



USAID | ECUADOR
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

USAID COSTAS Y BOSQUES SOSTENIBLES
CONSERVAR LA BIODIVERSIDAD MEJORANDO LA CALIDAD DE VIDA

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y ANÁLISIS PARA LA RPFM EL SALADO

USAID COSTAS Y BOSQUES SOSTENIBLES

Contrato No. EPP-I-00-06-00013-00 TO #377

19 de julio del 2010

Esta publicación fue preparada para revisión de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Fue presentada por el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) bajo un subcontrato con Chemonics International.

Activity Title: USAID Sustainable Forests and Coasts. USAID Contracting Officer's Representative: Rocío Cedeño. Document language: Spanish. Translation of title: Results of Hydrodynamic Simulation and Analysis for the El Salado Mangrove Wildlife Production Reserve

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y ANÁLISIS PARA LA RPFM EL SALADO

USAID COSTAS Y BOSQUES SOSTENIBLES

Contrato No. EPP-I-00-06-00013-00 TO #377

Este informe es posible gracias al apoyo del Pueblo de los Estados Unidos a través de USAID. El contenido de este informe es de completa responsabilidad de CIIFEN y no necesariamente refleja las opiniones de USAID ni del gobierno de los Estados Unidos.

CONTENIDO

<i>Resumen Ejecutivo</i>	3
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	5
<i>Descripción General</i>	5
<i>Propiedades principales</i>	6
<i>Módulos</i>	7
<i>Mohid Water</i>	7
CONFIGURACIÓN DEL MODELO	15
<i>Área de Aplicación</i>	15
<i>Datos de contorno</i>	16
<i>Configuración</i>	19
<i>Parámetros de entrada</i>	22
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	23
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
CONCLUSIONES	27
ANEXO 1: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

Resumen Ejecutivo

Se utilizó el modelo MOHID¹ para modelar matemáticamente la hidrodinámica de los cuerpos de agua circundantes e interiores a la Reserva de Producción de Fauna - Manglares El Salado. El propósito de esta simulación matemática fue el observar si se producen cambios en la circulación como producto de una elevación del nivel del mar asociada con escenarios futuros de cambio climático. Se realizaron simulaciones bajo un escenario actual y bajo un escenario hipotético de una elevación de 1.5 m del nivel del agua. La elevación del nivel del mar se hizo aumentando el nivel indicado a cada celda de la malla de cálculo, sin alterar el perfil del borde costero ni la batimetría de la zona.

El modelo fue configurado utilizando datos de batimetrías actualizadas realizadas en la zona. Los datos fueron procesados e interpolados para obtener una malla de 191 filas por 191 columnas, el espaciamiento de las celdas fue de 50 metros en sentido horizontal y 100 metros en sentido vertical, lo cual dio como resultado una malla de 14.161 celdas, de las cuales, el 13 % aproximadamente corresponde al cuerpo de agua.

Una vez simulada la hidrodinámica del Estero se calibró el modelo mediante la representación de la variación de las corrientes y las mareas durante 24 de simulación, se calibró el modelo para que los resultados representen con la mayor fidelidad posible lo que ocurre en la realidad. La calibración se obtuvo ajustando coeficientes en el módulo hidrodinámico. Una vez calibrado el modelo, se colocaron flotadores “virtuales”, emitidos en la superficie del agua desde un punto central del área, cada 10 minutos relativos al modelo. Los flotadores dan una idea de las áreas donde se pueden concentrar ciertos elementos materiales así como, los tiempos de residencia de elementos suspendidos sustancias

Se observa que las aguas alrededor del Estero Salado, tienen un tiempo de residencia que supera las 24 horas de simulación, es decir durante este período al menos los flotadores en su mayoría se concentran dentro del área de estudio, cerca del punto de emisión, que para el caso de la Reserva de Producción de Fauna - Manglares El Salado, se utilizó la zona central.

Los resultados de la simulación hidrodinámica bajo el escenario de incremento del nivel del mar, muestran una similar distribución de la temperatura y la salinidad. Sin embargo, se observó un incremento en la velocidad de las corrientes superficiales, en ciertos sectores del área de estudio. Los flotadores colocados en la misma posición y configuración de emisión, mostraron un comportamiento diferente a los del escenario normal. La tendencia general de desplazamiento de los flotadores en el caso de incremento de nivel del mar es a salir del área de estudio.

¹ Water Modelling System. MARETEC www.mohid.com

La circulación general en la zona de la reserva puede ser alterada con un incremento del nivel del mar de las proporciones anotadas, en el sentido de lograr un mayor intercambio de agua en cada ciclo de marea.

La alteración en el régimen de circulación y la consecuente variación en los tiempos de residencia de elementos suspendidos en la reserva, sugieren dos posibles situaciones, un escenario dónde la mayor capacidad de remoción de contaminantes provoque una mejora natural de la calidad del medio acuático por efectos del aporte de agua con mayor cantidad de oxígeno desde el exterior de la reserva, y otro escenario donde ese incremento provoque que la zona de contaminación por materiales suspendidos se incremente.

En términos generales, los cambios en los parámetros físicos que podría provocar el calentamiento global no parecen suponer un cambio significativo dentro del sistema acuático, donde más importancia cobran los efectos de calidad y salud ambiental del ecosistema circundante.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Descripción General

El modelo MOHID fue desarrollado por investigadores de MARETEC (Centro de Ambiente y Tecnologías Marítimas) parte del Instituto Superior Técnico (IST)² de la Universidad Técnica de Lisboa. MOHID es un sistema de modelación en tres dimensiones de la dinámica de diversos cuerpos de agua como ríos, estuarios y océanos. El nombre MOHID es un acrónimo de MOdelo HIDrodinámico (en portugués MOdelo HIDrodinâmico).

La primera versión del modelo fue desarrollada en 1985. Inicialmente, el modelo permitía realizar simulaciones exclusivamente en dos dimensiones, mediante la aproximación de diferencias finitas (Ames, W. 1977) para la discretización del dominio. Las primeras versiones del modelo fueron desarrolladas en el lenguaje Fortran 77³.

En 1995 se introdujo la primera versión tridimensional del modelo en el trabajo de Santos, A. 1995. Esta versión se basaba en un modelo de coordenadas verticales llamado double Sigma (A. M. Davies, 1997). Con la intención de generalizar el uso de diferentes sistemas de coordenadas en un trabajo de modelación en estuarios (Martins, 1999) se lo programa para utilizar la aproximación de volúmenes.

Posteriormente, se introdujeron varias mejoras al MOHID, Leitão, 1966 integró los modelos de transporte euleriano⁴ y lagrangiano⁵ en 3D. Debido a la adición de más funcionalidades y la opción en tres dimensiones, se hizo necesario el cambio de aproximación y del lenguaje de programación a Fortran 95

Actualmente, MOHID está integrado por diferentes módulos, MOHID Water, MOHID Soil y MOHID Land. Estas herramientas pueden ser usadas para estudiar el ciclo del agua en un ambiente integrado, permitiendo simular procesos físicos y biogeoquímicos. MOHID está compuesto por más de 60 módulos que implican más de 300 mil líneas de código.

Existen muchas regiones donde se ha aplicado el modelo MOHID para resolver preguntas hidrodinámicas sobre cuerpos de agua complejos. La mayor cantidad de trabajos se han desarrollado en la península ibérica y parte de América del Sur, especialmente en Chile, Brasil y Argentina (figura 1)

² Instituto Superior Técnico de Portugal - IST. <http://www.ist.utl.pt/>

³ POSIX 1003.9-1992. *POSIX FORTRAN 77 Language Interface – Part 1: Binding for System Application Program Interface API*. IEEE

⁴ Se basa en el movimiento relativo de un fluido al pasar por un punto fijo

⁵ Se basa en la trayectoria del fluido seguida en tiempo y espacio



P | *Figura 1.- Regiones dónde se ha aplicado el modelo MOHID.*

MOHID ha sido analizado por diversos autores para estudiar su funcionalidad y aplicabilidad dado el constante desarrollo de nuevas funciones y particularidades. Uno de los trabajos de análisis más completos fue desarrollado por Barreto I., Ezzatti P., Fossati, M. 2009. MOHID utiliza una aproximación de volúmenes finitos para discretizar el dominio de cálculo. La aproximación basada en volúmenes finitos permite usar coordenadas verticales genéricas, dependiendo del proceso principal del área a estudiar o investigar. En el caso de MOHID se puede utilizar el modelo para realizar simulaciones en una, dos o tres dimensiones.

En las últimas versiones, el modelo está basado en la programación orientada a objetos; mientras que para la implementación se utilizó el lenguaje Fortran 95. El diseño establece una jerarquía de módulos permitiendo así que cada módulo se encargue de manejar la información específica referente a su propósito.

Existen versiones del modelo implementadas para correr tanto sobre sistemas operativos Windows como sobre Linux. Además ofrece lineamientos para poder extender el modelo para ser utilizado en otros sistemas operativos.

Se ha desarrollado una interfaz gráfica (MOHID GUI) para utilizar los ejecutables pero solamente es posible ejecutarlo en el sistema operativo Windows, ya que la interfaz está implementada sobre la plataforma Microsoft .NET. Por otro lado, se permite operar el modelo a través de la línea de comandos.

Un aspecto importante de MOHID es que utiliza la metodología de modelos anidados. A través de esta estrategia es posible anidar grillas de resolución espacial de manera creciente, forzando los modelos locales con resultados de aplicaciones de mayor escala. De esta forma, el modelo permite estudiar áreas cada vez más cercanas a la región de interés, a partir del pasaje de las condiciones de borde del modelo “padre” hacia el modelo anidado (“hijo”), aumentando en general la resolución. Una particularidad importante del modelo es que permite utilizar diferentes pasos de

tiempo en los diferentes modelos encajados, restringiendo únicamente que los pasos de tiempo del modelo padre sean múltiplos de los pasos de tiempo de los modelos hijos. Esta característica, permite la ejecución en paralelo de dichos modelos. El paralelismo utilizado por el framework MOHID es el de pipeline, y además, permite ejecutar diferentes modelos en diferentes procesadores comunicados a través del de mensajes utilizando el estándar MPI⁶. Es importante considerar que la opción de emplear la versión paralela, obliga a que los pasos de tiempos de los diferentes modelos sean iguales (entre el padre y el hijo) para que no ocurran incoherencias en los valores que estén simulando los diferentes procesos.

En cuanto a la organización del Framework MOHID, se pueden identificar tres componentes principales:

Herramientas numéricas, permiten el cálculo de los diferentes modelos y otras herramientas auxiliares.

Traspaso y almacenamiento de datos, se encarga de guardar la información producida por el modelo.

Interfaces de usuario (GUI's), permite el manejo de datos de entrada, control de ejecución del programa y análisis de resultados.

Módulos

La actual versión de MOHID está basada en programación orientada a objetos, implementado a través del lenguaje Fortran 95. Si bien el lenguaje no está especializado en este aspecto, puede ser utilizado para implementarlo tomando ciertas precauciones.

MOHID se divide en módulos de Fortran95 que hacen a su vez de clases del sistema. Esto permite a MOHID utilizar algunas de las principales características de la orientación a objetos como polimorfismo, encapsulación, herencia y sobrecarga de funciones. Además, permite que cada módulo sea responsable de manejar ciertos datos asociados a cada uno, así como el manejo de la memoria asociada a estos datos, la cual se reserva dinámicamente. Todos los módulos (objetos) tienen cuatro familias de funciones estándar, estas son, constructor, los métodos selectores, los métodos modificadores y el destructor.

El intercambio de la información entre módulos se realiza bajo el esquema cliente-servidor. Esto significa que cuando una clase necesita algún valor que no pertenece a él, se lo solicita a la clase encargada de manejar ese atributo. Esta estrategia permite asegurar que la información sea encapsulada por cada módulo.

Mohid Water

⁶ Message Passing Interface. estándar que define la sintaxis y la semántica de las funciones contenidas en una biblioteca de paso de mensajes diseñada para ser usada en programas que exploten la existencia de múltiples procesadores

El módulo MOHID WATER es un programa numérico en dos o tres dimensiones que simula diversos procesos que ocurren en cuerpos de agua como ríos, reservas, estuarios, áreas costeras u océanos. Es uno de los programas principales dentro del sistema de modelación MOHID. El programa se compone de una serie de módulos que están contruidos sobre las bibliotecas MOHID BASE 1 y MOHID BASE 2 y que primordialmente se encargan de calcular los procesos físicos y biogeoquímicos, además del manejo de la lectura y escritura de los datos requeridos por el modelo.

El módulo fue diseñado para simular sistemas acuáticos considerando además los procesos de intercambio con otras condiciones de contorno, por ejemplo la interacción con la atmósfera y con el fondo de cuerpo de agua.

La configuración de módulos de MOHID se organiza en seis grandes grupos funcionales, cada uno de ellos compuesto por diversos módulos:

Módulos de parámetros generales: se encargan de manejar parámetros generales, como el tiempo de simulación, funciones o variables globales:

GlobalData posee principalmente información estática como los identificadores de dominios (generalmente numéricos), identificadores de tipos de error, constantes, parámetros y algunos tipos de datos derivados, usados frecuentemente en otras clases.

Time posee funciones para el manejo del tiempo en MOHID.

Módulos de funciones independientes: Administran operaciones específicas que no se pueden representar en otros módulos o que dada la complejidad de lo que resuelve deben estar en un módulo separado:

Functions calcula diferentes funciones matemáticas o científicas. Este módulo puede ser visto como una biblioteca matemática disponible a todas las clases.

Triangulation construye una triangulación de Delaunay con el objetivo de proveer la interpolación de niveles (“Gauge”) en la frontera abierta del dominio.

- Module LUD resuelve sistemas de ecuaciones lineales (se encuentra dentro de la biblioteca Mohid Base 1).

Módulos estructurales: son los encargados de la discretización de la geometría del dominio, transformaciones geométricas y referencias para moverse en la jerarquía de los dominios. Se nutre de variables como distancias, áreas, volúmenes, etc:

- Module HorizontalGrid maneja la discretización horizontal.
- Module HorizontalMap realiza un mapeo horizontal de la grilla en 2D.
- Module Map realiza el mapeo 3D de las celdas de la grilla.
- Module Geometry maneja diferentes formas de discretización vertical.

Módulos de manejo de datos: realizan operaciones de entrada/salida:

- Module EnterData lee y escribe archivos en formato ASCII⁷, realiza la lectura de los archivos de entrada y genera los archivos de salida de la simulación.

⁷ Acrónimo inglés de American Standard Code for Information Interchange

- Module HDF5 lee y escribe los datos de diferentes matrices en formato HDF5.
- Module TimeSerie lee y escribe archivos con información de la simulación a medida que avanza la ejecución.

Módulos de funciones específicas: implementan operaciones específicas que pueden ser utilizadas solamente por MOHID:

- Module BoxDif se encarga principalmente de inicializar las propiedades definiendo cajas. Una caja o box file define un área en 2D o 3D. Estas áreas pueden ser usadas para inicializar diferentes propiedades o integrar valores entre las diferentes cajas, esto se aplica o se puede aplicar para todas las variables modeladas. Otra característica del módulo BoxDif es que integra los valores de las variables que modela en espacio y tiempo dentro de una caja y entre diferentes cajas. Las operaciones que realiza este módulo se pueden aplicar en un dominio de dos o tres dimensiones.
- Module Statistics computa operaciones estadísticas básicas (en el espacio y tiempo) y va almacenando resultados de interés durante la simulación.
- Module Interface transfiere información (condiciones de fuerza y variables de estado) entre las estructuras de grillas de una, dos y tres dimensiones hacia arreglos unidimensionales y para llamar a los procedimientos de los módulos bioquímicos de dimensión cero.
- Module WaterQuality es un módulo que calcula la dinámica de diversos organismos o microorganismos que viven en cuerpos de agua.

Módulos de procesos, son módulos que corresponden a los diferentes procesos que tienen lugar en los diferentes compartimentos del medio.

Model

Es el módulo principal en la arquitectura del sistema. El módulo Model maneja toda la información de un solo modelo. Es responsable de construir, modificar y destruir cada modelo. También se encarga de controlar el flujo de información entre diferentes modelos y la evolución del tiempo de simulación. Coordina la ejecución del módulo Hydrodynamic y el módulo Transport; y depende de los módulos Hydrodynamic, WaterProperties y Lagrangian.

La coordinación de ejecución del modelo consiste en la actualización del tiempo global del modelo y la actualización de los módulos Transport e Hydrodynamic en un solo modelo.

Cuando se trabaja con modelos encajados las comunicaciones entre modelos se hacen en una sola vía y de forma recursiva, es decir, las condiciones iniciales y otros datos que se calculan durante la simulación se envían desde el padre al hijo.

Geometry

El módulo Geometry almacena y actualiza la información sobre los volúmenes finitos, calculando las áreas laterales y los volúmenes de la discretización según la demanda. Para realizar estos cálculos se basa en la elevación de la superficie libre calculada por el módulo hidrodinámico y en los datos batimétricos del dominio ingresados.

El enfoque de volúmenes finitos usado en MOHID permite que la resolución de las ecuaciones de conservación sea independiente de la geometría de cada celda o volumen de control, debido a que solo se requiere el flujo a través de las caras de la celda. De esta manera se logra una separación total entre las variables físicas y la geometría. Como los volúmenes pueden variar a lo largo de la simulación, la geometría es calculada y/o actualizada en cada paso de simulación después de calcular las variables físicas. Además, las coordenadas espaciales son independientes entre sí y se puede elegir cualquier geometría en cualquier dimensión. En la dirección horizontal se puede usar tanto coordenadas cartesianas como curvilíneas y en la dirección vertical pueden utilizarse coordenadas verticales genéricas con diferentes subdominios. De hecho, el módulo Geometry puede dividir la columna del cuerpo de agua en diferentes tipos de coordenadas como Sigma (coordenadas diseñadas para simular variaciones importantes del fondo dado que siguen la forma del terreno), Cartesianas, Lagrangianas, de Espaciamiento Fijo (Fixed Spacing), Armónicas, etc.

El módulo Geometry proporciona datos a los módulos lagrangian, turbulence y water properties.

Hydrodynamic

El módulo Hydrodynamic calcula el nivel, la velocidad y el flujo de agua en cada paso de tiempo. La discretización espacial es realizada por una aproximación de volúmenes finitos y la discretización temporal se realiza con un algoritmo semiimplícito ADI (Alternating Direction Implicit); Este algoritmo computa alternativamente una componente de la velocidad horizontal implícitamente mientras la otra es calculada explícitamente. El sistema de ecuaciones resultantes es tridiagonal y por lo tanto puede ser resuelto de manera eficiente por el algoritmo de Thomas; este algoritmo se presenta en el Anexo C.

Lagrangian

Es un modelo de transporte lagrangiano (gestiona las mismas propiedades que el módulo WaterProperties). Puede ser utilizado, por ejemplo, para la simulación de la dispersión del petróleo. El módulo lagrangiano del MOHID utiliza el concepto de trazador, cuyas propiedades fundamentales son la posición espacial (x, y, z) de las partículas utilizadas como trazadores, su volumen y la concentración de 17 determinadas propiedades de interés, como pueden ser cualquiera de las evaluadas en el módulo de calidad de aguas (por ejemplo algún contaminante).

Oil

El módulo Oil se encarga de la simulación del movimiento de derrames de petróleo. Este tipo de herramientas cobran vital importancia a la hora de desarrollar planes de contingencia, permitiendo mitigar alguna catástrofe con este producto en el mar. El módulo también permite la evaluación de algunas características del impacto ambiental asociado al movimiento de petróleo. Por ejemplo, MOHID fue utilizado para calcular el posible impacto y el movimiento de la mancha de petróleo en la catástrofe del buque Prestige en las costas de Galicia en Noviembre de 2002.

El módulo Oil depende de los módulos Surface (presión atmosférica, oleaje, viento), WaterProperties (salinidad, temperatura, sedimentos cohesivos), Lagrangian.

WaterProperties

El módulo WaterProperties coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua utilizando un modelo Euleriano de transporte. Para llevar a cabo esta tarea, se apoya o usa otros módulos como el de AdvectionDifussion (Advección-Difusión), encargado de calcular el transporte (por difusión o advección) de las propiedades, o el módulo WaterQuality (calidad del agua), el cual es uno de los tres módulos encargados de calcular procesos biogeoquímicos.

A través de este módulo, MOHID es capaz de simular diferentes propiedades como la temperatura, salinidad, sedimentos cohesivos, fitoplancton, nutrientes y contaminantes, entre otros.

WaterQuality

El módulo WaterQuality simula la producción primaria y secundaria, y el ciclo de los nutrientes de ecosistemas. Los forzantes principales son la temperatura y la luz.

El módulo fue desarrollado en términos de fuentes y sumideros de ciertas propiedades, o dicho de otra manera, definiendo flujos de entrada y salidas al sistema, lo cual permite un fácil acoplamiento al módulo de transporte en ambas

formulaciones, Euleriana y Lagrangiana. Debido a la interdependencia de las propiedades, un sistema lineal de ecuaciones es calculado para cada volumen de control.

Surface

El módulo Surface plantea las condiciones de frontera en la superficie de la columna de agua y representa la influencia de forzantes externos atmosféricos como el viento y el sol en la superficie del agua.

Hay dos tipos de condiciones. Una dada por el usuario, usualmente datos meteorológicos (velocidad del viento, temperatura del aire, etc), y otra como condiciones de borde calculadas automáticamente por el modelo a partir de las condiciones o datos meteorológicos.

FreeVerticalMovement

El módulo FreeVerticalMovement calcula las propiedades del flujo vertical. Básicamente se usa para determinar el movimiento vertical del flujo (en la dirección vertical). Usualmente se utiliza este módulo para calcular la velocidad de caída al simular sedimentos cohesivos, o la velocidad de distintas partículas en las simulaciones de transporte.

HydrodynamicFile

El módulo HydrodynamicFile es un módulo auxiliar que le permite al usuario de MOHID integrar espacial y temporalmente la solución obtenida con el modelo en un archivo.

La integración espacial consiste en unir varias celdas para tratarlas como una sola.

Por otro lado, la integración temporal consiste en juntar varios pasos discretos de tiempo de la solución hidrodinámica y puede ser directamente conectada con la integración espacial.

Turbulence

El módulo Turbulence calcula los coeficientes de viscosidad horizontal y vertical y las difusividades para diferentes métodos de cierre de turbulencia. Estas propiedades pueden ser calculadas de una manera simplificada utilizando coeficientes de difusión constantes. Por otro lado el usuario puede calcular la evolución de las propiedades de flujo turbulento de una manera más realista mediante el modelo GOTM (Global Ocean Turbulence Model)⁸. Una interfase de este módulo calcula los coeficientes utilizando un cierre de turbulencia de una o dos ecuaciones con la subrutina tomada del modelo general de turbulencia oceánica GOTM.

Características de la ejecución

La ejecución de un programa numérico de MOHID (water) tiene ciertas características que se mencionan en esta sección.

Descripción de los archivos de datos

El archivo nomfich.dat contiene las referencias (y las ubicaciones) de los distintos archivos de entrada o salida que maneja MOHID. En este archivo están definidas una serie de palabras clave (Keywords) que hacen referencia a cada uno de los archivos de

⁸ Sitio web de GOTM (General Ocean Turbulence Model). www.gotm.net

entrada o de salida. Para que la lectura de datos que realice el programa sea correcta, nomfich.dat debe ubicarse en el directorio en donde se ejecuta el modelo.

La siguiente información es una pequeña muestra de las entradas más importantes.

IN_BATIM: archivo de entrada que contiene la discretización horizontal y la batimetría de entrada (cota del fondo). Allí se define el tamaño del dominio y las coordenadas de los puntos de la grilla. Para generar la grilla y la batimetría, se utiliza la herramienta Digital Terrain Creator, ayudándose con la interfaz de usuario MOHID GIS.

DOMAIN: archivo de entrada donde se define la geometría vertical. Esta geometría puede ser dividida en diferentes tipos de coordenadas y también es posible subdividir el dominio y definir distintos tipos de coordenadas en cada uno.

IN_MODEL: archivo de entrada donde se define el período a simular y la discretización temporal de la simulación, es decir, el paso de tiempo con que se resuelven las ecuaciones. También se puede especificar que no se utilizará el módulo hidrodinámico (debido a que es una solución estacionaria o porque se cargan los valores de un archivo).

Parámetros del archivo:

- start: fecha de comienzo de la ejecución.
- end: fecha de finalización de la ejecución.
- dt: tiempo transcurrido entre dos instantes de cálculo (delta t).
- splitting: el double_splitting significa que el modelo debe resolver las ecuaciones primitivas. En cambio, si se desea una solución estacionaria o que las propiedades hidrodinámicas se lean de un archivo, se pone No_Splitting.
- variabledt: chequea si el usuario desea un paso de tiempo variable durante la simulación (0 significa que no).
- **IN_DAD3D:** es el archivo de entrada donde se definen las condiciones de resolución del módulo hidrodinámico. Se especifican distintas opciones relacionadas con los forzantes de la simulación, como por ejemplo la definición de los valores iniciales para cada celda de volumen finito, o la definición del tipo de condiciones de

borde abiertas en la dirección horizontal y en la dirección vertical o la definición de la frecuencia con que se almacenan resultados, entre otros.

- **BOT_DAT:** es el archivo de entrada donde se definen las condiciones de borde en el fondo para el módulo correspondiente.
- **IN_TURB:** es el archivo de entrada donde se definen las condiciones que se utilizarán en el módulo Turbulence.

Construcción del dominio

Para la construcción del dominio en MOHID para el área de estudio, primero se inicializan las variables que almacenan los datos asociados a una grilla o modelo. Luego cada grilla definida se agrega a una lista (lista encadenada simple) que contiene todos los modelos (padre y todos los modelos encajados, anidados, también llamados hijos o subdominios) cada uno con un identificador (para ser usado en caso que corresponda con MPI). Previamente se debe leer el archivo "Tree.dat" para saber cuántos modelos y submodelos posee la simulación y la ubicación de los archivos de

entrada. Luego para cada modelo, comenzando por el padre, se leen los archivos de entrada y la malla horizontal, asignando las diferentes características y propiedades a cada dominio. Luego se proporcionan los valores de la matriz de batimetría para los puntos de frontera y se asignan diferentes propiedades al dominio.

Ejecución del modelo

Después de construido todo el dominio (y todos los subdominios si fuese el caso), se prosigue con la ejecución del programa o dicho de otra forma, con la simulación del modelo. Este modelo posee ciertas características que están indicadas en los archivos que aparecen dentro del archivo nomfich.dat.

La simulación computacional de un paso de tiempo en MOHID se puede dividir en dos partes, una parte de actualización del tiempo y redefinición, si es necesario, de la frontera; y otra parte de ejecución y cálculo de acuerdo a los datos iniciales. El procedimiento que se encarga de la actualización es UpdateTimeAndMapping y el procedimiento que lleva a cabo el cálculo es RunModel.

La primer parte de actualización del tiempo que se está simulando, se basa en el campo DT definido en el archivo de entrada que se indica en la Keyword "IN_MODEL". Además se controla si se llegó al final de la simulación o no tomando en cuenta los campos start y end del archivo anteriormente mencionado.

Por otro lado, para actualizar la frontera, se toma en cuenta el nivel del agua y allí se establece qué puntos son de agua y cuales son tierra en el dominio de la simulación.

La segunda parte se dedica a realizar cálculos del modelo en sí mismo. Se resuelven las ecuaciones discretizadas según el método ADI que se implementa y se calcula la evolución en el tiempo de las variables modeladas en cada celda de la grilla, por ejemplo: velocidades, salinidad, temperatura, parámetros de turbulencia, elevación de superficie libre, etc.

Cabe mencionar que cuando se trabaja con dominios encajados se efectúa la comunicación de datos entre el modelo padre y el modelo hijo, en el cual el modelo hijo obtiene los datos de las diferentes variables de cálculo como condición de borde. Esto se realiza entre la actualización del tiempo y los cálculos del modelo. El procedimiento se llama SubModelCommunication.

Información durante la ejecución

Durante la ejecución del modelo y luego de pasada la etapa o fase de construcción aparece un mensaje "Running MOHID, please wait...". A partir de allí y cada 60 segundos de tiempo de CPU aparecen mensajes que brindan diferentes informaciones al usuario.

Time instant: muestra el tiempo de simulación transcurrido desde el inicio hasta ese momento.

Elapsed CPU Time: el tiempo de CPU que ha transcurrido desde que se inició la simulación.

Coefficient CPU / Model: es el cociente entre el tiempo del procesador usado hasta el momento y el lapso de tiempo simulado hasta el momento.

Seconds per iteration: tiempo dedicado a completar un ciclo de trabajo.

System time: fecha y hora actual del sistema.

End of the run: la fecha y hora prevista para la finalización de la simulación.

CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Área de Aplicación

El modelo ha sido aplicado sobre el área del Estero Salado delimitada por la Reserva de Producción de Fauna - Manglares El Salado (figura 2). La zona comprende un ramal desde la parte sur del dominio de cálculo el cuál se subdivide en 3 ramales hacia el norte.

El área de cálculo total comprende en el eje vertical, desde la superficie hasta el fondo del Estero.

Sobre el dominio se construyó mediante la opción GRID del programa Sufer⁹ en su versión 8.0, una malla de cálculo que luego mediante el mismo software fue transformada, para colocar los datos en el formato requerido por MOHID. Para la definición del área de cálculo se utilizaron coordenadas UTM¹⁰. Esta referencia geográfica fue posteriormente migrada a coordenadas relativas al dominio del modelo, a partir de la coordenada (0,0) en el borde inferior izquierdo. La topografía del fondo (batimetría), fue procesada con Surfer 8.0 para obtener una superficie suavizada para efectos de cálculo. En todos los casos durante el proceso de modelación se utiliza el Sistema Internacional de unidades (SI¹¹).

⁹ Golden Software, Surfer 8.0. www.goldensoftware.com

¹⁰ *Universal Transverse Mercator*, A diferencia del sistema de coordenadas geográficas, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros.

¹¹ *Le Système International d'Unités*. Creado en 1960 por la Conferencia General de Pesos y Medidas

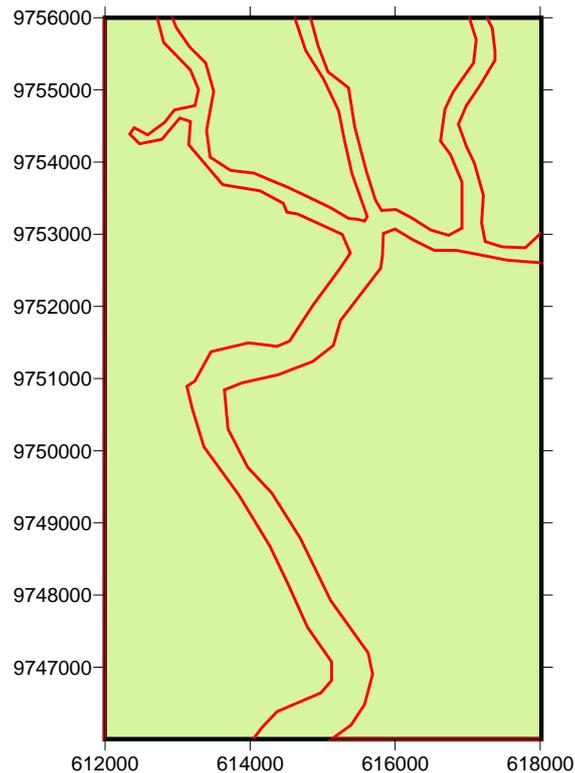


Figura 2.- Dominio de cálculo del modelo

Al producto final de datos x,y,z (longitud, latitud y profundidad) obtenidos a partir de los datos de profundidades y datos de contorno del cuerpo de agua, se los procesó para colocar códigos numéricos las zonas que no representan agua. A este proceso se lo conoce como blanqueado y es fundamental a la hora de ejecutar el modelo, ya que finalmente la zona de estudio en términos numéricos se limita a aquellos puntos x,y, z definidos como agua.

Datos de contorno

Para la determinación del perfil del estero salado se utilizó la base de datos geográficos preparada por el PMRC¹². Los datos de perfil costero (delimitación del cuerpo de agua), fueron procesados de coordenadas UTM a coordenadas internas del dominio de cálculo, mediante la digitalización de los puntos de contorno suavizados para efectos de cálculo y estabilidad numérica.

Los datos de batimetría, fueron procesados mediante interpolación numérica, utilizando el método de Kriging (Zimmerman D., et al. 1998), implementado dentro del programa Surfer. Mediante este método se generó un malla de cálculo de 119 filas y 119 columnas. El espaciamiento de cada celda representa 50 metros en sentido horizontal y 100 metros en sentido vertical. En total se obtuvieron 14.161 celdas, de las cuáles, debido a la configuración del contorno espacial, sólo 1.673 (13.4%) corresponden a celdas que representan el cuerpo de agua, el resto debió ser definido

¹² Programa de Manejo de Recursos Costeros, Ecuador - 1997

como terreno seco, donde no se realizarían cálculos numéricos. Los datos de la malla generada son los siguientes:

Grid Size:	119 rows x 119 columns
Total Nodes:	14161
Filled Nodes:	1673
Blanked Nodes:	12488

Grid Geometry

X Minimum:	612045.175
X Maximum:	617965.825
X Spacing:	50.175
Y Minimum:	9746102.9416667
Y Maximum:	9757896.0583333
Y Spacing:	99.941666666671

Grid Statistics

Z Minimum:	0.47039805261618
Z 25%-tile:	1.0507820255098
Z Median:	1.1854247426079
Z 75%-tile:	1.4279585427216
Z Maximum:	2.632848806361
Z Midrange:	1.5516234294886
Z Range:	2.1624507537448
Z Interquartile Range:	0.37717651721182
Z Median Abs. Deviation:	0.15998623730476
Z Mean:	1.2589510268455
Z Trim Mean (10%):	1.2460609966892
Z Standard Deviation:	0.32164736024201
Z Variance:	0.10345702435065
Z Coef. of Variation:	0.25548838150437
Z Coef. of Skewness:	0.86787035956929
Z Root Mean Square:	1.2993901309252
Z Mean Square:	1.6884147123459

Para la definición de los puntos que no representan al cuerpo de agua, se aplicó un técnica de blanqueo, que consiste básicamente en superponer el perfil de la línea de costa sobre la malla total y definir que los puntos que quedan dentro del perfil conservan su valor numérico del perfil batimétrico mientras que las celdas que están fuera del mismo se definen como tierra y se marcan con un valor numérico que el programa reconoce como celda vacía.

La malla de cálculo obtenida con estos parámetros es rectangular y contiene las celdas con cada valor numérico. Para el caso de la zona de estudio se definieron 5 fronteras abiertas¹³

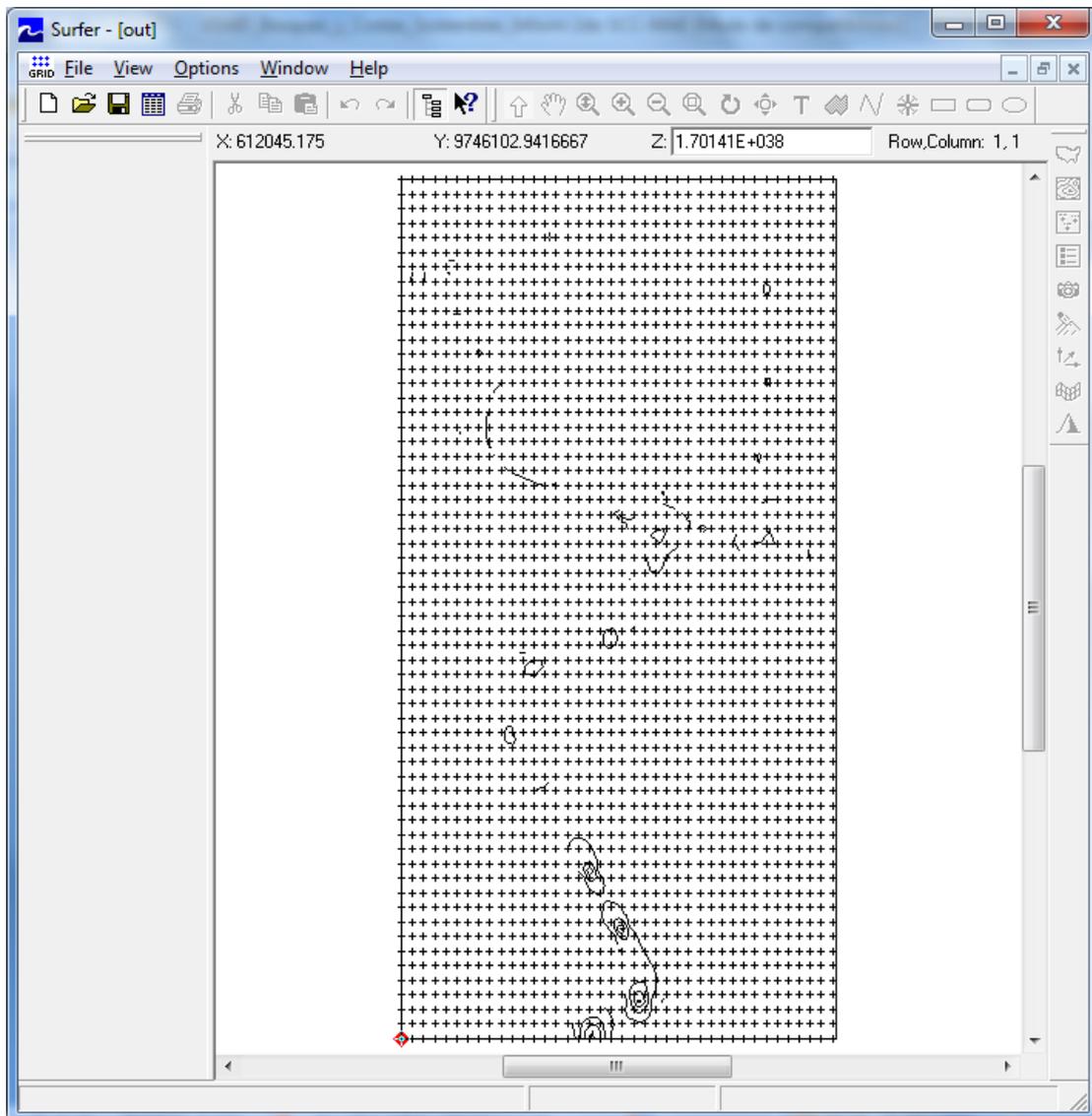


Figura 3.- Malla de cálculo luego de aplicarse el método de blanqueo

Para efectos de aplicación de la malla en el modelo numérico, fue necesario recortar los bordes, donde por efectos de interpolación se pueden generar errores. MOHID utiliza un formato ASCII para la definición de los archivos de entrada. La malla de cálculo para la entrada de datos al modelo MOHID, tiene un formato diferente a la malla rectangular que se obtiene inicialmente (figura 3). Para esto se exportaron los datos a formato ASCII obteniéndose 14.161 líneas de datos solo de lo que corresponde al área interna de la malla.

¹³ Zonas donde no existe límite terrestre en el borde del dominio de cálculo

Configuración

Se configuró el modelo bajo **dos escenarios de nivel del mar**, uno bajo **condiciones actuales** y otro considerando un **elevación de 1.5 metros** uniformemente en el dominio de cálculo. Se asume que las condiciones de contorno del perfil de costa se mantienen constantes, durante el proceso de simulación de elevación del nivel. Es decir que para efectos del modelo lo que ocurre es una elevación de la columna de agua en cada punto de la malla, pero todas las fuerzas iniciales se mantienen, al igual que el perfil batimétrico general.

Para ambos escenarios, el modelo fue configurado para que simule inicialmente la hidrodinámica de la zona de cálculo. Se definió una configuración **baroclínica**, para considerar dentro de los módulos de cálculo las condiciones de densidad del líquido a simular.

Para la configuración de la componente hidrodinámica se utilizó el módulo hydrodynamic del modelo MOHID. Este módulo puede operar con la inclusión del archivo de datos de batimetría y con el aporte de los datos de mareas.

Fue necesario hacer ajustes en los parámetros del modelo, considerando que se tiene un espaciamiento en “X” de 50 metros, un espaciamiento en “Y” de 100 metros y una profundidad promedio de 4 metros. Los ajustes se hicieron para cumplir la condición CFL¹⁴ y obtener un valor menor o cercano a 1.

$$\frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} < C$$

MOHID utiliza un paso temporal por omisión de 60 segundos. Para el caso de la configuración del modelo MOHID se utilizó un paso temporal de 10 segundos que permite cumplir la condición de estabilidad de cálculo CFL.

Configuración de módulo Hydrodynamic

En general las corridas del modelo fueron considerando la opción baroclínica para considerar las fuerzas internas dentro de las ecuaciones de movimiento. La marea fue impuesta mediante las componentes armónicas de la misma. Las corridas hidrodinámicas se realizaron durante un ciclo de marea en 24 horas.

Se anota abajo la configuración de los parámetros de módulo hidrodinámico del MOHID. Los 1 (unos) y 0 (ceros) en muchos casos implica si se considera o no esa opción para la ejecución de la componente hidrodinámica. El paso de tiempo para la grabación de resultados se escogió de una hora.

BAROCLINIC : 1

¹⁴ El Número de Courant (C) es el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito. Se aplica en la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Richard Courant, Kurt Friedrichs y Hans Lewy, 1928

```

TIDE : 1
WATER_DISCHARGES : 1
UP_CENTER : 1.0
IMPLICIT_VERTADVECTION : 1.0
IMPLICIT_VERTDIFFUSION : 1.0
DISCRETIZATION : 2
UPSTREAM : Upwind
TIME_SERIE : 1
EVOLUTION : Solve_Equations
CORIOLIS : 1
VOLUMEVARIATION : 1
HORIZONTALADVECTION : 1
HORIZONTALDIFFUSION : 1
INITIAL_ELEVATION : 0.0
INITIAL_VEL_U : 0.0
INITIAL_VEL_V : 0.0
VERTICALADVECTION : 1
VERTICALDIFFUSION : 1
VELTANGENTIALBOUNDARY : 1
VELNORMALBOUNDARY : 1
NULL_BOUND_HORADV : 1
TIDEPOTENTIAL : 1
WIND : 1
HMIN_CHEZY : 0.10
VMIN_CHEZY : 0.10
HMIN_ADVECTION : 0.50
LOCAL_DENSITY : 1
BIHARMONIC_COEF : 1e9
SUBMODEL : 0
MISSING_NULL : 0
DEADZONE : 0
BAROCLINIC_RADIATION : 1
LOCAL_SOLUTION : 1
SLIPPING_CONDITION : 1
NONHYDROSTATIC : 0
STATISTICS : 0
DT_OUTPUT_TIME : 3600.
BRFORCE : 0
OUTPUT_TIME : 0 3600.

```

Configuración de módulo Water Properties

El módulo Water Properties, sirve para configurar los parámetros que se utilizarán en la simulación de la dispersión de propiedades del agua, como temperatura y salinidad. Los parámetros configurados, se anotan en la siguiente lista

```
REFERENCE_DENSITY : 1027
```

<beginproperty>

```

NAME : temperature
UNITS : °C
DESCRIPTION : Temperatura promedio del estero.
IS_COEF : 1
PARTICULATE : 0
SPM : 0
OLD : 0
INITIALIZATION_METHOD : TIMESERIE
FILENAME : C:\Work\Simulation_4\data\DisTimeSerie.dat
DATA_COLUMN : 3

```

```

DEFAULTVALUE      : 25
ADVECTION_DIFFUSION      : 1
ADV_DIF_NUM_STABILITY    : 0
BOUNDARY_CONDITION      : 1
SCHMIDT_NUMBER_H        : 1
SCHMIDT_COEF_V          : 1
SCHMIDT_BACKGROUND_V    : 1E-08
ADVECTION_UP_DC         : 1
ADVECTION_H_IMP_EXP      : 1
ADVECTION_V_IMP_EXP      : 0
DIFFUSION_V_IMP_EXP      : 0
NULLDIF                : 0
DECAY_TIME             : 1
DISCHARGES              : 1
TIME_SERIE              : 1
BOX_TIME_SERIE          : 0
OUTPUT_TIME             : 0.3600.
OUTPUT_HDF              : 1
<endproperty>

```

```

<beginproperty>
NAME                 : salinity
UNITS                 : ups
DESCRIPTION           : salinidad promedio del estero.
IS_COEF               : 1
PARTICULATE           : 0
SPM                   : 0
OLD                   : 0
INITIALIZATION_METHOD : CONSTANT
DEFAULTVALUE         : 15
ADVECTION_DIFFUSION      : 1
ADV_DIF_NUM_STABILITY    : 0
BOUNDARY_CONDITION      : 1
SCHMIDT_NUMBER_H        : 1
SCHMIDT_COEF_V          : 1
SCHMIDT_BACKGROUND_V    : 1E-08
ADVECTION_UP_DC         : 1
ADVECTION_H_IMP_EXP      : 1
ADVECTION_V_IMP_EXP      : 0
DIFFUSION_V_IMP_EXP      : 0
NULLDIF                : 0
DECAY_TIME             : 0
DISCHARGES              : 1
DISCHARGES_TRACKING     : 0
VERTICAL_MOVEMENT       : 0
SURFACE_FLUXES         : 0
BOTTOM_FLUXES           : 0
DATA_ASSIMILATION       : 0
SED_INTERFACE           : 0
TIME_SERIE              : 1
BOX_TIME_SERIE          : 0
OUTPUT_TIME             : 0.3600.
OUTPUT_HDF              : 1
<endproperty>

```

Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada para la inicialización del modelo son la batimetría de la zona, definida en el esquema y formato que acepta el modelo, es decir en un formato lineal en código ASCII, en el cual se definen las características de la malla lineal, como dimensiones, coordenadas referenciales y los datos de los ejes y los nodos de cálculo.

Las mareas fueron generadas en base a las componentes armónicas de la curva de marea para la zona de estudio. La curva de marea generada está basada en las componentes astronómicas que contribuyen en la amplitud y fase de la marea en la zona. Se utilizaron 19 componentes armónicos y fueron colocados en los formatos aceptados por MOHID para su aplicación.

Una vez configurados los parámetros de entrada y las condiciones de contorno, se realizó la simulación hidrodinámica de la zona con el objeto de calibrar el modelo hasta obtener, en puntos aleatorios dentro del dominio, curvas de nivel del mar que se ajusten a lo observado en la zona y valores de corrientes que representen de igual forma a las mediciones realizadas en el estero. De acuerdo a esto se realizaron los ajustes en las variables de configuración y se obtuvieron mareas con una amplitud aproximada de 2.8 metros, como promedio a los valores encontrados en la zona, donde por la compleja configuración y la fricción hidráulica las amplitudes de marea encontradas a la entrada del Golfo se incrementan a medida que ingresan al Estero Salado, encontrándose valores entre 2.1 y 3.6 metros (ESPOL, 2009).

Posteriormente a la calibración de la curva de marea en cuanto a la amplitud y la fase semi-diurna que existe en la zona, se realizó la calibración mediante la simulación de las corrientes superficiales, en todo el dominio, durante dos ciclos completos de marea. Para efectos de control y seguimiento, se definieron 3 puntos para visualización de datos en función del tiempo. Uno de los puntos se lo ubicó al sur del área y dos al norte en el ramal derecho y ramal izquierdo (figura 4)

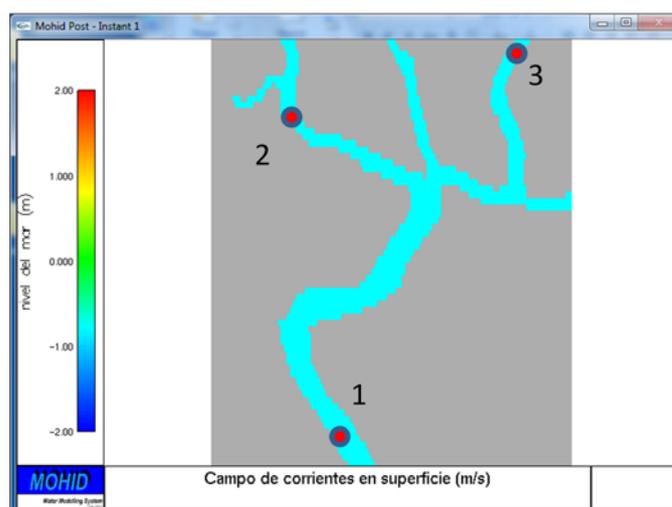


Figura 4.- puntos de control de mareas y corrientes superficiales

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Hidrodinámica

Se realizó la modelación hidrodinámica para determinar los patrones de circulación en todo el dominio de cálculo. Para ello se configuró la salida del modelo para observar los resultados de las corrientes en su composición de vectores horizontales X y verticales Y . Los valores de corrientes calculados en el punto de control 1, se presentan en la figura 5. El resto de resultados en los demás puntos de control y bajo el escenario de incremento del nivel del mar, se presenta en los Anexos de figuras.

Se observa que en la zona a la entrada sur del área de estudio las corrientes son superiores durante **el flujo**¹⁵ de marea, que durante **el refluj**¹⁶. Se observa de acuerdo a los resultados de evolución de la curva de marea que el **tiempo de duración del flujo** es superior al **tiempo de duración del refluj**.

En los canales de menor dimensión, al norte del dominio de cálculo, **la velocidad es mayor durante el refluj**, es decir cuando el agua que ha ingresado al interior del Estero regresa fuera del mismo.

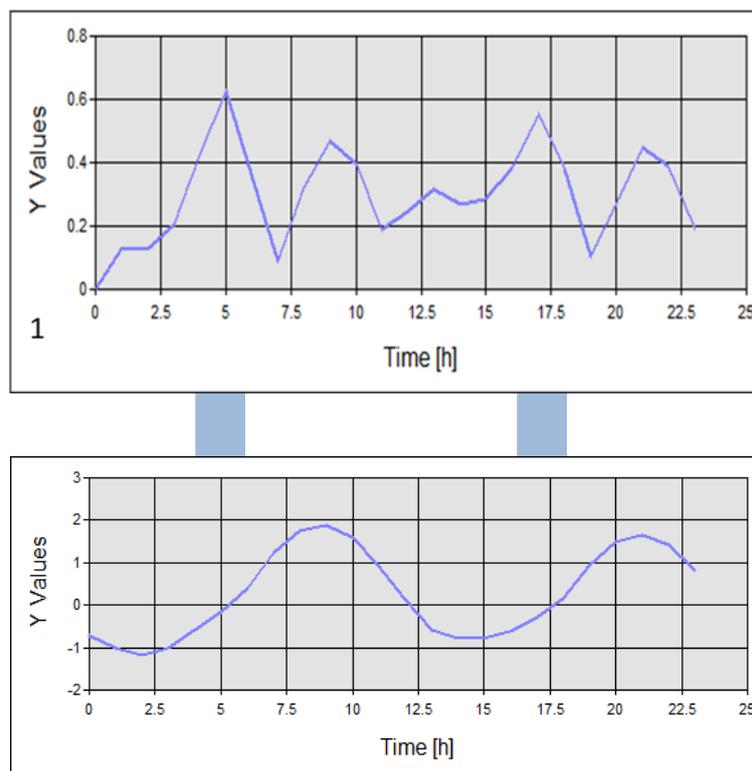


Figura 5.- Corrientes superficiales (panel superior) y marea (panel inferior) en el punto de control 1.

¹⁵ Ingreso de agua al Estero por acción de la marea, también conocido como llenante

¹⁶ Salida de agua del Estero por acción de la marea, también conocido como vaciante

Flotadores

Se configuró el modelo para simular el desplazamiento de flotadores “lanzados” desde un punto central del área de estudio. Se programó el módulo lagrangiano de MOHID para generar flotadores cada 10 minutos que se desplacen por acción de las corrientes. Se buscaba observar la trayectoria que seguirían y tener una idea del tiempo de permanencia en la zona, así como determinar posibles áreas de acumulación de elementos materiales (figura 6).

Los experimentos de lanzamiento de flotadores se configuraron de manera exactamente igual para los escenarios de condiciones normales y los de escenario de condiciones de elevación de nivel del mar, que para el caso del modelo representa una elevación la columna de agua de cada celda de cálculo.

Se encontró que existe una diferencia en el desplazamiento de los flotadores según el escenario planteado. En el caso de condiciones normales, el desplazamiento denota una **concentración en ciertas zonas del área de estudio**. En el caso del escenario bajo condiciones de elevación hipotética del nivel mar (1.5 metros), los **flotadores tienden a salir del área de estudio** y la concentración de flotadores en alguna zona se torna menos evidente, aún cuando las condiciones iniciales son exactamente las mismas.

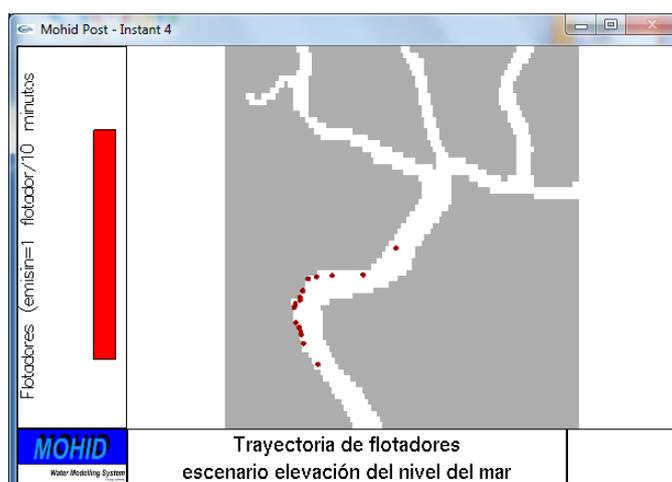


Figura 5.- Flotadores a la deriva. Simulación de la posición 4 horas luego de su emisión.

Propiedades del agua

La simulación de la dispersión de temperatura y salinidad se realizó mediante el módulo Water properties, utilizando datos promedio de temperatura y salinidad. La Temperatura fue simulada en base a una variación diurna de sus valores, desde 24 durante el día hasta 20 grados en la noche. Para la salinidad se utilizó un valor promedio general de 14 ups¹⁷.

¹⁷ Unidades Prácticas de Salinidad

Se encontró que ambas propiedades, tanto temperatura como salinidad, no sufren cambios significativos en ambos escenarios. Si bien, dado que la circulación no es la misma en los casos analizados, se podría decir que la **distribución de temperatura y salinidad no sufriría cambios significativos** en cuanto a su distribución dentro del sistema de la Reserva El Salado en condiciones forzadas por el cambio climático.

La distribución espacial y temporal de las propiedades del agua, parece no sufrir cambios importantes cuando se incrementa el nivel del agua.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La modelación hidrodinámica de las corrientes y mareas, indica que las corrientes, son **superiores en magnitud, cuando ingresa agua al estero**, de igual forma se observa que **el tiempo de duración de este flujo es superior al tiempo de duración del refluo**, esto en el límite sur del área de estudio. Al norte, en los **canales interiores, la velocidad de la corriente en el refluo es mayor**. Estas diferencias provocan que en el Estero Salado **el tiempo de residencia de partículas de cualquier naturaleza sea elevado**, sobre todo en las zonas donde el canal se ensancha.

Esta situación se ve reflejada en los resultados de la simulación de la deriva de flotadores virtuales, los cuales permanecen el área de cálculo, al menos durante el **período de simulación de dos días**, con una tendencia a concentrarse en el punto de emisión, que para el caso hipotético de estudio fue el centro del dominio.

Cuando se analiza el caso del escenario con **elevación hipotética del nivel del mar**, las condiciones hidrodinámicas se alteran, y aunque solo se considera una elevación de la columna de agua en cada celda de cálculo, se observa que las **corrientes superficiales y el desplazamiento de los flotadores se incrementan**.

El incremento de las magnitudes de corrientes y la menor concentración de materiales suspendidos bajo el escenario de elevación de nivel del mar, hace suponer **que bajo estas condiciones la capacidad de de recambio de agua en el sistema será más elevada**. Esto lleva a establecer dos escenarios posibles, uno dónde la mayor capacidad de remoción de contaminantes provoque una mejora natural de la calidad del medio acuático por efectos del aporte de agua con mayor cantidad de oxígeno desde el exterior de la reserva, y **otro escenario donde ese incremento provoque que la zona de contaminación por materiales suspendidos se incremente**.

En este sentido, la **mayor o menor calidad del agua dentro de la Reserva de Producción de Fauna - Manglares El Salado dependerá de la mayor o menor calidad de agua en todo el sistema**, debido a que si bien por una lado los procesos de circulación y recambio se incrementan, de igual manera estos pueden contribuir a acelerar los procesos de contaminación internos.

Los **efectos termohalinos¹⁸ no parecen tener acción sobre la circulación general**, al que está casi totalmente manejada por los **efectos de marea**.

¹⁸ La combinación de temperatura y salinidad

CONCLUSIONES

El modelo MOHID, logra representar con **una muy buena aproximación los procesos hidrodinámicos dentro de la Reserva de Producción de Fauna - Manglares El Salado**, por lo que sería interesante configurar el mismo a escalas menores para observar los procesos internos en mayor detalle. Esto dependerá de la disponibilidad de datos a mayor resolución de lo que actualmente existen.

Bajo las condiciones actuales el **sistema acuático de la Reserva de Producción de Fauna - Manglares El Salado tiende a concentrar elementos suspendidos, en ciertas zonas, cercanas al punto de ingreso**, es decir el desplazamiento de los mismos es relativamente corto, como para alcanzar a salir de la zona en repetidos ciclos de marea.

En un **escenario hipotético de elevación del nivel mar, los patrones de circulación se incrementan y la concentración de elementos suspendidos es evidentemente menor**, lo que supone un mayor intercambio de agua dentro del sistema.

Es posible **inferir que un incremento en el nivel del mar provocaría un incremento en la intensidad de los procesos físicos**. Por esta razón la calidad del agua del sistema de la reserva, dependerá de la calidad del sistema en su conjunto.

Las **propiedades de temperatura y salinidad del agua, no se ven significativamente afectadas**, lo que sumado a que su efecto sobre la circulación general en la zona es débil, se puede concluir que una alteración en el nivel del mar no provocará cambios importantes en su distribución. Bajo el caso hipotético de un incremento en los valores de temperatura del agua, provocados por calentamiento global, o cambios en la salinidad por efectos de aporte de agua dulce de lluvias, **la distribución espacial de estas propiedades no cambiaría dentro de la reserva**, donde la hidrodinámica la gobierna básicamente, el efecto astronómico de las mareas.

En términos generales, los cambios en los parámetros físicos que podría **provocar el calentamiento global no parecen suponer un cambio significativo dentro del sistema acuático, donde más importancia cobran los efectos de calidad y salud ambiental del ecosistema circundante**.

ANEXO 1: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. J. Santos. Modelo Hidrodinâmico Tridimensional de Circulação Oceânica e estuarina. Ph. D, Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995
2. A. M. Davies, J. E. Jones, J. Xing. (1997) Review of Recent Developments in Tidal Hydrodynamic Modeling. I: Spectral Models. *Journal of Hydraulic Engineering* **123**:4, 278 Online publication date: 1-Jan-1997.
3. ARAKAWA, A. and V. R. Lamb, 1977: Methods of computational physics, Academic Press, 174-265.
4. Barreto I., Ezzatti P., Fossati, M. Estudio Inicial del Modelo MOHID. PEDECIBA Informática. Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Uruguay, 2009
5. CEMA - ESPOL (2009). Centro de Estudios del Medio Ambiente. Informe Monitoreo Ambiental del Dragado de Mantenimiento del Canal de Acceso al Puerto Marítimo de Guayaquil. Guayaquil, Ec., 2009.
6. F. Martins. Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica. Ph. D, Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1999
7. FÍRMINO, N., Días J. Leitao P. (2006). Three-dimensional modelling of a tidal channel: Espinheiro channel (Portugal). Conference paper. Astoria Oregon, USA. PECS2006.
8. Google Earth, PRO 2010. Procesamiento de Imágenes Quick Bird.
9. INOCAR, (1996). Acta Oceanográfica del Pacífico. Clasificación de los períodos de lluvias (Precipitaciones acumuladas anuales hasta marzo 18/93). Ec., 1996.
10. IPCC, (2007). Cambio Climático. Informe de síntesis: Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
11. MOREANO, H., (1983). Interacción Océano – Atmósfera sobre la zona costera del Ecuador. Acta Oceanográfica del Pacífico, INOCAR, Volumen 2 N°1.

12. P. C. Leitão. Modelo de Dispersão Lagrangiano Tridimensional. Ms. Sc. Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1996.
13. PORTELA, L., Neves R, (1992). Modelação de processos de circulação e de transporte: aplicação ao estuário do Tejo. Proceedings, Vol. I -H 1. 13. Universidade de Coimbra, Coimbra. Conference paper.
14. SERGUEI, Lonin. Aplicación de Modelo MH3D para el Golfo de Guayaquil, INOCAR 2003.
15. Sitio web de la Wiki del modelo MOHID. www.mohid.com/wiki
16. William F. Ames, *Numerical Method for Partial Differential Equations*, Section 1.6. Academic Press, New York, 1977. ISBN 0-12-056760-1
17. Zimmerman, D.A. et al. (1998) A comparison of seven geostatistically based inverse approaches to estimate transmissivities for modelling advective transport by groundwater flow, *Water Resource. Res.*, v.34, n.6, p.1273-1413