

UN MODELO HIDRODINÁMICO 3D DEL HUMEDAL DEL RIO CRUCES: CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA UTILIZANDO MOHID.

AN HYDRODYNAMIC MODEL OF RIO CRUCES WETLAND: CALCULATION OF RESIDENCE TIME USING MOHID.

Antonio Tironi-Silva^{1,2}, Víctor H. Marin², , Luisa E. Delgado^{1,2}

Resumen

En el presente trabajo presentamos un modelo hidrodinámico 3D del Humedal del Río Cruces en la Región de Los Ríos, Chile. Este humedal es uno de los más grandes de Chile, está protegido por la Convención Ramsar y soporta una diversidad biológica de importancia continental, sobretodo como sitio de nidificación del Cisne de Cuello Negro (*Cygnus melanocoryphus*). El modelo incluye 3 niveles anidados, con diferentes escalas geográficas y de definición de su grilla, logrando definiciones de la grilla de menos de 100 m. en su nivel más anidado. Sobre este sistema de modelos hidrodinámicos se implementó un módulo lagrangiano para calcular el tiempo de residencia del humedal. Nuestros resultados muestran un tiempo de residencia de 3 días para la zona baja del humedal y de 53 días para la zona alta. Nuestro trabajo muestra la utilidad de este tipo de modelos para conocer la dinámica de los componentes abióticos de este tipo de ecosistemas, la estructura de sus corrientes y la hidrodinámica en general de un sistema. El objetivo al presentar nuestro trabajo es incentivar el uso de este tipo de herramientas informáticas en la toma de decisiones de gestión ambiental de sistemas acuáticos, tanto en el ámbito público como privado, aportando a una visión integrada de este tipo ecosistemas.

Palabras claves: Modelo hidrodinámico - MOHID - Tiempo de residencia - Humedal – Convención de Ramsar

Abstract

Our work describes a 3D hydrodynamic model of the Río Cruces wetland, located in the Los Ríos region in southern Chile. The wetland, one of the biggest in Chile, is protected by the Ramsar Convention and supports a biodiversity of continental relevance, especially as nesting site of the Black-Necked swan (*Cygnus melanocoryphus*). The model has three nesting levels, each level at different geographic scales and grid definition, reaching a grid of less than 100 m. in the smaller model. Over this system of three hydrodynamic models, we implemented a lagrangian module to calculate the residence time of the wetland. Our results shows renewal times of 3 days for the southern part of the wetland and 53 days for the inner, northern area. This paper shows the utility of hydrodynamic models to understand the dynamics of the abiotic components of a coastal ecosystem, the 3D structure of currents and different timings of the tide, among other features of the hydrodynamics of a tidal ecosystem. We hope our work will promote the use of hydrodynamic models as decision-support tools both in public and private environmental management of aquatic ecosystems, supporting an integrative understanding of this kind of natural systems.

Keywords: Hydrodynamic models - MOHID - Residence time - wetland – Ramsar Convention

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos numéricos hidrodinámicos constituyen una importante herramienta para apoyar la gestión de ecosistemas acuáticos, tanto marinos como de agua dulce, al integrar la teoría con datos empíricos en un sistema informático que simula la dinámica de un cuerpo de agua en la naturaleza. Estos modelos permiten conocer el funcionamiento general del ecosistema, la dinámica y variabilidad de sus componentes (corrientes, mareas, sólidos en suspensión, etc.). Además, una vez implementados, calibrados y validados, los modelos hidrodinámicos

pueden ser utilizados para simular la respuesta de un ecosistema frente a diferentes opciones de manejo ambiental, el efecto de las perturbaciones (naturales o antrópicas), o el destino de contaminantes en un cuerpo de agua, entre otros usos (Henderson et al, 2001; Moreno Navas *et al.*, 2011). En un mundo cada vez más cambiante, y donde todo indica que el agua se convertirá en un recurso estratégico, herramientas como las que son presentadas en este trabajo pueden apoyar la tarea de los tomadores de decisiones.

¹ Fundación Centro Transdisciplinario de Estudios FES-Sistémicos. Padre Mariano 391, Oficina #704, Providencia, Santiago, Chile. Tel.: +56 (2) 26314141, Antonio Tironi Silva, tironi@gmail.com

² Laboratorio de Modelación Ecológica, Depto. de Ciencias Ecológicas, Fac. Ciencias, U. de Chile. Las Palmeras 3425, Ñuñoa, Santiago, Chile. Tel: +56 (2) 9787319

Un modelo hidrodinámico es una herramienta que permite la simulación virtual de los procesos que tienen lugar en ecosistema acuático, a partir de tres elementos fundamentales: (1) un modelo tridimensional de la geometría del fondo -la batimetría-, (2) ecuaciones de estado que permiten simular el comportamiento de un fluido en los límites físicos que impone la batimetría y (3) una señal de marea, para el caso de aquellos ecosistemas con influencia oceánica, o la descarga de agua dulce (los ríos), para el caso de ecosistemas continentales. Una vez implementada una simulación robusta de la hidrodinámica, se pueden agregar diversos módulos adicionales para simular otros procesos, como por ejemplo aquellos químicos (dispersión de nutrientes), biológicos (dispersión de coliformes fecales) y ecológicos (producción primaria), en función de los objetivos planteados por la investigación.

En general, el desarrollo de modelos tiene dos objetivos: Predecir y/o explicar (Oreskes, 1994). Un modelo con fines predictivos intenta responder preguntas como ¿qué altura de mareas tendremos mañana a la hora x en el punto y ? Estos modelos buscan simular eventos futuros con cierta certeza, para lo cual la validación del modelo consiste en contrastar los resultados con datos obtenidos en tareas de campo. Así, el éxito de este tipo de modelos depende de su capacidad para predecir el comportamiento del ecosistema. Dependiendo del componente simulado, se puede lograr una alta capacidad de predicción (p. ej.: > 85% en mareas).

El desarrollo de modelos exploratorios, por otra parte, busca conocer el comportamiento general del sistema en estudio. Este tipo de simulaciones intentan responder preguntas más generales, como la dirección neta del flujo de agua en un punto dado, la estructura vertical de la columna de agua, o la extensión de la "cuña" salina en un sistema estuarino. El éxito de este tipo de modelos se mide de varias formas, como por ejemplo por medio de la validación, que puede apoyarse en aspectos generales del ecosistema, en lo que se conoce como una validación "funcional". Incluso se puede considerar validado un modelo en función de los objetivos iniciales con que fue planteado. Adicionalmente, cuando se pretende simular aspectos más complejos del ecosistema, como su productividad primaria, o procesos a gran escala geográfica o temporal como el tiempo de residencia, la validación del modelo debe ser comprendida como un proceso iterativo que involucra más aspectos que la predicción de uno o dos variables de estado.

En este artículo se presenta un modelo hidrodinámico 3D anidado del Humedal del Río Cruces en la Región de Los Ríos, Chile. Este humedal es uno de los más grandes de Chile y se encuentra protegido por la Convención de Ramsar. Cuenta con una diversidad biológica de importancia continental, sobretodo como sitio de nidificación del Cisne de Cuello Negro, *Cygnus melancoryphus*, (Corti & Schlatter, 2002). El modelo incluye 3 niveles de anidación con diferentes

escalas geográficas, logrando definiciones de la grilla < 100 m. en la de mayor resolución. Para los objetivos de este trabajo, se implementó un módulo lagrangiano para calcular el tiempo de residencia del humedal, siguiendo la metodología propuesta por Braunschweig *et al.*, (2003).

El tiempo de residencia de las aguas de un ecosistema acuático es un indicador de la capacidad de renovación natural de un cuerpo de agua, y en términos de su gestión ambiental, una de las tres variables hidrológicas necesarias para caracterizar su hidrología (EPA, 2008). Además, es una medida de su capacidad de autodepuración de contaminantes, nutrientes, u otros elementos antrópicos. Así, el tiempo de residencia puede ser de utilidad para calcular los tiempos de exposición a un contaminante o la retención de nutrientes por parte de la biota de un ecosistema, la biomasa de plancton presente en un cuerpo de agua o su capacidad para ciclar una determinada carga de nutrientes, entre otros usos (Rand, 1995; Muñoz-Caravaca *et al.*, 2011; Josefson & Rasmussen, 2000).

El objetivo de este artículo es dar a conocer, entre la comunidad de gestores, investigadores y usuarios del agua en Latinoamérica, el sistema informático MOHID y su gran potencial como herramienta de gestión del agua, poniendo especial atención en el proceso de implementación del modelo. Se demuestra que con la infraestructura informática actualmente disponible -que ha reducido los costos y el tiempo requerido para implementar este tipo de herramientas en varios ordenes de magnitud-, este tipo de modelos podría apoyar la toma de decisiones sobre el manejo del agua, en especial en las zonas costeras y adyacentes.

2. METODOLOGÍA

2.1 El sistema integrado de modelación de agua MOHID

MOHID¹ es un sistema informático para la generación de modelos numéricos de sistemas acuáticos desarrollado y mantenido por el Centro de Investigaciones Marina y Tecnología Ambiental (MARETEC), perteneciente al Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa, Portugal. MOHID adopta una filosofía integrada, desarrollada en código FORTRAN con una programación orientada a objetos, lo que permite la simulación modular de una serie de procesos (físicos, químicos y ecológicos) a diferentes escalas. El sistema permite la implementación de modelos anidados y la activación/desactivación de más de 50 módulos según las necesidades del usuario. MOHID además es un software de acceso libre y código abierto. Incorpora herramientas de análisis, como un sistema de información geográfica (MOHID GIS) y una herramienta de post-procesamiento de los resultados del modelo (MOHID Postprocessor).

1 www.mohid.com

Incluye tres herramientas básicas; MOHID Agua, MOHID Tierra y MOHID Suelo, todas enfocadas a simular la dinámica del agua en cuerpos de agua superficiales, subterráneos y el flujo sub-superficial, respectivamente. En este trabajo se muestra una aplicación del sistema MOHID Agua.

Este sistema permite la generación de modelos hidrodinámicos en tres dimensiones, para ser implementado en volúmenes finitos (Braunschweig *et al.*, 2004). El sistema resuelve las ecuaciones primitivas incompresibles, usando como supuesto el equilibrio hidrostático y utilizando la aproximación de Boussinesq y Reynolds. Para una descripción detallada de las ecuaciones de MOHID Agua, ver el artículo de Marin *et al.* (2013).

El modelo implementado para este artículo corresponde a un sistema de 3 niveles anidados. El primer modelo, denominado *Oceánico*, es de gran escala abarcando un área rectangular de 72.600 km², con su vértice inferior ubicado en los 75,5°W

y 41,5°S y una definición de celda de la grilla de 2,2 km. Este nivel tiene como función generar la onda de marea desde el Océano Pacífico hacia el estuario del Río Valdivia.

Anidado dentro de este modelo se encuentra otro modelo de menor tamaño, denominado *Estuario*, que cubre el área del estuario del Río Valdivia hasta la zona alta del humedal, con su vértice inferior en 73,5°W y 40°S, abarcando un área aproximada de 513 km², con una definición de celda de la grilla de 0,3 km (Fig. 1). Finalmente, el tercer nivel de anidamiento corresponde al modelo *Humedal*, desde la confluencia de los ríos Cruces y Calle-Calle por el Sur hasta el Fuerte San Luis del Alba por el Norte, abarcando todo el humedal e incorporando cuatro de sus afluentes, los ríos Cruces, Calle-Calle, Pichoy y Cayumapu (Fig. 1). Este nivel tiene su vértice inferior en 73,28°W y 39,83°S, un tamaño de celda de la grilla de 110 m. y abarca aproximadamente 465 km².

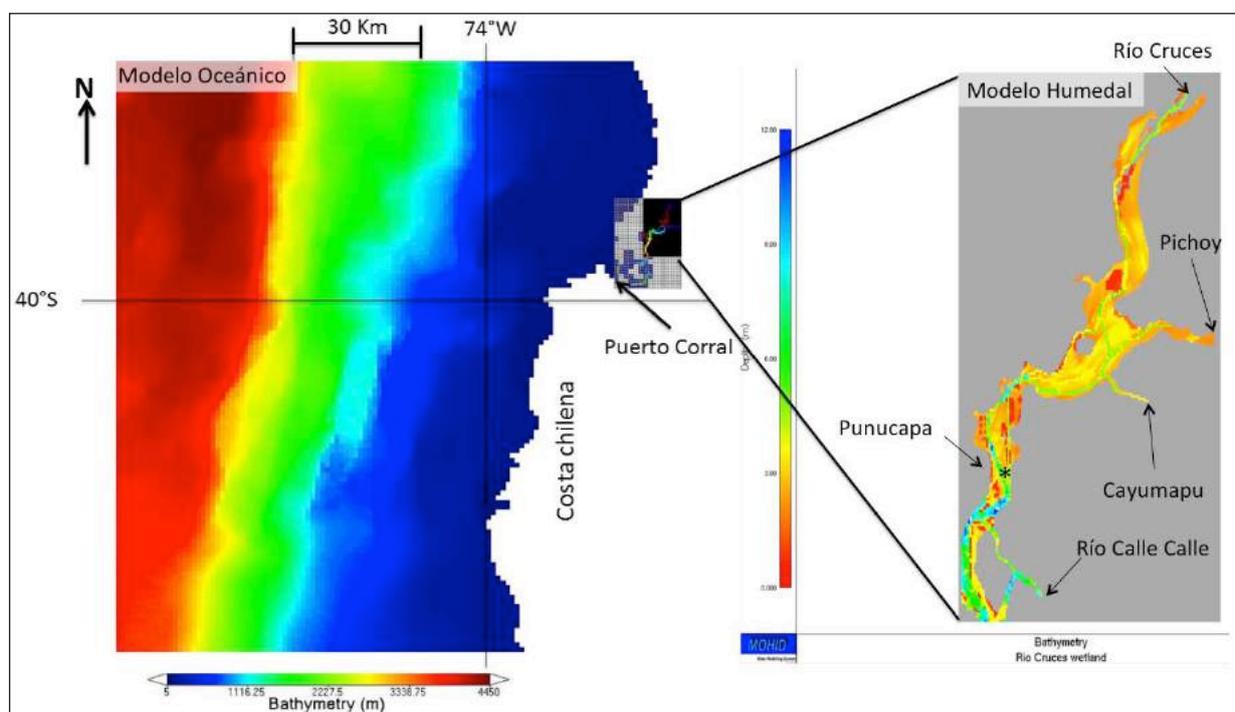


Figura 1. Modelo Hidrodinámico del Humedal del Río Cruces. Se muestran dos de los tres niveles de anidamiento del modelo, el superior (Modelo Oceánico) y el nivel de interés, sobre el cual se realizaron las simulaciones de tiempo de residencia.

2.2 Implementación del modelo: Batimetría, estructura vertical, condiciones iniciales y de borde.

Para implementar un modelo en MOHID, cada nivel de anidamiento requiere cuatro tipos de información: batimetría, una estructura vertical y condiciones iniciales y de borde. La batimetría describe el fondo del cuerpo de agua y consiste generalmente de listas de coordenadas (x, y) asociadas a una profundidad (z). A partir de esta información, MOHID GIS incorpora una herramienta para crear un terreno

digital en base a la triangulación espacial de los datos de profundidad disponibles. Cuando la información es muy dispersa, MOHID permite rellenar esas áreas con deficiencias de información con el promedio de los datos adyacentes en función de un radio definido por el usuario. Para el caso de este modelo, las grillas se generaron con información batimétrica del Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile (SHOA). La estructura vertical de los modelos y el tipo de coordenadas se muestra en la Tabla 1. MOHID permite la utilización de coordenadas sigma o

cartesianas. Experiencias previas de modelación muestran que las capas sigma otorgan una mayor estabilidad cuando son utilizadas en la zona alta de la columna de agua, donde el relieve del fondo genera

celdas triangulares, y coordenadas cartesianas en la zona mas profunda, donde el relieve es mas uniforme y las celdas tienen en su mayoría forma de cuadrado.

Tabla 1: Principales características de la grilla numérica de cada modelo hidrodinámico.

Modelo	Nivel de Anidamiento	Nº Dominio	Tipo de Coordenadas	Nº de Capas	Profundidad
Oceánico	1	1	Sigma	1	0 - 4500 m.
Estuario	2	1	Cartesianas	7	5 - 25 m.
		2	Sigma	5	0 - 5 m.
Humedal	3	1	Cartesianas	4	3 - 14 m.
		2		6	0 - 3 m.

Las condiciones iniciales de los modelos dependen de su escala espacial y los objetivos de la simulación, y cada nivel tiene diferentes requerimientos iniciales. Las condiciones iniciales de los tres niveles de anidamiento se describen a continuación.

Modelo Oceánico: Este nivel requiere la marea como condición de borde, la que es obtenida a partir de un modelo global (FES 2004; Lyard *et al.*, 2006). Las estaciones de muestreo para construir las condiciones de borde, es decir los lugares donde el modelo FES 2004 fue muestreado, se muestran en la Figura 1. El modelo *Oceánico* es barotrópico con una sola capa vertical (Tabla 1).

Modelo Estuario: Este modelo baroclínico obtiene la marea desde el modelo *Oceánico*. Los valores iniciales de salinidad y temperatura fueron de 30 PSU (agua de mar) y 10 °C respectivamente. Se incorporó la influencia de cuatro descargas de agua dulce de la zona cercana al humedal, los ríos Calle-Calle, Cruces, Pichoy y Cayumapu. Los caudales de estos ríos se muestran en la Tabla 2. La salinidad y temperatura de todos los ríos fue fijada en 0 PSU (agua dulce) y 15°C.

Tabla 2: Caudales de los ríos para el modelo *Estuario*

Río	Valor Inicial
Cruces	80 m/s
Calle-Calle	132 ms
Pichoy	81 ms
Cayumapu	46 m/s

Modelo Humedal: Este modelo, también baroclínico, obtiene la marea, salinidad y temperatura desde el modelo *Estuario*. Los ríos Calle-Calle, Cayumapu y Pichoy están inicializados según los valores promedios de caudal, temperatura y salinidad obtenidos en la campañas de terreno (Marín *et al.*, 2014). El Río Cruces tiene un caudal variable mensual obtenido de

las bases de datos de la Dirección General de Agua² del Ministerio de Obras Públicas del Estado de Chile.

2.3 Estrategia de modelación y calibración.

La inicialización de un modelo hidrodinámico anidado es un proceso delicado, sobretodo si se quiere evitar errores de inicio del modelo. Debe hacerse en varias etapas y con el tiempo de simulación suficiente para evitar la etapa más inestable de cualquier modelo hidrodinámico, su inicio. En el caso de este modelo, el primer paso fue inicializar el modelo *Oceánico* por dos meses, sólo, sin anidamiento. Luego fue activado el segundo nivel de anidamiento, el modelo *Estuario*, y este también fue inicializado por dos meses. Es decir, en este punto, el modelo *Oceánico* llevaba cuatro meses de simulación y *Estuario* dos. Luego fue activado el tercer nivel de anidamiento, el modelo *Humedal*, e inicializado por otros dos meses. Todas las inicializaciones se realizan con los módulos hidrodinámicos en modo barotrópico y sin descargas de agua dulce (ríos).

Con los tres modelos anidados inicializados, el siguiente paso es activar la baroclinicidad, o en otras palabras, la influencia de los gradientes de densidad (producto de las diferentes concentraciones de salinidad y temperatura) sobre las corrientes. Esta es otra etapa delicada en la inicialización de modelos hidrodinámicos, ya que grandes diferencias en estas dos propiedades -salinidad y temperatura-, como las observadas en un estuario, donde se encuentra el agua de mar con el agua dulce, pueden generar inestabilidades numéricas. Con esto en mente, la siguiente etapa fue correr el modelo con los tres niveles anidados durante tres meses para activar e inicializar el modo baroclínico del nivel *Estuario*. Así, al final de esta etapa, los diferentes niveles del sistema de modelos hidrodinámicos (*Oceánico*, *Estuario* y *Humedal*) llevaban 9, 7 y 5 meses de simulación, respectivamente. Finalmente, fue

² www.dga.cl

implementado el módulo lagrangiano en el modelo *Humedal* para estimar los tiempos de residencia mediante una simulación de 70 días de duración.

2.4 Cálculo del tiempo de residencia del humedal del Río Cruces.

Los experimentos numéricos de tiempo de residencia del humedal fueron implementados utilizando el módulo Lagrangiano de la plataforma MOHID, siguiendo la metodología propuesta por Braunschweig *et al.* (2003). Esta consiste en dividir la superficie del humedal en “cajas” (Figura 2), cuyo volumen total (V_t) es dividido en una cantidad (x) de partículas, calculadas a partir de la definición por parte del usuario del volumen (v_p) que tendrá cada partícula. El número de partículas se obtiene según la fórmula:

Así, cada caja de agua es subdividida en “partículas” de agua de volumen igual a V_p , y el destino de cada

partícula -que en la práctica es un volumen de agua previamente “marcado” informáticamente- luego es monitoreado en el tiempo. Entonces, una vez definidas las cajas a utilizar y el volumen de cada partícula, se implementó una simulación del modelo de 70 días para calcular el tiempo de residencia de cada caja. Esto se obtuvo gracias a que la plataforma MOHID permite monitorear el volumen de partículas que hay en cada caja para cada instante de tiempo. El tiempo de residencia luego es calculado a partir de la fracción del volumen de partículas que va quedando en cada “caja” respecto del volumen total inicial de cada caja, para cada salto de tiempo. Un punto sensible de la metodología es definir el punto de corte bajo el cual una caja se considerará “vacía”, ya que siempre hay una fracción de partículas que nunca abandona el modelo y no deben ser consideradas para el cálculo de tiempo de residencia. En este trabajo se definió ese corte como el primer momento en que cada serie de tiempo alcanzaba el mínimo valor de los 70 días simulados (Fig. 5, sección resultados)

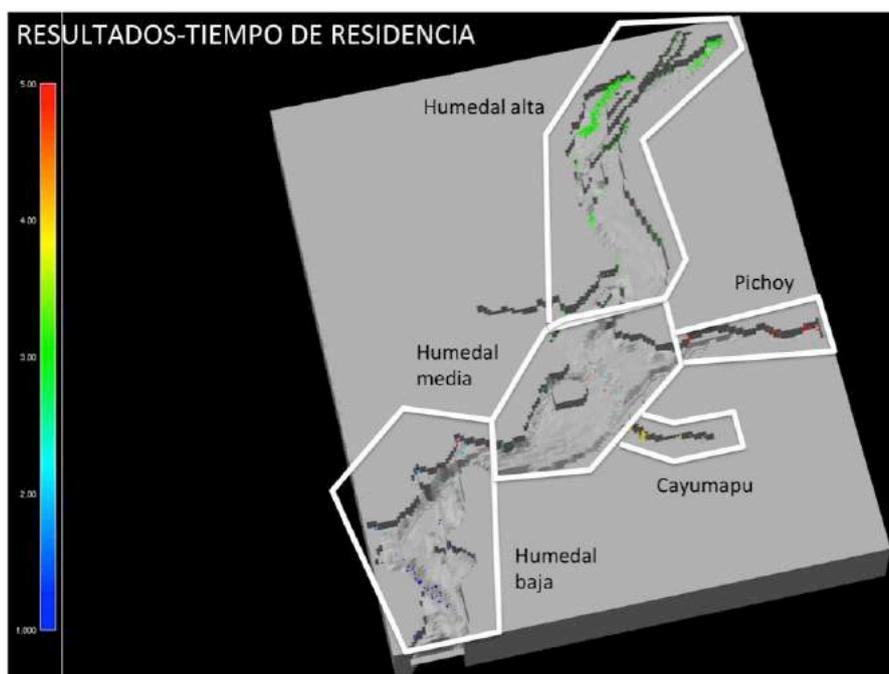


Figura 2. Definición de las secciones del humedal utilizadas para el cálculo del tiempo de residencia. Cada polígono en líneas blancas representa una “caja”.

Finalmente, para calcular el tiempo de residencia total de cada zona del humedal, se suman los tiempos de residencia de cada caja según la trayectoria “ideal” de una partícula para salir del modelo. Los resultados -y la sumatoria efectuada para cada cálculo- se muestran en la Tabla 3.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN,

3.1 Calibración del modelo hidrodinámico.

La calibración de un modelo hidrodinámico consiste en modificar los parámetros del mismo de forma que las principales variables de estado (altura del

nivel del mar y velocidad de la corriente) se ajusten a las características del sistema modelado. Las variaciones en el nivel del mar se calibraron usando los datos disponibles de la estación mareográfica del Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile ubicado en Puerto Corral (Fig. 1). Para ello se obtuvieron datos de variaciones de la marea para el mes de Enero del 2004 y se compararon con los resultados entregados por el modelo para el mismo punto geográfico. Los resultados muestran que el modelo es capaz de reproducir la marea en Puerto Corral de manera satisfactoria, obteniendo un coeficiente de determinación (r^2) de 0,94 (Fig. 3).

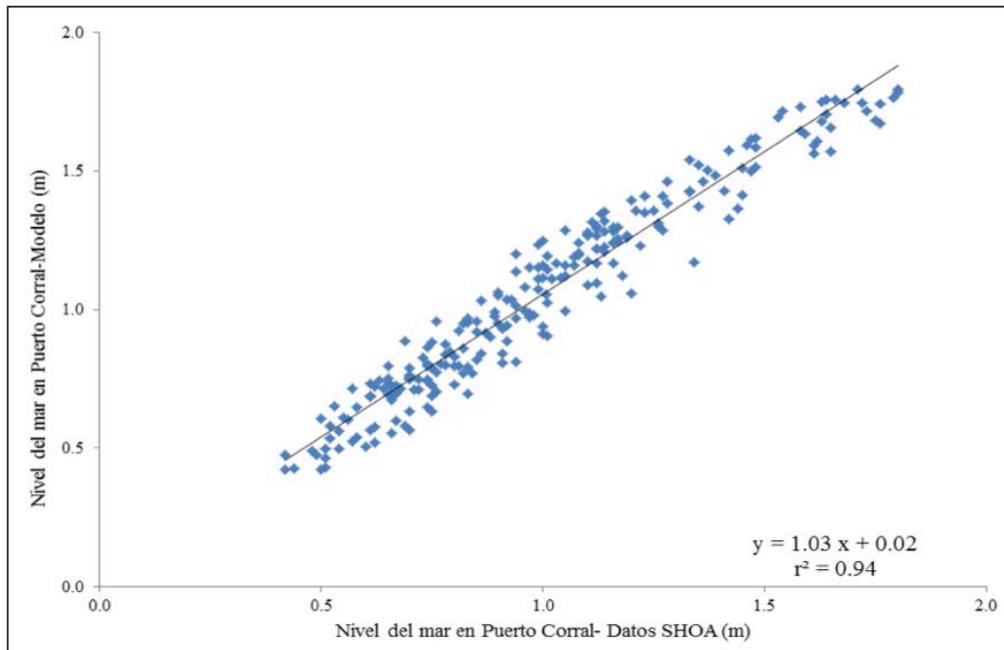


Figura 3. Comparación entre la altura del nivel del mar en Puerto Corral según la información de la estación mareográfica del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y el modelo hidrodinámico para el mes de Enero de 2004.

La calibración de la velocidad de la corriente en el Humedal se hizo en la zona donde el flujo se concentra, que corresponde a la localidad de Punucapa. El módulo de la velocidad se calibró ajustando un conjunto de parámetros hidrodinámicos logrando que el modelo lo replique de buena forma. Los parámetros modificados fueron aquellos de los cuales depende la viscosidad horizontal y vertical

(Módulo Turbulencia). El módulo Turbulencia fue implementado usando la aproximación de Smagorinsky (Marín *et al.*, 2013) en la que se incluye un parámetro adimensional (HORCON) el cual es usado para calibrar el módulo de la velocidad en el modelo. El modelo se consideró calibrado cuando el módulo de la velocidad para la localidad de Punucapa estuvo dentro del rango medido en terreno (Fig. 4).

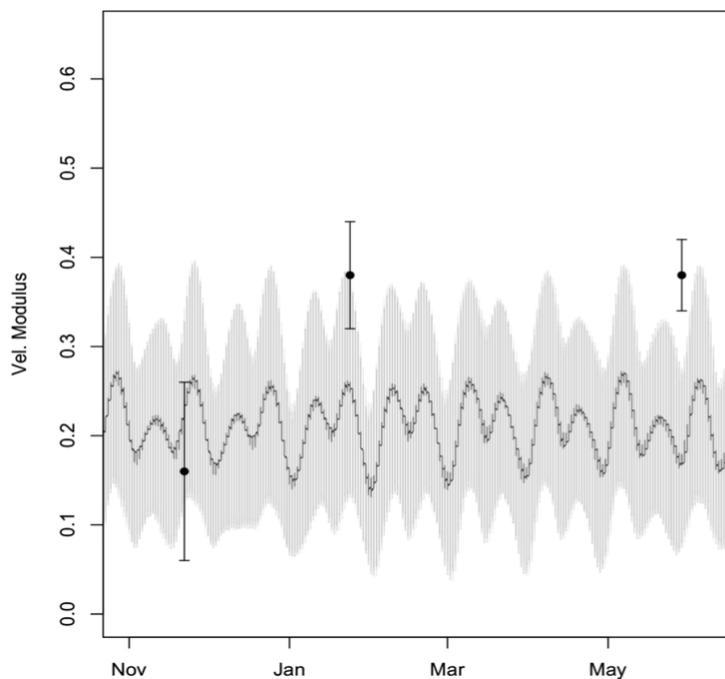


Figura 4. Validación de corrientes del modelo hidrodinámico. La línea negra y el área gris muestran, respectivamente, el promedio móvil y la desviación estándar móvil para una ventana de 72 horas (3 días) de los datos del modelo. Los círculos negros con barras de error muestran los datos tomados en las campañas de terreno, para el mismo punto.

3.2 Resultados del cálculo del tiempo de residencia.

Los resultados de las simulaciones para calcular el tiempo de residencia se muestra en la Figura 6. Donde cada color del gráfico muestra la fracción de partículas de cada caja que aún permanecen en el dominio del modelo. Como se puede observar, en todos los casos, hay una fracción de partículas que nunca abandona el área monitoreada, producto de la influencia de la marea sobre el sistema estuarino. Se establecieron tres líneas de corte para las 5 cajas a los 2,5, 5 y 25 días. Al integrar los resultados, se obtiene que el tiempo de residencia para el Humedal del Río Cruces es de 53 días para la zona alta del

humedal, 27 días para la zona media del humedal y 2,5 días para la zona baja del humedal. Por su parte, las áreas de desembocadura de los ríos tributarios del humedal mostraron tiempos de residencia de 30 días para el Río Pichoy y 33 días para el Río Cayumapu (Tabla 3).

Los resultados muestran una diferencia de más de 20 veces en los tiempos de residencia entre la zona alta y la zona baja del humedal. Esta información podrá ser de suma utilidad para, por ejemplo, determinar la ubicación de futuras fuentes puntuales de descarga, favoreciendo su ubicación en la zona baja del humedal, ya que su capacidad de autodepuración es muy alta, renovando sus aguas en solo 3 días.

Tabla 3. Resultados de los cálculos de tiempo de residencia.

Zona	TR caja (días)	Sumatoria	TR total (días)
Humedal Alta (HA)	25	HA+HM,+HB	52,5
Humedal Media (HM)	25	HM+HB	27,5
Humedal Baja (HB)	2,5	HB	2,5
Pichooy (P)	2,5	P+HM+HB	30,0
Cayumapu (C)	5	C+HM+HB	32,5

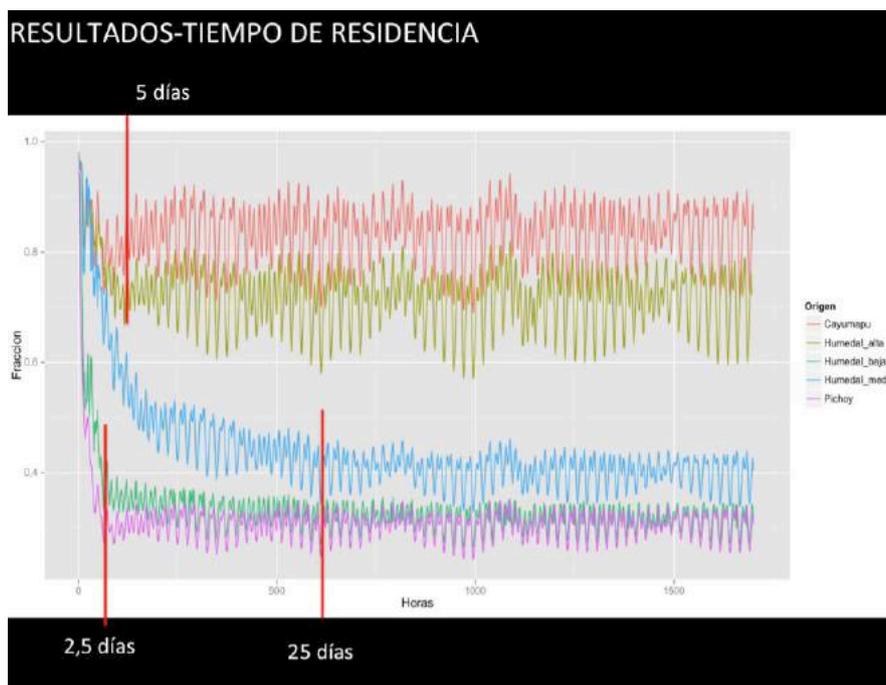


Figura 5. Tiempo de residencia para las diferentes secciones del humedal, calculado a partir de la fracción de agua que va quedando en cada caja respecto del volumen total de cada sección.

4. CONCLUSIONES

La adecuada gestión ambiental de los ecosistemas acuáticos requiere de herramientas que permitan una mirada integrada y sistémica. Los modelos hidrodinámicos implementados con el sistema de modelación MOHID cumplen con ambas características.

Una de sus ventajas es que MOHID es código abierto y se puede descargar gratis desde Internet, posee una pequeña pero activa comunidad de usuarios que contribuyen a esclarecer dudas y hasta la fecha sigue en desarrollo de nuevos módulos y aplicaciones.

Los resultados de este trabajo podrán servir de base para diversas acciones de manejo ambiental, como por ejemplo, la planificación territorial de los alrededores del humedal. El modelo muestra que la zona alta del mismo puede ser sensible a descargas de contaminantes, nutrientes u otros elementos que puedan perjudicar, si son vertidos en exceso, a la biota del ecosistema, debido a su alto tiempo de residencia (casi dos meses). Por otra parte, estos resultados también muestran que la parte baja del humedal sería la más idónea para ubicar nuevas descargas, ya que su gran capacidad para limpiar sus aguas (sólo 2,5 días) permitiría reducir los impactos acumulativos de cualquier elemento contaminante presente en las descargas.

Los recursos informáticos (de procesamiento y cómputo) están cada vez más al alcance de cualquier usuario, y las alternativas de procesamiento remoto y de colaboración a distancia han facilitado enormemente la implementación de este tipo de herramientas numéricas en cualquier país, estando al alcance de oficinas gubernamentales, empresas privadas y ONGs. Este trabajo es una muestra del enorme potencial de este sistema de modelación como herramienta en la gestión ambiental, ya que posee módulos de nutrientes, sólidos en suspensión, derrames de petróleo, simulador de oleaje, productividad primaria, coliformes fecales, entre muchos otros. Nuestra propuesta es que estamos en el momento adecuado para la masificación de su uso en Latinoamérica y el Caribe.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto Fondecyt N° 1110077 adjudicado a V. Marín y L. Delgado. Se agradecen los comentarios efectuados por dos revisores anónimos que mejoraron versiones previas del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Braunschweig, F., Leitao, P. C., Fernandes, L., Pina, P., & Neves, R. J. J. (2004). The object-oriented design of the integrated water modelling system MOHID. *Developments in Water Science*, 55, 1079-1090.

Braunschweig, F., Martins, F., Chambel, P., & Neves, R. (2003). A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*, 53(3), 137-145.

Corti, P., & Pablo Schlatter, R. (2002). Feeding ecology of the black-necked swan *Cygnus melancoryphus*

in two wetlands of Southern Chile. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 37(1), 9-14.

Henderson, A., Gamito, S., Karakassis, I., Pederson, P., & Smaal, A. (2001). Use of hydrodynamic and benthic models for managing environmental impacts of marine aquaculture. *Journal of Applied Ichthyology*, 17(4), 163-172.

Josefson, A. B., & Rasmussen, B. (2000). Nutrient retention by benthic macrofaunal biomass of Danish estuaries: importance of nutrient load and residence time. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(2), 205-216.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5-6), 394-415.

Marín, V. H., Delgado, L. E., Vila, I., Tironi, A., Barrera, V., & Ibáñez, C. (2014). Regime shifts of Cruces River wetland ecosystem: current conditions, future uncertainties. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(1), 160-171.

Marín, V. H., Tironi, A., Paredes, M. A., & Contreras, M. (2013). Modeling suspended solids in a Northern Chilean Patagonia glacier-fed fjord: GLOF scenarios under climate change conditions. *Ecological Modelling*, 264, 7-16.

Moreno Navas, J., Telfer, T. C., & Ross, L. G. (2011). Application of 3D hydrodynamic and particle tracking models for better environmental management of finfish culture. *Continental Shelf Research*, 31(6), 675-684.

Muñoz-Caravaca, A., Díaz-García, O., Douillet, P., Fichez, R., Herrera-Marrero, R., Alcántara-Carrió, J., & Rodríguez, A. G. (2011). La distribución de tiempo de residencia en la Bahía de Cienfuegos. On the flushing time of Cienfuegos Bay, Cuba. *Serie Oceanológica*. No. 9.

Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.

Rand, G. M. (Ed.). (1995). *Fundamentals of aquatic toxicology: effects, environmental fate and risk assessment*. CRC Press.

U.S. EPA. (2008). *Methods for Evaluating Wetland Condition: Wetland Hydrology*. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA-822-R-08-024