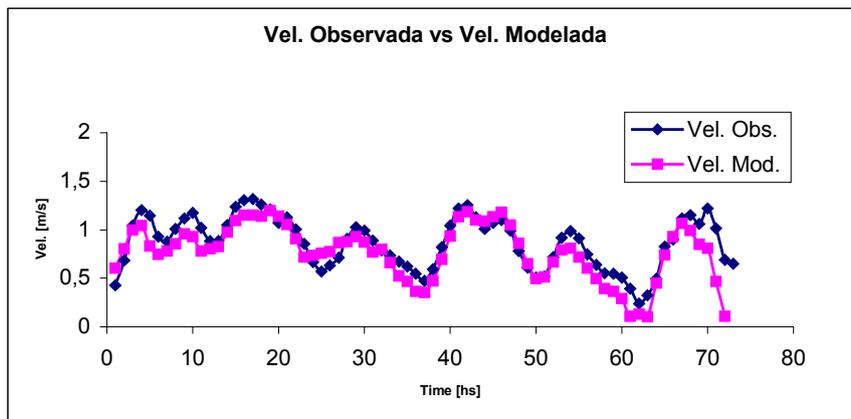


Figura 6. Comparación entre velocidades observadas (eje horizontal) y modeladas (eje vertical) en Practicagem

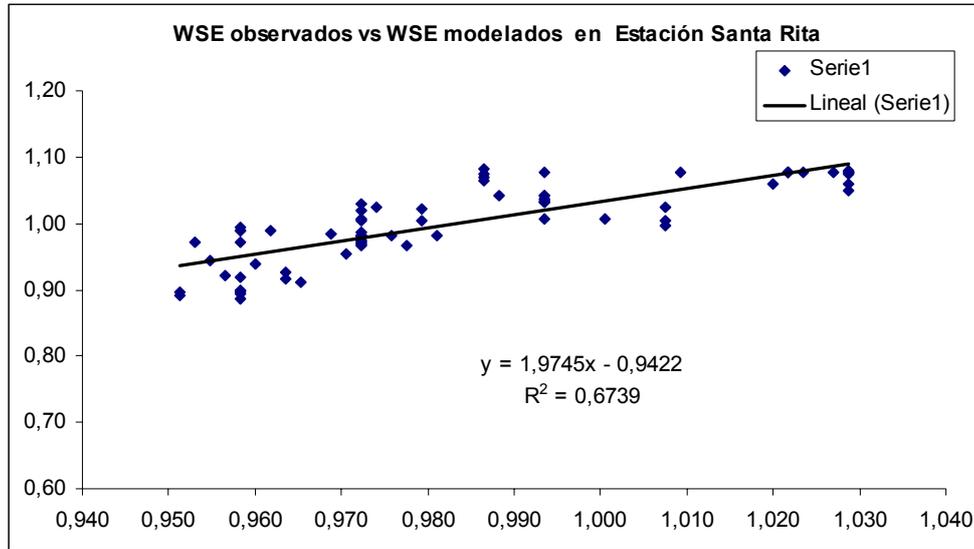


Figura 7. Correlación entre niveles (WSE) observados (eje horizontal) y modelados (eje vertical) en Santa Rita.

### 3.3 Escenarios analizados. Variables: viento y niveles.

Se considera que los resultados obtenidos en la calibración son satisfactorios y por lo cual se modeló un período más extenso, con el objetivo de observar e identificar patrones de comportamiento en el cuerpo lagunar y del Saco de Mangueira.

El período modelado comprendió desde el 21 de Julio de 1999 hasta el 21 de Agosto de 1999, con un lapso horario y estuvo definido a partir de la existencia de valores de caudales (Tabla 2) y de niveles (WSE) en Practicagem durante todo el intervalo.

Los escenarios analizados comprenden distintas combinaciones de viento y niveles (Figura 8), observados durante el período modelado. En estos se pueden apreciar patrones de circulación, de agua entrante y saliente del Saco, distinguiéndose posibles zonificaciones con distinto nivel de intensidad de circulación y mezcla, lo cual permite analizar las zonas más aptas para su uso acuícola, particularmente la cría de camarones.

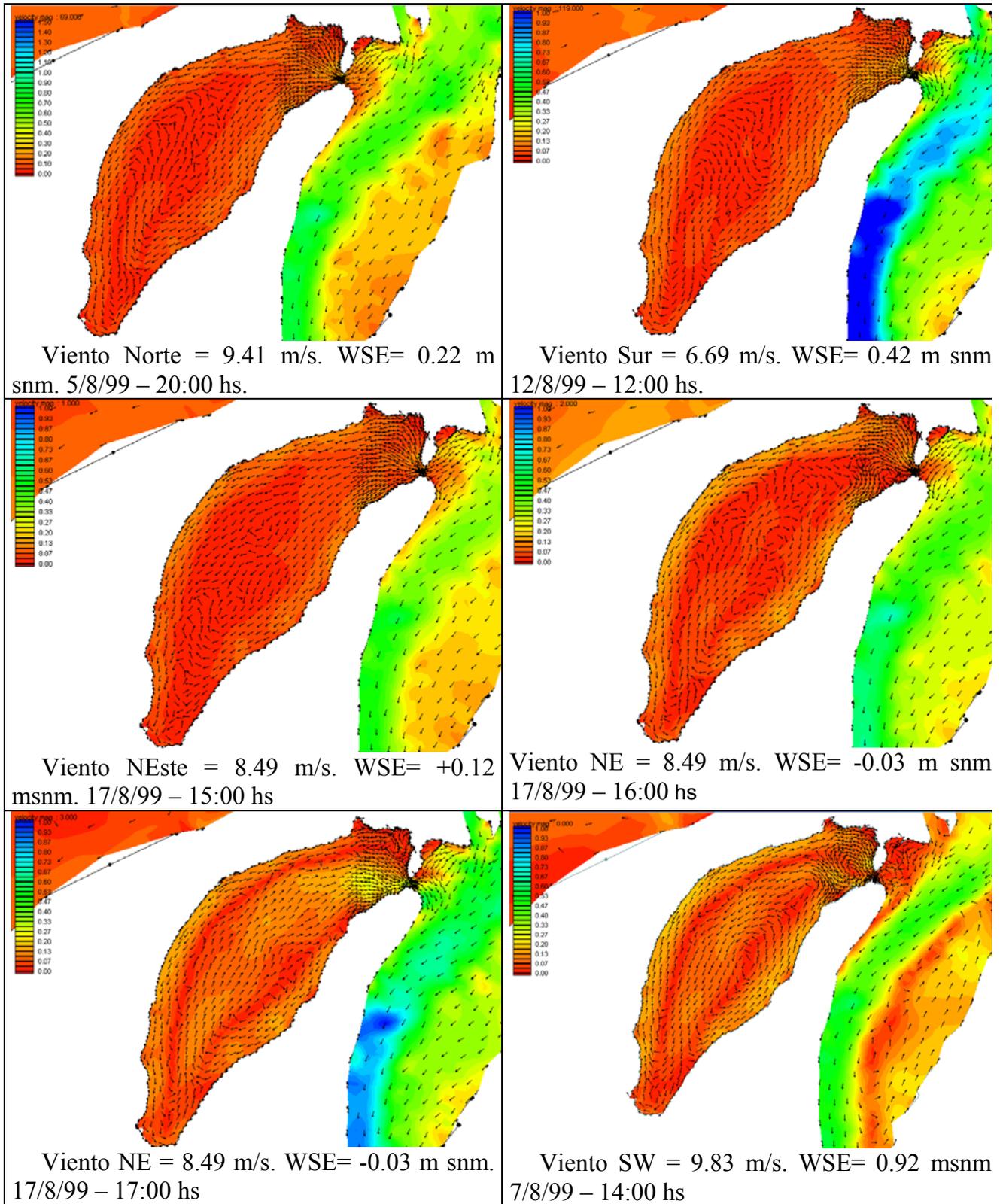


Figura 7. Patrones de circulación en el interior del saco, para distintas comb. de viento y WSE en el estuario.

Para comparar la calidad de la modelación de la circulación general de la Laguna de los Patos, se analizó específicamente la imagen satelital (Landsat 7) correspondiente al día 17 de Setiembre de 1999. Adicionalmente se obtuvieron de viento de viento y niveles observados en Practicagem, para posibilitar la simulación del caso seleccionado. El paso de tiempo adoptado fue de 30 minutos, coincidiendo el intervalo 19 con las 9:30 hs, instante próximo al paso del satélite Landsat 7 sobre la zona de la laguna. El viento registrado tenía dirección ENE y velocidad 3,14 m/s.

El mosaico satelital procesado se presenta en la Figura 9, donde se pueden distinguir distintos patrones de circulación gracias al gran transporte de sedimentos en suspensión que aportan los tributarios mayores. Particularmente, en el sector del Saco (Figura 10) se observa el ingreso de agua desde el estuario al mismo, fenómeno que se reproduce también en la simulación, identificándose “tubos” de corriente en el sector costero y una zona central de mayor mezcla.

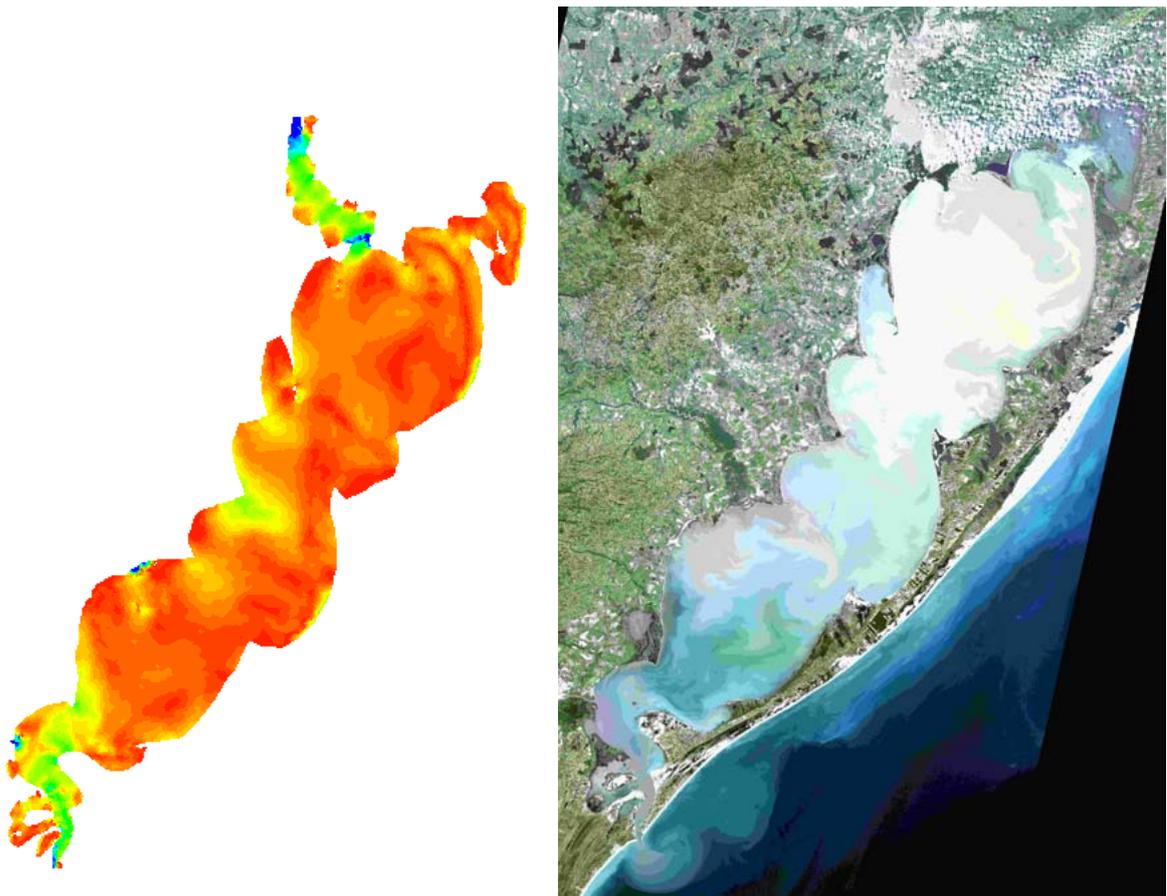


Figure 9. Saco de Mangueira, Imagen Landsat 7 del 9-17-99. Dir. De viento ENE,  $U_{10}=3.14$  m/s

En la Figura 9 se encuentran también, similitudes dinámicas al analizar el mosaico de toda

la laguna y compararla con los resultados de la simulación. Se puede apreciar el efecto que la batimetría impone sobre la circulación, distinguiéndose mayores velocidades en sectores próximos a las descargas de los tributarios y el efecto difusivo que sufre el flujo al entrar en la laguna. También se distingue el incremento de velocidad en la entrada al estuario, el cual responde al viento E-NE, el cual venía sostenido en las 15 hs previas a la hora simulada. La semejanza en los patrones de circulación se considera altamente satisfactoria coincidiendo los principales macro vórtices.

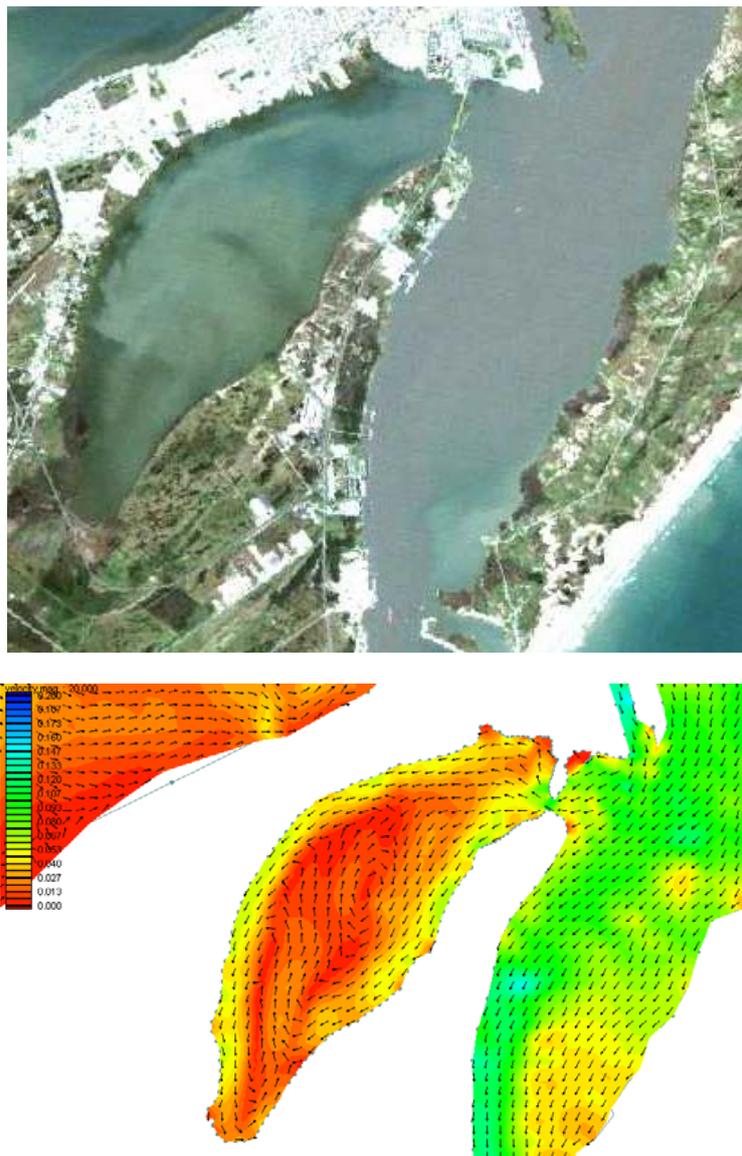


Figure 10. Saco de Mangueira, Imagen Landsat 7 del 9-17-99. Dir. De viento ENE,  $U_{10}=3.14$  m/s

#### 4 CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas han permitido resaltar la gran sensibilidad del sistema (Saco-estuario) ante la acción del viento y las condiciones de nivel en el estuario, siendo dominante esta variable en el proceso de ingreso y salida de agua del Saco de Mangueira.

Los resultados permiten inferir la formación de macro vórtices en el sector central del Saco, lo que caracteriza a priori regiones de gran movimiento y recambio, al igual que tubos preferenciales de circulación, con mayores velocidades en la zona próxima a la costa. Esta caracterización de la circulación posibilita la selección de sitios preferenciales para la acuicultura.

De la comparación con el mosaico satelital analizado, se puede admitir la virtud del modelo en reproducir a gran escala las corrientes o patrones de circulación internos a la laguna, evidenciando una gran dependencia de los resultados con la batimetría asignada al modelo. Será necesario complementar los avances en la modelación con la implementación de nuevas y distintas técnicas de procesamiento de imágenes que permitan identificar con mayor claridad patrones de circulación a los efectos de poder comparar y analizar en detalle los resultados obtenidos.

Finalmente, se menciona que se continuará avanzando en la modelación de nuevos escenarios climáticos, con el objetivo de validar el modelo bajo distintas condiciones de viento y nivel, apoyando las simulaciones con campañas de campo realizadas.

#### 5 REFERENCIAS

- [1] Delaney, P. (1965), *Fisiografía e geologia de superficie da planicie costeira do Rio Grande do Sul*. Publicacao special da Escola de Geologia de Porto Alegre 6:1-105.
- [2] Castelo, J. P. (1985), *La ecología de los consumidores del estuario de la Lagoa dos Patos, Brasil*, p. 386-406. In A. Yanes Arancibia (ed.), *Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: Towards an Ecosystem Integration*. Editora Universidad Autonoma Nacional de México, México.
- [3] Fernandes, E. H. L.: “*Modelling the hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil, University of Plymouth*”, PH.D. Tesis, 198 pg. (2001).
- [4] Freitas D., Tagliani R.: “Ordenamiento espacial do cultivo de camarão em cercados no estuario da Lagoa dos Patos”. Simposio Brasileiro de Oceanografia (2002).
- [5] Tyrrel D. A., George K.J.: *Finite element modelling of the hydrodynamics of water quality*

G. Hillman, A. Rodríguez, M. Pagot, D. Tyrrell, M. Corral, C. Oroná, O. Möller

---

*of the Patos Lagoon system, Brazil.* Journal of Coastal Resesarch, SI 39. Itajaí, SC – Brasil, ISSN 0749-0208 (2003).

- [6] USACE (1996) User's guide to RMA2-WES, Version 4.3, U.S. Army Corps of Engineers – Water Ways Experimental Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, Miss., EEUU.

## **6 AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto de investigación se realiza en conjunto, desde el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN de la UNC como parte de un programa más amplio de investigación fundado por la Comunidad Europea denominado ECOSUD (Estuaries and Coastal Areas, Basis and Tools for a more Sustainable Development) (ICA-CT-2001-10027).