



UNIVERSIDAD DEL MAR CAMPUS PUERTO ESCONDIDO

**SIMULACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES A
FUTURO EN LAS PLAYAS DE PUERTO ESCONDIDO
OAXACA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INFORMÁTICA**

**PRESENTA
DARWIN SOSA GÓMEZ**

**DIRECTOR DE TESIS
M. EN C. ISIDRO MOCTEZUMA CANTORÁN**

PUERTO ESCONDIDO, OAXACA

2010

Dedicatoria

*Por ser parte importante en mi vida, formación profesional y desarrollo de este proyecto,
dedico este trabajo de tesis a los siguientes.*

Julia Salinas Pérez.

Leonor Gómez Salinas.

July Gómez Salinas.

Rossy Gómez Salinas.

Mis madres

Iván y Joaquín

Mis hermanos

M. en C. Manuel Alejandro Valdés Marrero

*Profesor investigador y Jefe de Carrera de la
Licenciatura en Informática*

M. en C. Isidro Moctezuma Cantorán

Profesor Investigador y Director de Tesis

M. en C. Jorge Ochoa Somuano

Profesor Investigador y Revisor de Tesis

M. en C. Julieta Karina Cruz Vázquez

Profesora Investigadora y Revisora de Tesis

Agradecimientos

A Dios que me ha heredado el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo, "el intelecto".

Agradezco infinitamente a mi alma mater, porque en su regazo me ha brindado formación profesional de calidad y porque ha hecho de mí un hombre comprometido con su legado, asimismo quiero y debo agradecer de forma muy especial a todos mis maestros pues han sido ellos el pilar sobre el cual hoy descansa mi discernimiento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por confiar en mi capacidad y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto y de la misma forma por haberme hecho acreedor al apoyo económico para el desarrollo del mismo.

Al M. en C. Isidro Moctezuma Cantorán, profesor investigador de esta prestigiosa casa de estudios y director de este proyecto, por la instrucción brindada para el desarrollo de este trabajo, por haberme seleccionado y poner en mí su confianza para poder desarrollarlo.

A mis compañeros de generación, a quienes jamás encontraré la forma de agradecer el cariño, comprensión y apoyo brindado en los momentos buenos y malos de mi vida, porque han sido para mí hermanos de batalla, confidentes y amigos, pues de ellos he aprendido diversas lecciones de vida y porque juntos hemos hecho realidad nuestro sueño.

A mi familia, quienes sin escatimar esfuerzo alguno sacrificaron gran parte de su vida para educarme, porque cada uno de ellos ha sido parte importante de este peregrinar que para mí apenas inicia. Porque cada palabra de aliento es un escalón para subir peldaño a peldaño en el desempeño de mi vida personal y profesional.

A una de las mujeres más importantes de mi vida, por su corazón tan grande y el amor que por mí siente, mamita agradezco infinitamente las plegarias que elevas al cielo en mi nombre, palabras de ánimo y aplausos para exhortarme en cada momento a buscar el cumplimiento de mis sueños. Hoy, aquellas tardes de fantasía son ya una vida completa de realidades, te amo.

Resumen

El presente proyecto de tesis titulado “Simulación de dispersión de contaminantes a futuro en las playas de Puerto Escondido Oaxaca”, tiene como propósito principal desarrollar simulaciones respecto a la contaminación microbiológica de la Bahía Principal y Playa Colotepec de Puerto Escondido, por la dispersión de las bacterias *Enterococcus faecalis* y *Escherichia coli*. Asimismo pretende mostrar un panorama de contaminación para el año 2012 en las zonas antes mencionadas en tres épocas del año diferentes, mismas que se distribuyen en tres escenarios de simulación: afluencia turística alta, que se da en el mes de abril, lluvias con afluencia turística normal, que se da en el mes de agosto y lluvias con afluencia turística baja, que se da en el mes de octubre. Dichos escenarios se determinaron con base en la concurrencia turística de Puerto Escondido y las épocas del año (lluvias y secas).

Las simulaciones para cada escenario fueron desarrolladas usando el modelo MOHID (MOdelo HIDrodinâmico, en portugués) y con base en los datos obtenidos durante el proceso de muestreo en el proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)” desarrollado por profesores investigadores de la Universidad del Mar y financiado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), para el cual ésta tesis ha colaborado satisfactoriamente con su desarrollo.

Abstract

This project, entitled “Simulation of future contaminant dispersion in the beaches of Puerto Escondido Oaxaca” has the main purpose of developing simulations respect to main Bay and Beach Colotepec Puerto Escondido microbiological contamination due to dispersion of *Enterococcus faecalis* and *Escherichia coli* bacteria. It also pretends to show a clear view of the contamination for the year 2012 in the above areas in three different seasons, these are distributed in three simulation scenarios: high tourist influx; given in april, normal tourist season rains with; given in august and low tourist influx rains with, given in october. These scenarios were determined based on the tourist attendance of Puerto Escondido and the year seasons (rains and dry seasons).

The simulations for every year scenario was developed using the MOHID model (MOdelo HIDrodinâmico, in Portuguese) and based on data obtained during the sampling process in the “Study of the classification of beaches in Puerto Escondido (characterization and analysis)” project developed by researchers from Universidad del Mar and financed by the National Commission of Water (CONAGUA) and the National Board of Science and Technology (CONACyT), for which this thesis has satisfactory contributed with its development.

CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	iii
LISTADO DE TABLAS	viii
LISTADO DE ECUACIONES	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	8
2.1. Estado del arte y trabajos relacionados	9
2.2. Justificación.....	16
2.3. Planteamiento del problema	18
2.4. Objetivos	18
2.5. Alcances y límites del estudio	19
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	22
3.1. Concepto de simulación	23
3.2. Modelos matemáticos.....	23
3.3. Herramientas de software auxiliares en simulación	25
3.4. El modelo MOHID.....	26
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL TEMA.....	29
4.1 Configuración del modelo MOHID	32
4.2. Calibración del modelo MOHID	44
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	61

ANEXO A. EL ENTORNO DE TRABAJO MOHID	67
ANEXO B. SIMULACIONES <i>E. coli</i> AGOSTO 2012 BAHÍA PRINCIPAL	85
ANEXO C. SIMULACIONES <i>Enterococcus faecalis</i> AGOSTO 2012 BAHÍA PRINCIPAL	89
ANEXO D. SIMULACIONES <i>E. coli</i> OCTUBRE 2012 BAHÍA PRINCIPAL	93
ANEXO E. SIMULACIONES <i>Enterococcus faecalis</i> OCTUBRE 2012 BAHÍA PRINCIPAL	97
ANEXO F. SIMULACIONES <i>E. coli</i> ABRIL 2012 PLAYA COLOTEPEC	101
ANEXO G. SIMULACIONES <i>Enterococcus faecalis</i> ABRIL 2012 PLAYA COLOTEPEC	105
ANEXO H. SIMULACIONES <i>E. coli</i> AGOSTO 2012 PLAYA COLOTEPEC	109
ANEXO I. SIMULACIONES <i>Enterococcus faecalis</i> AGOSTO 2012 PLAYA COLOTEPEC	113
ANEXO J. SIMULACIONES <i>E. coli</i> OCTUBRE 2012 PLAYA COLOTEPEC	117
ANEXO K. SIMULACIONES <i>Enterococcus faecalis</i> OCTUBRE 2012 PLAYA COLOTEPEC	121
REFERENCIAS	125

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1. Batimetría de la laguna Ria Formosa, con el sistema MOHID.....	12
Figura 2.2. Análisis obtenido por el modelo MOTHY en el caso del buque Prestige.	14
Figura 2.3. Simulación de predicción creada con el modelo MOHID.	15
Figura 4.1. Proyección de habitantes en Puerto Escondido para el año 2012.	31
Figura 4.2. Imagen de la Bahía Principal de Puerto Escondido.	34
Figura 4.3. Formato de datos de entrada de batimetría para la Bahía Principal.....	35
Figura 4.4. Nuevo proyecto en MOHID GIS.	36
Figura 4.5. Importando el archivo de batimetría.	36
Figura 4.6. Configuración de la malla.	37
Figura 4.7. Malla batimétrica de la Bahía Principal.....	38
Figura 4.8. Imagen de la Playa Colotepec.....	39
Figura 4.9. Formato de datos de entrada de batimetría para la Playa Colotepec.	39
Figura 4.10. Malla batimétrica de la Playa Colotepec.....	40
Figura 4.11. Estructura de los archivos de viento MOHID.....	41
Figura 4.12. Orden de referencia para la dirección del viento.	41
Figura 4.13. Archivo de viento para el escenario abril de 2012.....	42
Figura 4.14. Archivo de viento para el escenario agosto de 2012.....	43
Figura 4.15. Archivo de viento para el escenario octubre de 2012.	43
Figura 4.16. Día uno, escenario agosto 2012 <i>E. coli</i> en la Bahía Principal.	47
Figura 4.17. Día uno, escenario agosto 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal.	48
Figura 4.18. Día uno, escenario octubre 2012 <i>E. coli</i> en la Bahía Principal.....	50
Figura 4.19. Día uno, escenario octubre 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal.	51
Figura 4.20. Día uno, escenario abril 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	53
Figura 4.21. Día uno, escenario abril de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	54

Figura 4.22. Día uno, escenario agosto de 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	56
Figura 4.23. Día uno, escenario agosto de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	57
Figura 4.24. Día uno, escenario octubre de 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	59
Figura 4.25. Día uno, escenario octubre de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	60
Figura A.1. Arquitectura del entorno de trabajo de MOHID.	68
Figura A.2. Interacción del módulo de modelo con otros módulos.	71
Figura A.3. Interacción del módulo de batimetría con otros módulos.	72
Figura A.4. Interacción del módulo hidrodinámico con otros módulos.	74
Figura A.5. Interacción del módulo propiedades del agua con otros módulos.	76
Figura A.6. Interacción del módulo Lagrangian con otros módulos.	79
Figura A.7. MOHID GUI en modo de pre-procesamiento.	81
Figura A.8. MOHID GUI en modo de post-procesamiento.	81
Figura A.9. MOHID GIS, modelo digital de la Bahía Principal en Puerto Escondido Oaxaca.	82
Figura A.10. Configuración de resultados con MOHID PostProcessor.	83
Figura B.1. Día dos, escenario agosto 2012 <i>E. coli</i> en la Bahía Principal.	86
Figura B.2. Día tres, escenario agosto 2012 <i>E. coli</i> en la Bahía Principal.	86
Figura B.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Bahía Principal, escenario agosto 2012.	87
Figura B.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Bahía Principal, escenario agosto 2012.	87
Figura B.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Bahía Principal, escenario agosto 2012.	88
Figura C.1. Día dos, escenario agosto 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal.	90
Figura C.2. Día tres, escenario agosto 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal.	90
Figura C.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal, agosto 2012.	91
Figura C.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal, agosto 2012.	91

Figura C.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal, agosto 2012.	92
Figura D.1. Día dos, escenario octubre 2012 <i>E. coli</i> en la Bahía Principal.	94
Figura D.2. Día tres, escenario octubre 2012 <i>E. coli</i> en la Bahía Principal.	94
Figura D.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Bahía Principal, octubre 2012.	95
Figura D.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Bahía Principal, octubre 2012.	95
Figura D.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Bahía Principal, octubre 2012.	96
Figura E.1. Día dos, escenario octubre 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal.	98
Figura E.2. Día tres, escenario octubre 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal.	98
Figura E.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal, octubre 2012.	99
Figura E.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal, octubre 2012.	99
Figura E.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Bahía Principal, octubre 2012.	100
Figura F.1. Día dos, escenario abril 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	102
Figura F.2. Día tres, escenario abril 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	102
Figura F.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, abril 2012.	103
Figura F.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, abril 2012.	103
Figura F.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, abril 2012.	104
Figura G.1. Día dos, escenario abril de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	106
Figura G.2. Día tres, escenario abril de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	106

Figura G.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, abril 2012.....	107
Figura G.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, abril 2012.....	107
Figura G.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, abril 2012.....	108
Figura H.1. Día dos, escenario agosto de 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.....	110
Figura H.2. Día tres, escenario agosto de 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	110
Figura H.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, agosto 2012.	111
Figura H.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, agosto 2012.	111
Figura H.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, agosto 2012.	112
Figura I.1. Día dos, escenario agosto de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	114
Figura I.2. Día tres, escenario agosto de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	114
Figura I.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, agosto 2012.	115
Figura I.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, agosto 2012.	115
Figura I.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, agosto 2012.	116
Figura J.1. Día dos, escenario octubre de 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	118
Figura J.2. Día tres, escenario octubre de 2012 <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec.	118
Figura J.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, octubre 2012.	119
Figura J.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, octubre 2012.	119

Figura J.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>E. coli</i> en la Playa Colotepec, octubre 2012.	120
Figura K.1. Día dos, escenario octubre de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	122
Figura K.2. Día tres, escenario octubre de 2012 <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec.	122
Figura K.3. Día uno, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, octubre 2012.	123
Figura K.4. Día dos, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, octubre 2012.	123
Figura K.5. Día tres, historial de seguimiento de <i>Enterococcus faecalis</i> en la Playa Colotepec, octubre 2012.	124

LISTADO DE TABLAS

Tabla I. Número de habitantes de Puerto Escondido según INEGI.	30
Tabla II. Incremento de población de Puerto Escondido para 2012.	30
Tabla III. Incremento de <i>E. coli</i> y <i>Enterococcus faecalis</i> para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo octubre de 2007 en la Bahía Principal.	31
Tabla IV. Incremento de <i>E. coli</i> y <i>Enterococcus faecalis</i> para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo agosto de 2008 en la Bahía Principal.	32
Tabla V. Incremento de <i>E. coli</i> y <i>Enterococcus faecalis</i> para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo octubre de 2007 en la Playa Colotepec.	32
Tabla VI. Incremento de <i>E. coli</i> y <i>Enterococcus faecalis</i> para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo abril de 2008 en la Playa Colotepec.	32
Tabla VII. Incremento de <i>E. coli</i> y <i>Enterococcus faecalis</i> para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo agosto de 2008 en la Playa Colotepec.	32
Tabla VIII. Datos de la simulación <i>E. coli</i> , zona Regadío-agosto 2012.	46
Tabla IX. Datos de la simulación <i>Enterococcus faecalis</i> , zona Regadío-agosto 2012.	47
Tabla X. Datos de la simulación <i>E. coli</i> , zona Regadío-octubre 2012.	49
Tabla XI. Datos de la simulación <i>Enterococcus faecalis</i> , zona Regadío-octubre 2012.	50
Tabla XII. Datos de la simulación <i>E. coli</i> , zona Colotepec-abril 2012.	52
Tabla XIII. Datos de la simulación <i>Enterococcus faecalis</i> , zona Colotepec-abril 2012. ...	53
Tabla XIV. Datos de la simulación <i>E. coli</i> , zona Colotepec-agosto 2012.	55
Tabla XV. Datos de la simulación <i>Enterococcus faecalis</i> , zona Colotepec-agosto 2012. ..	56
Tabla XVI. Datos de la simulación <i>E. coli</i> , zona Colotepec-octubre 2012.	58
Tabla XVII. Datos de la simulación <i>Enterococcus faecalis</i> , zona Colotepec-octubre 2012.	59

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ritmo o velocidad de cambio en la población.....	25
Ecuación 2. Cálculo del incremento a futuro en las bacterias.....	25
Ecuación 3. Cálculo del flujo en una dirección.....	73
Ecuación 4. Problema de la forma $Ax=b$ (tri-diagonal).....	73
Ecuación 5. Cálculo de la velocidad media del movimiento de partículas.....	77
Ecuación 6. Desintegración de las bacterias <i>E. coli</i>	77
Ecuación 7. Volumen de los cuadros de control en cada instante de tiempo.....	77
Ecuación 8. Cálculo del origen y volumen del agua en cada cuadro de control.....	78
Ecuación 9. Integración de orígenes y volúmenes para emisión en más de un cuadro de control.....	78
Ecuación 10. Tiempo de residencia del agua en un cuadro de control dado.....	78
Ecuación 11. Tiempo de residencia total.....	78
Ecuación 12. Influencia de la emisión sobre los cuadros de control.....	78
Ecuación 13. Tiempo de residencia en caso de emisión continua.....	78

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACUÍFERO	Área geológica de agua saturada que produce un volumen suficientemente alto de agua como para proveer pozos y manantiales a una velocidad que pueden utilizarse como fuentes prácticas de agua potable (Microsoft 2009).
BACTERIA	Clase de microorganismos con cuerpos no celulares o monomoleculares, en forma de hilo, espiral o alargada, generalmente están reunidas en colonias que viven en el suelo, en el agua o en la materia orgánica (<i>Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000</i> 1999).
BATIMETRÍA	Es el estudio de la profundidad marina, de la tercera dimensión de los fondos marinos. Un mapa o carta batimétrica normalmente muestra el relieve del fondo o terreno como isógrama (<i>Diccionario esencial de la lengua española</i> 2006).
BIOGEOQUÍMICO	Se aplica al ciclo o proceso en el que median factores bióticos, geológicos y químicos, como el ciclo del carbono y el del nitrógeno (<i>Diccionario esencial de la lengua española</i> 2006).
BIOMASA	Abreviatura de masa biológica, masa total de los organismos vivos, animales o vegetales, que viven en un medio determinado: estanque, bosque, mar, etc. (<i>Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000</i> 1999).
BIVALVOS	Molusco cuya concha está compuesta de dos valvas, las cuales están conectadas dorsalmente con un ligamento flexible llamado <i>charnela</i> . Su cuerpo se encuentra entre las valvas y generalmente

no presentan una cabeza distintiva. A veces son llamados *pelecypoda* (pelecípodos), que significa “pie de hacha” porque su pie muscular está muy desarrollado y lo usa para enterrarse en la arena (Curtis & Sue-Barnes 2000).

DIFRACCIÓN

Fenómeno luminoso en el cual al pasar la luz a través de una abertura en un cuerpo opaco, los rayos situados en los límites de la misma sufren una desviación en su trayectoria rectilínea (Microsoft 2009).

EFLUENTE

Agua que fluye fuera del sistema de tratamiento.

**ENTEROCOCCUS
FAECALIS**

Patógeno normalmente encontrado en las heces de personas y animales. Habita generalmente en el intestino de las personas y animales, su desarrollo ocurre a una temperatura promedio de 35 °C por lo que se usan como indicadores complementarios de contaminación fecal en el agua, esta bacteria es responsable problemas a la salud humana, como: infecciones urinarias o de endocarditis (MedicineNet 2002).

**ESCHERICHIA
COLI**

Es una especie bacteriana que es el componente principal de la flora intestinal de los seres humanos y animales de sangre caliente. Se utiliza como organismo indicador de la contaminación fecal del agua efluente. A lo largo de este proyecto se le llamará *E. coli*. (Curtis & Sue-Barnes 2000).

ESCORRENTÍA

Conjunto de las aguas que se desplaza por la superficie terrestre gracias a la fuerza de gravedad (*Diccionario esencial de la lengua española* 2006).

ESTUARIO

Desembocadura de un río caudaloso en el mar, caracterizada por

tener la forma de un embudo cuyos lados van apartándose en el sentido de la corriente (*Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000 1999*).

IRIDISCENTE Que muestra o refleja los colores del arco iris (*Diccionario esencial de la lengua española 2006*).

ISOBATA Línea imaginaria que, en cartografía geológica, une los puntos de igual profundidad de fondos marinos, lagos o subsuelos (*Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000 1999*)

PREDICCIÓN Anunciar por revelación, ciencia o conjetura que algo ha de suceder (*Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000 1999*).

REFRACCIÓN Es el cambio que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si no se incide perpendicularmente en la superficie (*Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000 1999*).

SEDIMENTO Material en suspensión en el agua o depositado recientemente en suspensión; se aplica a todas las clases de depósitos de las aguas de corrientes, lagos o mares (*Diccionario esencial de la lengua española 2006*).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene como fin colaborar con el estudio de la problemática ambiental de Puerto Escondido, Oaxaca. Para esto se ha propuesto desarrollar simulaciones gráficas (en escenarios a 2012) basándose en las creadas para los escenarios de octubre de 2007, abril y agosto de 2008, a fin de predecir el comportamiento futuro de las bacterias *Enterococcus faecalis* y *E. coli*, principales causantes de problemas a la salud en las playas y bahías de la zona (Bahía Principal y Playa Colotepec). Se pretende que los resultados obtenidos sirvan para la correcta toma de decisiones por parte de las autoridades.

Los resultados obtenidos de tales simulaciones complementan al proyecto número 00048769 financiado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y desarrollado por profesores investigadores de la Universidad del Mar (Domínguez-Hernández et al. 2006). Las simulaciones fueron desarrolladas por medio del sistema de modelado hidrodinámico MOHID (MOdelo HIDrodinâmico en portugués).

Problemática

La Tierra es un gran almacén que proporciona todos los recursos indispensables para vivir, estos recursos son abundantes y durante mucho tiempo se creyó que eran casi ilimitados (*Autodidáctica Océano Color* 1995). Sin embargo, a partir de la década de los años setentas la humanidad se ha concientizado que tales recursos son finitos, por lo que es preciso administrar adecuadamente el uso que se le dé a cada uno de éstos. Desde entonces, la preocupación por el medio ambiente ha ido en aumento, por lo que se han creado asociaciones y organismos dedicados a su estudio y protección, así también se han firmado tratados y protocolos entre diversos países con el fin de proteger las especies amenazadas y disminuir el número de enfermedades que atentan contra la salud de las personas.

Actualmente no se ha logrado detener el proceso de degradación y la constante contaminación del medio ambiente, al contrario, a los desastres naturales se le han sumado un número creciente de desastres accidentales o indirectamente provocados como: mareas negras y vertidos incontrolados de materias contaminantes en el mar, mismos que contribuyen con la contaminación del agua así como de la atmósfera, poniendo en riesgo a las diferentes especies animales y vegetales de todo el ecosistema.

El agua es un recurso de gran importancia para el desarrollo de la actividad humana, lamentablemente es contenedora de diversos desechos contaminantes, los cuales constantemente son vertidos de forma directa o indirecta por medio de los arroyos, lagunas y ríos que desembocan en el mar. Siendo éstos los encargados de transportar dichos contaminantes hacia los mares, convirtiéndose así en los portadores finales de gran cantidad de microorganismos (como *Enterococcus faecalis*, *E. coli*, entre otros) que se convierten en amenaza potencial para la salud de la humanidad. La Organización Mundial de la Salud (*Autodidáctica Océano Color* 1995) ha calculado que el 80% de las enfermedades como gastroenteritis, esquistomiasis y oncocercosis que afectan a la población, están relacionadas con el uso del agua, estas enfermedades frecuentemente son adquiridas en las playas o bahías de uso recreativo, donde la población va a nadar o realizar actividades relacionadas con los deportes acuáticos como la pesca y el buceo.

Las corrientes marinas son las responsables de la dispersión y la dilución de los contaminantes a lo largo de las playas y bahías, por lo que es muy probable que se contaminen zonas lejanas a la emisión contaminante haciendo el problema de mayor magnitud. Esto no sólo afecta a la comunidad sino también a la flora y fauna de estos lugares, convirtiendo los atractivos arrecifes en zonas desérticas, lo que resta atención por parte del turismo.

Puerto Escondido se localiza al sur del estado de Oaxaca a lo largo de la costa del Océano Pacífico, situado cerca de otros centros turísticos de la región como: Bahías de Huatulco, Puerto Ángel, Zipolite, Mazunte, Laguna de Manialtepec, Parque Nacional Chacahua y Santa Catarina Juquila; se ha convertido en un importante destino turístico conocido tanto nacional como internacionalmente; la principal base económica de su población, desde las décadas de los sesentas y setentas, es la atención al turismo (Santiago-Romero et al. 2007). El acelerado incremento de la población y la poca destinación de recursos para la creación de infraestructura (como plantas tratadoras de aguas negras, establecimiento de drenaje y alcantarillado) indispensable para el apropiado desempeño de este desarrollo turístico, han propiciado el incremento de agentes contaminantes en las playas y bahías de la zona, lo que en nuestros días se ha convertido en una situación de interés de estudio que necesita atención por parte de investigadores, autoridades competentes y población en general.

Metodología de solución

Para abordar el problema y cumplir con el objetivo de este proyecto de tesis, que consistió básicamente en desarrollar simulaciones que predicen la dispersión de las bacterias antes mencionadas, se utilizó la siguiente metodología:

- Estudio del estado del arte. Mismo que sirvió para conocer los trabajos que se han realizado en materia ambiental e informática.
- Estudio sobre el uso y funcionamiento del modelo hidrodinámico MOHID. Herramienta de simulación que fue de vital ayuda en el desarrollo de las simulaciones.

- Conocimiento sobre simulaciones en escenarios de tiempo presente. A fin de conocer la dispersión actual de las bacterias contaminantes. Las simulaciones estudiadas fueron las obtenidas en el año 2008 en la tesis titulada “Simulaciones bajo diferentes escenarios para determinar la calidad de agua de las playas de Puerto Escondido” (Jarquín-Pérez 2010), tiempo en el que se realizó el muestreo de las zonas de estudio.
- Tratamiento de datos microbiológicos e hidrodinámicos para finalmente realizar las simulaciones de dispersión de contaminantes a futuro (predicción para 2012).
- Análisis e interpretación de los resultados arrojados por el modelo hidrodinámico MOHID.

Organización del documento de tesis

Este documento de tesis está conformado por cinco capítulos. A continuación se describen de forma general los cuatro restantes.

Capítulo 2. Antecedentes. En éste se plantean los conocimientos y avances que existen hasta nuestros días, acerca del tema de simulación de dispersión de contaminantes en el agua, específicamente, en este capítulo se analizaron los trabajos que se han realizado en otras instituciones y centros de investigación, cómo se han abordado tales problemas y qué métodos de solución se han implementado. Con lo anterior, se obtuvieron ideas sobre cómo dar solución a lo planteado en este proyecto de tesis. También se exponen los objetivos a cubrir con el presente trabajo y se detalla el problema que se aborda en esta tesis, así como la importancia que tiene llevar a cabo el desarrollo de la misma.

Capítulo 3. Marco teórico. En este capítulo se presenta la teoría que respalda los métodos y herramientas utilizados a lo largo del desarrollo de este proyecto. Principalmente se enfatiza sobre modelos matemáticos, así como su implementación en el área de simulación, también se hace una breve descripción del modelo hidrodinámico MOHID, la herramienta de software que se utilizó para el desarrollo de las simulaciones.

Capítulo 4. Desarrollo del tema. En éste se documenta a detalle el proceso a seguir para llevar a cabo el desarrollo de las simulaciones, mismas que predicen la dispersión de las

bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012. Así también se explica el desarrollo de las simulaciones en el modelo hidrodinámico MOHID, la calibración del modelo y la colocación de datos en el mismo, usando el modo pre-procesamiento para construir dichas simulaciones y el modo post-procesamiento para analizarlas y observar sus resultados.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros. En éste capítulo se muestra el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en las simulaciones, así como las alternativas futuras para coadyuvar con la disminución de bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* presentes en la Bahía Principal y Playa Colotepec de Puerto Escondido.

Anexo A. El entorno de trabajo MOHID. En este apartado se habla sobre la arquitectura y plataforma de trabajo del modelo MOHID, los principales módulos que lo componen y una breve descripción de los mismos. También se habla del modo de trabajo pre-procesamiento y post-procesamiento del modelo, así como de la organización del módulo Lagrangeano que es el motor principal del desarrollo de esta tesis.

Anexo B. Simulaciones *E. coli* agosto 2012 Bahía Principal. En este anexo se presentan las imágenes de la simulación desarrollada para el escenario agosto 2012 en la Bahía Principal, modelando a la bacteria *E. coli*. Se muestran también las imágenes del seguimiento de la trayectoria de las bacterias modeladas.

Anexo C. Simulaciones *Enterococcus faecalis* agosto 2012 Bahía Principal. En este anexo se presentan las imágenes de la simulación para el escenario agosto 2012 pero modelando la bacteria *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal. Asimismo se muestran imágenes que permiten observar la trayectoria de dispersión de las bacterias por cada día de simulación.

Anexo D. Simulaciones *E. coli* octubre 2012 Bahía Principal. En este anexo se presentan las imágenes correspondientes a los 3 días de simulación para el escenario octubre 2012, modelando la bacteria *E. coli* en la zona de estudio Bahía Principal. Así también se muestran las imágenes que permiten observar la trayectoria de dispersión de las bacterias modeladas en cada día de la simulación.

Anexo E. Simulaciones *Enterococcus faecalis* octubre 2012 Bahía Principal. Este anexo muestra imágenes de seguimiento para cada día de la simulación realizada en el escenario octubre 2012 modelando la bacteria *Enterococcus faecalis* en la zona de estudio Bahía Principal, también se presentan imágenes que muestran el seguimiento de la trayectoria de dispersión de cada bacteria modelada.

Anexo F. Simulaciones *E. coli* abril 2012 Playa Colotepec. En este apartado se muestran las imágenes de cada día de la simulación desarrollada para el escenario abril 2012 modelando la dispersión de la bacteria *E. coli* en la Playa Colotepec. Para cada día de simulación se presenta también una imagen con el historial de seguimiento de la trayectoria de las bacterias modeladas.

Anexo G. Simulaciones *Enterococcus faecalis* abril 2012 Playa Colotepec. Este anexo muestra las imágenes de la simulación desarrollada para el escenario abril 2012, modelando la dispersión de la bacteria *Enterococcus faecalis* en la zona de estudio Playa Colotepec. Asimismo se encontrarán las imágenes que muestran el historial de dispersión de las bacterias por cada día de simulación.

Anexo H. Simulaciones *E. coli* agosto 2012 Playa Colotepec. En este anexo se presentan las imágenes de los tres días de simulación para el escenario agosto 2012; modelando la bacteria *E. coli* en la Playa Colotepec. También se muestran imágenes con el historial de seguimiento de la dispersión de cada bacteria modelada.

Anexo I. Simulaciones *Enterococcus faecalis* agosto 2012 Playa Colotepec. Este anexo contiene imágenes que muestran los tres días de simulación para el escenario agosto 2012, pero modelando la dispersión de la bacteria *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec. Para cada día de simulación se presenta también una imagen que muestra el historial de la trayectoria seguida por cada bacteria modelada.

Anexo J. Simulaciones *E. coli* octubre 2012 Playa Colotepec. Este apartado muestra las imágenes correspondientes a los tres días de simulación para el escenario octubre 2012 modelando la dispersión de la bacteria *E. coli*, así también se presenta por cada día de simulación una imagen que muestra el historial de la trayectoria seguido por las bacterias modeladas.

Anexo K. Simulaciones *Enterococcus faecalis* octubre 2012 Playa Colotepec. Este es el último de los anexos, en este se presenta una imagen por cada día de simulación para el escenario octubre de 2012; pero en este caso modelando la dispersión de la bacteria *Enterococcus faecalis*, de igual forma que en los anexos anteriores (B, C, D, E, F, G, H, I y J) también se muestra una imagen por cada día de simulación, mismas que presentan el historial de la trayectoria seguida por cada bacteria modelada.

En el siguiente capítulo se presentan los conocimientos y avances que existen hasta la actualidad en materia de simulación de dispersión de contaminantes en el agua, se abordarán los trabajos realizados en la Universidad del Mar y en otras instituciones, así como los métodos de solución implementados y la forma en cómo se relacionan con la presente tesis. Se presentan también los objetivos de este proyecto y la importancia que tiene el desarrollo del mismo.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

La creciente capacidad de cálculo de las computadoras, así como la existencia de sofisticadas técnicas matemáticas de simulación han hecho posible que actualmente en diversas instituciones y centros de investigación se estén realizando proyectos de investigación relacionados con la simulación de la dispersión de contaminantes en el agua y el aire. En estos proyectos se han utilizado modelos hidrodinámicos y herramientas de software para realizar simulaciones gráficas, mismas que ayudan a interpretar el estado actual y futuro de una zona de estudio dada. A continuación se describen algunos trabajos que abordan el tema de simulación de dispersión de contaminantes en el agua, así como el uso de modelos de simulación implementados en dichos proyectos.

2.1. Estado del arte y trabajos relacionados

Los daños ocasionados a nuestro planeta; producto de la irresponsable actividad humana, así como su impacto sobre el medio ambiente, como el derrame de aguas residuales y derrame de petróleo en el océano; por mencionar algunos casos, se han convertido en el principal objeto de estudio de investigadores e instituciones interesadas, mismos que han desarrollado diversos proyectos de investigación, de los cuales a continuación se describen algunos que abordan el tema de simulación de dispersión de contaminantes en el agua, tema principal que se aborda en esta tesis.

Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)

Este es el proyecto número 00048769 aprobado por el fondo de investigación y desarrollo sobre el agua (CONACyT-CNA), de la convocatoria 2006-1 (Domínguez-Hernández et al. 2006) desarrollado por profesores investigadores de la Universidad del Mar. En él se realizó un estudio que consistió en caracterizar las playas de Puerto Escondido con la finalidad de clasificar las playas aptas para uso recreativo.

Tal caracterización se hizo mediante análisis toxicoquímicos, fisicoquímicos y microbiológicos sobre el estado actual de las playas, así también mediante las tomas de muestras de las fuentes de contaminación identificadas en la zona como aguas residuales que desembocan de manera directa o indirecta en las playas de Puerto Escondido. Tales aguas residuales proceden de diversas actividades humanas y sin duda modifican notablemente la composición y las condiciones naturales de las playas.

Como resultado del desarrollo de este proyecto, se logró determinar de manera cuantitativa el grado de contaminación de las playas de Puerto Escondido así como su dinámica espacio-temporal a partir de la medición de variables que satisficieron los indicadores mínimos de la calidad del agua. Así también se lograron identificar las principales fuentes de contaminación que afectan la calidad de las playas de uso recreativo de la zona.

De los datos obtenidos de los análisis microbiológicos surge la necesidad de desarrollar los siguientes trabajos de tesis, de los cuáles esta tesis es la segunda:

1. Simulaciones bajo diferentes escenarios para determinar la calidad de aguas de las playas de Puerto Escondido (Jarquín-Pérez 2010). En esta tesis se realizaron simulaciones para determinar la calidad del agua en las playas de Puerto Escondido durante los periodos de muestreo 2007-2008 a fin de apoyar al proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)” en la clasificación de las playas aptas para el uso recreativo.

Las simulaciones se desarrollaron a partir de los datos de muestreos microbiológicos tomados en el proyecto antes mencionado. Para este proceso fue necesario hacer la limpieza de los datos microbiológicos, batimétricos y de dirección y velocidad del viento, a fin de calibrar correctamente el modelo hidrodinámico usado para desarrollar las simulaciones, en este trabajo se usó el mismo modelo de simulación usado para el desarrollo de esta tesis (MOHID) con el cual se obtuvo un 75% de fiabilidad en los resultados con base en los muestreos obtenidos.

2. Simulación de dispersión de contaminantes a futuro en las playas de Puerto Escondido Oaxaca. En la presente tesis se tomaron los datos de los análisis microbiológicos que se usaron en la tesis anterior, ya que serán la base para el desarrollo de las simulaciones de la presente tesis y con la aplicación de modelos matemáticos y de simulación crear simulaciones a futuro que permitan determinar la dispersión de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus*. Las simulaciones obtenidas en esta tesis fueron un complemento importante para los resultados finales del proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)”.

Un modelo hidrodinámico junto a la gestión ecológica de la calidad del agua en la laguna costera de Ria Formosa

En el artículo titulado “A coupled hydrodynamic and ecological model to manage water quality in Ria Formosa coastal lagoon” (Martins et al. 2003), se plantea realizar un estudio

a la calidad del agua de la laguna costera Ria Formosa. Es una laguna separada del mar por un cordón arenoso, con barreras naturales y artificiales, es un área protegida con el distintivo de parque natural, en ella habitan diversas especies de aves acuáticas, así como peces, bivalvos (un tipo de moluscos) y crustáceos. Es también una de las zonas de alta afluencia turística por parte de dos ciudades importantes de la costa sur en la península de Portugal, Faro y Olhão. Las ciudades son atendidas por cuatro plantas tratadoras de aguas residuales.

El objetivo del estudio consiste básicamente en determinar el impacto de los efluentes en aguas de la laguna Ria Formosa y especialmente en la actividad de acuicultura de bivalvos. Se realizó un plan de vigilancia de 38 estaciones de muestreo en la parte occidental de la laguna. El muestreo se llevó a cabo dos veces al mes, en aguas de baja (menos de 1 metro) y alta profundidad (aproximadamente 5 metros).

Para el desarrollo de este proyecto se usó el sistema de modelado MOHID por su versatilidad al usar dos modelos de transporte de partículas, modelo de transporte de EULER y de Lagrange. La calibración del modelo se hizo de acuerdo a las mediciones realizadas durante el periodo de muestreo.

Como resultado se logró demostrar que la mayor cantidad de nutrientes que recibe la laguna, provienen de la zona costera exterior. Las descargas hechas por las plantas tratadoras de agua parecían tener un impacto bastante fuerte en los canales de agua de la laguna, sin embargo, se demostró que el impacto es menor. Esto gracias a que el tiempo de residencia de las descargas es mínimo. Así también se demostró que las zonas más productivas para la actividad de acuicultura de bivalvos son las poco profundas. En la figura 2.1 se presenta el resultado de la simulación hecha con el modelo MOHID.

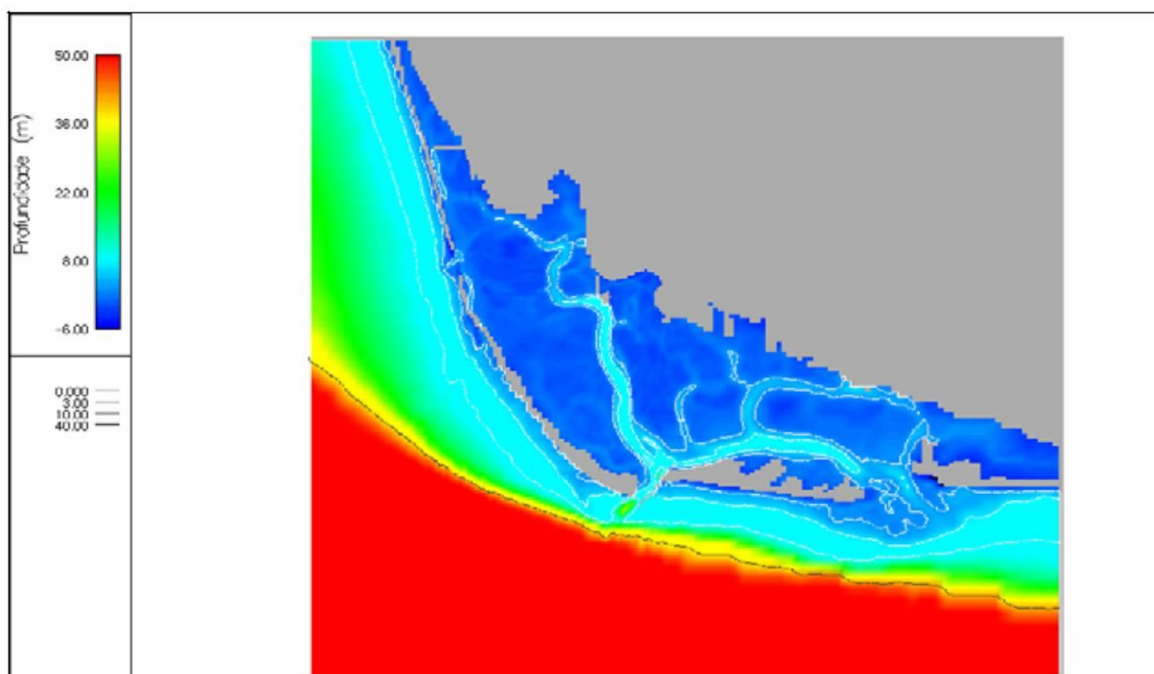


Figura 2.1. Batimetría de la laguna Ria Formosa, con el sistema MOHID.

Este artículo resulta de gran interés primeramente porque para su desarrollo se implementó el mismo sistema de modelado que se usó en el desarrollo de esta tesis y a su vez hacen uso del modelo de transporte Lagrangeano, mismo que en este proyecto de tesis se usará para predecir la dispersión de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis*.

Los modelos de predicción de vertidos de crudos, seguimiento de las primeras manchas del Prestige

En el artículo “Los modelos de predicción de vertidos de crudos, seguimiento de las primeras manchas del Prestige” publicado en la revista del aficionado a la meteorología (RAM 2003), se expone la problemática ambiental sufrida en las costas de España en el mes de noviembre de 2002 por el derrame de petróleo a consecuencia del naufragio del buque petrolero Prestige, así como la necesidad de crear simulaciones que ayudaran a predecir el impacto de las manchas de crudo sobre las costas españolas, por motivo de la información contradictoria referente al impacto ecológico que este suceso provocaría.

Para el desarrollo de las simulaciones predictivas se usaron los modelos de predicción: el modelo MOTHY, creado por Meteo-France que es el organismo responsable de las METAREAS II y III de los lados este y oeste establecidas por el MPERSS (Sistema de Soporte y Respuesta de Emergencias Marítimas de Polución), que es un organismo creado por la OMM (Organización Mundial Meteorológica) en 1994 y su principal función es suministrar información para predicciones de tiempo y oceanográficas, en situaciones de vertidos de crudo fuera de las aguas territoriales de un país dado. Así como el modelo MOHID (Modelo Hidrodinámico) creado por MARETEC del Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa.

Como resultado, se introdujeron los datos del vertido, como salinidad, dirección del viento y de las corrientes marinas, entre otros, mismos que fueron proporcionados por el SASEMAR (Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima) y por los barcos franceses de Meteo-France. Se obtuvieron las simulaciones creadas con los modelos antes mencionados, en la figura 2.2 se observa la concentración de las manchas del crudo: en color negro manchas muy concentradas, en color gris manchas medias concentradas, las rayas verticales indican la presencia de manchas superficiales iridiscentes de menor concentración de crudo, en colores rojo, amarillo, azul y verde se presenta la predicción de las trayectorias para los días 30 de noviembre, 1, 2 y 3 de diciembre de 2002. En la figura 2.3 se muestra la simulación realizada con el modelo MOHID para la predicción del día 17 de noviembre de 2002, en color verde se pueden apreciar las manchas de crudo que están en movimiento y en color amarillo las manchas que ya han llegado a las costas, la dirección de las corrientes marinas están representadas por las flechas de color negro y la velocidad y dirección del viento está representado por la flecha y la etiqueta indicadora sobre el color gris.

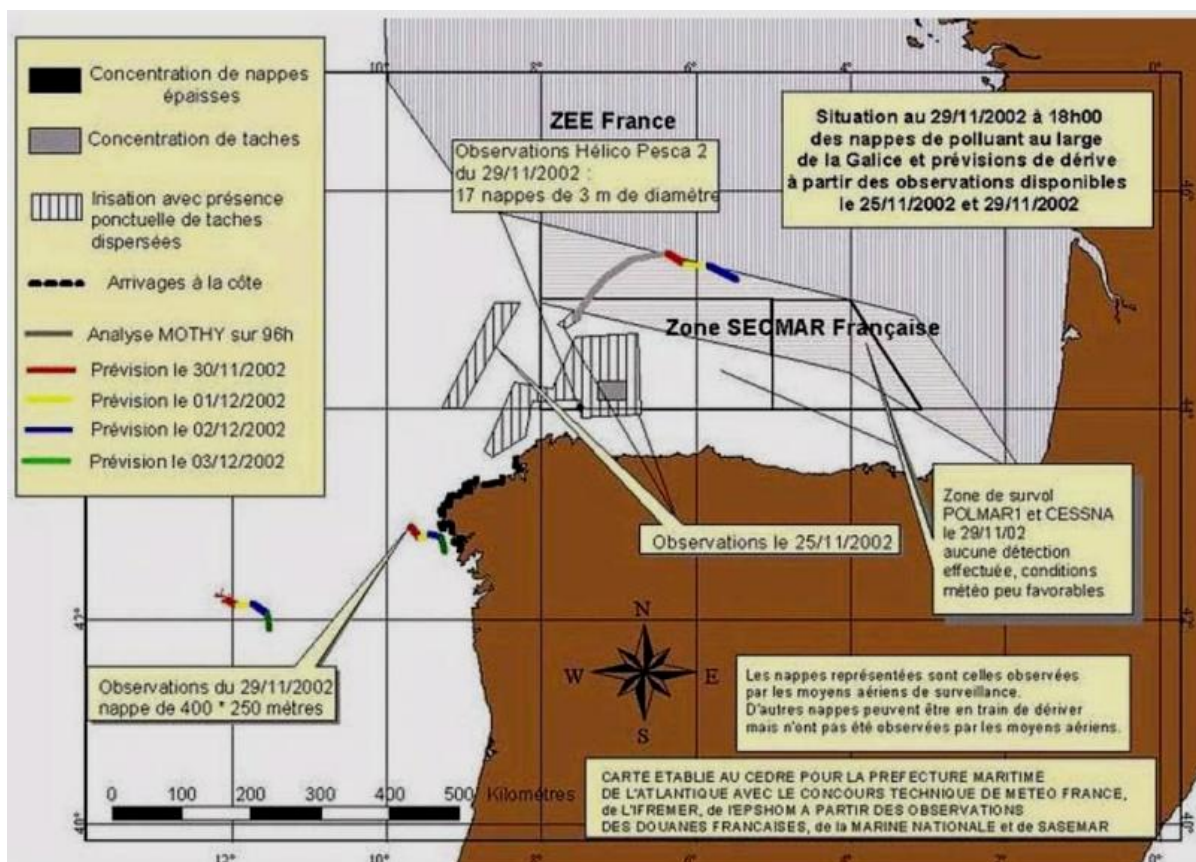


Figura 2.2. Análisis obtenido por el modelo MOTHY en el caso del buque Prestige.

Este proyecto se asemeja al problema abordado en esta tesis sólo que en lugar de crear simulaciones para predecir la dispersión de crudo, se realizarán éstas para predecir la dispersión de las bacterias Coliformes fecales (*E. coli*) y *Enterococcus faecalis*.

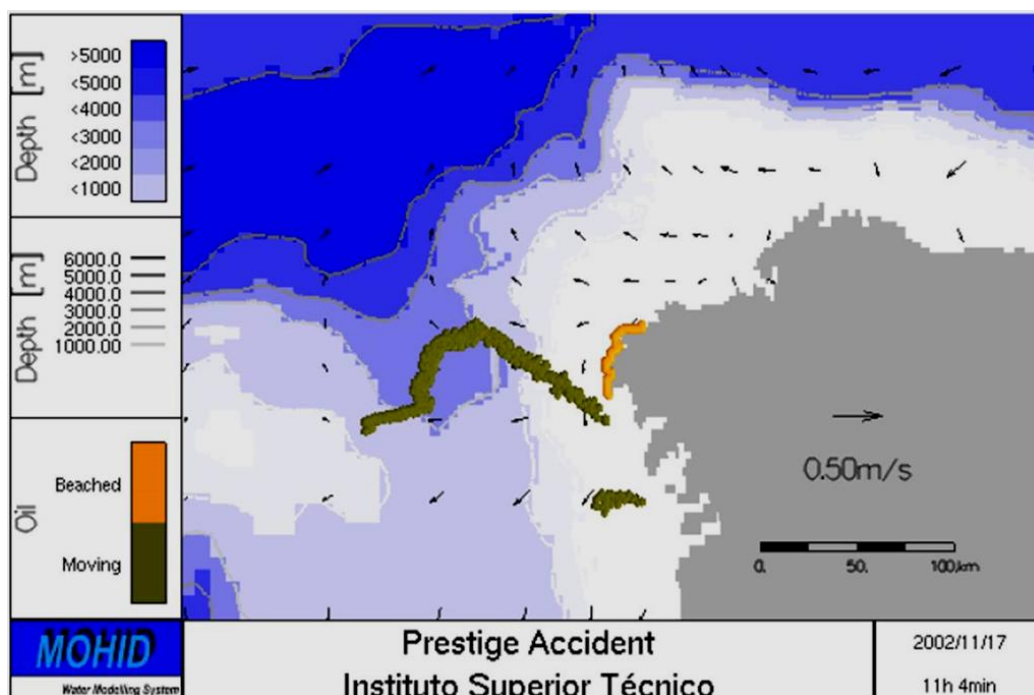


Figura 2.3. Simulación de predicción creada con el modelo MOHID.

Simulación hidrodinámica bidimensional en la laguna de los patos, Brasil

En el artículo “Simulación hidrodinámica bidimensional en la laguna de los patos, Brasil” (Hillman et al. 2004), se presenta el modelado hidrodinámico bidimensional de la laguna de los patos, ubicada al sur de Brasil, entre las ciudades de Río grande y Porto Alegre. Esta laguna recibe agua de diversos ríos y éstos a su vez la proveen de varios contaminantes provenientes de las actividades agropecuarias e industriales a los que se le suman descargas de aguas residuales, lo que convierte a las actividades recreativas en actividades peligrosas. Se han realizado diversas simulaciones usando el modelo RMA2 que es un modelo numérico hidrodinámico en elementos finitos, calcula los niveles de la superficie libre y las componentes horizontales de la velocidad, se logró caracterizar la hidrodinámica de la laguna bajo la combinación de distintos agentes forzantes, obteniendo así elementos que permiten analizar el comportamiento de la laguna durante periodos específicos. Este proyecto aún seguirá llevando a cabo el desarrollo de simulaciones para modelar nuevos escenarios climáticos y evaluar así el comportamiento bajo distintas condiciones. Esta investigación será de gran utilidad ya que también busca desarrollar simulaciones en

diferentes escenarios, lo cual para el presente trabajo serían las simulaciones para escenarios futuros.

Descargas cloacales de Colón y de Paysandú, contaminación transfronteriza del río Uruguay

En el caso de estudio “Descargas cloacales de Colón y de Paysandú” publicado en el artículo: “Contaminación transfronteriza del río Uruguay” (Cardini et al. 2003). La Universidad Tecnológica Nacional y Regional Concepción de Uruguay (UTN-FRCU) realizaron un estudio sobre la contaminación en la cuenca del Río Uruguay con la finalidad de evaluar el impacto de las descargas cloacales e industriales en el curso y márgenes del río. Para generar las condiciones del borde de nivel y caudal del río se usó el modelo bidimensional hidrodinámico RMA2 en conjunto con el modelo hidrodinámico unidimensional MIKE 11. Para simular el transporte de bacterias Coliformes fecales se aplicó el modelo RMA4 y se verificaron los resultados empleando el modelo MIKE 21, para simular las situaciones de baja turbulencia. En esta investigación se realizaron mediciones de parámetros indicadores de la calidad del agua así como la simulación de éstos, de la misma forma se hizo un ajuste de los procesos que provocan la contaminación. Se llegó a la conclusión que existen grandes concentraciones de bacterias Coliformes fecales (*E. coli*) cercanas a la playa, muy superiores a las detectadas en el centro del río. Las altas concentraciones de estas bacterias se deben principalmente al efecto de descargas identificadas principalmente en la zona de Colón y sus adyacencias. Este proyecto busca la detección y el proceso de distribución de la bacteria *E. coli* usando modelos hidrodinámicos. En esta tesis se aborda un problema semejante sólo que en lugar de usar los modelos RMA2, RMA4, MIKE11 y MIKE21, se usó un solo modelo: MOHID.

2.2. Justificación

Profesores investigadores de la Universidad del Mar, campus Puerto Escondido y campus Puerto Ángel, responsables del proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto

Escondido (caracterización y análisis)”, realizaron campañas de muestreo a fin de conocer el proceso de transporte y dispersión de contaminantes en el agua de las playas de Puerto Escondido. La recolección de estos datos condujo a iniciar un proceso de análisis e interpretación que ayudó a la generación de simulaciones gráficas.

Las simulaciones son producto de la necesidad de entender el comportamiento futuro de los agentes contaminantes presentes en las playas de Puerto Escondido, por medio de la manipulación de diversas variables, mismas que por su complejidad y extensión harán necesario el apoyo en herramientas computacionales disponibles. Para el desarrollo de las simulaciones requeridas en este proyecto de tesis se usará el modelo MOHID. Por su versatilidad para modelar la dispersión de partículas observado en los dos primeros casos de la sección 2.1 de este capítulo, se puede decir que MOHID se acopla a las necesidades de desarrollo específicas para realizar las simulaciones de dispersión de contaminantes en el agua de las playas de Puerto Escondido.

Con base en los datos obtenidos durante las sesiones de muestreo se realizó la calibración del modelo hidrodinámico, a fin de desarrollar simulaciones gráficas en tres diferentes escenarios en la Bahía Principal y la Playa Colotepec para el año 2012.

- Mes de abril, época de secas pero con afluencia turística.
- Mes de agosto, época de lluvias con afluencia turística.
- Mes de octubre, época de lluvias pero con poca afluencia turística.

Se espera que las simulaciones obtenidas sirvan a las autoridades competentes para llevar a cabo una correcta toma de decisiones sobre el tratamiento y control de descargas de aguas residuales y de esta forma colaborar en la disminución de la presencia de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal y Playa Colotepec. Por lo anterior también se espera coadyuvar a disminuir los problemas de salud de los bañistas de la zona e incrementar el atractivo turístico de Puerto Escondido.

2.3. Planteamiento del problema

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la Universidad del Mar (UMAR), interesados en la problemática ambiental en que se encuentran actualmente las playas de Puerto Escondido, decidieron poner en marcha el proyecto titulado “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)”, dicho proyecto realizó la caracterización del medio físico y natural de Puerto Escondido, contemplando en ello a la población, la ubicación geográfica, actividades relacionadas con la prestación de servicios turísticos y las principales fuentes de contaminantes; como aguas residuales, cuyo destino final se ve reflejado principalmente en descargas directas e indirectas a la Playa Colotepec y Bahía Principal por conducto de los ríos Colotepec y Regadío respectivamente.

En el proyecto antes mencionado, se hizo un análisis bacteriológico de la calidad del agua de las playas de Puerto Escondido a fin de conocer la cantidad presente de agentes contaminantes y entender su comportamiento. Debido a esto, surge la necesidad de conocer cómo sería tal comportamiento en un futuro (para el año 2012), aplicando modelos matemáticos de dispersión de contaminantes y generando simulaciones, que finalmente nos permitan conocer ampliamente cuál es la tendencia en materia de protección ambiental de nuestro destino turístico y así también sirva para establecer medidas preventivas que permitan reducir la magnitud del problema.

2.4. Objetivos

Objetivo general

Crear simulaciones gráficas en escenarios futuros, sobre el proceso de dispersión de agentes contaminantes (exclusivamente las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis*) presentes en el agua de la Bahía Principal y Playa Colotepec de Puerto Escondido, con la finalidad de entender el comportamiento de tales contaminantes. De esta manera, también se contribuye

con la realización del proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)”.

Objetivos específicos

La elaboración de las simulaciones será para tres escenarios futuros diferentes: época de lluvias, época de secas y época vacacional, que es la temporada donde Puerto Escondido recibe un alto número de turistas, provenientes de diversos lugares del mundo. A continuación se enlistan los objetivos específicos para este proyecto de tesis.

- Crear simulaciones que permitan observar el destino que toman las bacterias modeladas desde que llegan al punto de descarga hasta su desplazamiento cuando tienen contacto con el mar, a través de un reporte de historial.
- Simulaciones donde se puedan observar las cantidades de bacterias descargadas, establecidas por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996).

2.5. Alcances y límites del estudio

Este proyecto consiste en la creación de simulaciones gráficas que permiten observar la dispersión de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec y Bahía Principal de Puerto Escondido Oaxaca para el año 2012, suponiendo que las condiciones de viento fueran las mismas sucedidas en los periodos de muestreo de 2007 y 2008.

Alcances

Las simulaciones desarrolladas cuyo objetivo primordial es mostrar la dispersión de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012 en la Playa Colotepec y Bahía Principal de Puerto Escondido, cuentan con las siguientes características:

- El modelado de las bacterias se hace por separado, es decir; para cada escenario propuesto se desarrollan dos simulaciones, una que corresponde al modelado de *E. coli* y otra al de *Enterococcus faecalis*.
- La cantidad de bacterias para el año 2012 está dada con base en el incremento de la población, tomado de las fuentes del INEGI.
- Las simulaciones indican la batimetría (en metros) de las zonas modeladas.
- En las mallas de las simulaciones, la batimetría está delimitada por líneas Isobatas, mismas que indican las profundidades en escalas de colores e indican sus valores en metros.
- En las simulaciones, las bacterias están divididas de acuerdo a los rangos establecidos por la norma oficial mexicana para aguas de uso recreativo (NOM-001-ECOL-1996).
- Las simulaciones cuentan con una veleta que indica la dirección del viento, así como una leyenda dinámica que especifica la velocidad actual del viento en m/s.
- Las simulaciones muestran la fecha y tiempo de simulación.
- Para ayudar a determinar el alcance y dirección de las bacterias modeladas, las simulaciones presentan un reporte de historial del rumbo que siguen las bacterias.

Límites

Las simulaciones creadas tienen las siguientes limitantes.

- Dado que las simulaciones se terminaron de construir en abril de 2009, no se implementaron las direcciones de las corrientes marinas pues en estas fechas aún no se habían concluido este trabajo.
- Las simulaciones creadas para la Bahía Principal y Playa Colotepec, se desarrollaron en mallas separadas, ya que para hacerlas juntas se requiere de mayor capacidad de procesamiento y memoria por parte del equipo de cómputo utilizado.
- El desarrollo de las simulaciones se hizo tomando en cuenta únicamente las descargas provenientes de los ríos Regadío y Colotepec que desembocan en la

Bahía Principal y Playa Colotepec respectivamente, por lo que dichas simulaciones sólo se hicieron en una playa y una bahía de Puerto Escondido.

- En las descargas de aguas residuales y como se mencionó en el punto anterior, sólo se tomó en cuenta un punto de descarga para la Bahía Principal y la Playa Colotepec y se ignoraron los posibles puntos de descargas clandestinas que pudieran estar en las zonas antes mencionadas o que simplemente no están al alcance de los ríos Regadío y Colotepec.

En este capítulo se abordaron algunos proyectos relacionados con el desarrollo de simulaciones de dispersión de contaminantes en el agua: su metodología y resultados obtenidos, también se plantearon los objetivos, alcances, limitantes de este proyecto y la importancia que tiene el desarrollo del mismo. En el siguiente capítulo se plantearán además de la teoría que fundamenta el desarrollo de esta tesis, las herramientas matemáticas y de software para poder llevar a cabo su desarrollo y poder cumplir con los objetivos planteados en este capítulo.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

La creciente capacidad de las computadoras y la inmensa investigación en el campo de la ciencia de la computación otorgan nuevas herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas, áreas de diseño y manejo de la industria. La simulación es una de las herramientas más importantes e interdisciplinarias, pues además de reducir los costos de investigación permite realizar investigaciones que en ambientes físicos no sería posible. En otras palabras se dice que la simulación se da cuando la computadora finge ser una tienda, un avión, un océano, un lago o un río, por mencionar algunos casos.

La simulación se utiliza en el análisis de sistemas complejos donde no es posible su tratamiento analítico o mediante el análisis numérico. Ha crecido como metodología de experimentación fundamental en campos tan diversos como la economía, la estadística, la informática o la física y con grandes aplicaciones industriales y comerciales, como los simuladores de vuelo, juegos de simulación, o la predicción bursátil o meteorológica.

3.1. Concepto de simulación

Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Dichos experimentos comprenden ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos, que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo (Coss-Bu 2003).

La simulación constituye una técnica muy poderosa y ampliamente usada en las ciencias para analizar y estudiar sistemas complejos. Es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo a fin de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias de las estrategias con las cuales se puede operar el sistema. Consiste básicamente en construir modelos informáticos que describen la parte esencial del comportamiento de un sistema de interés, así como en diseñar y realizar experimentos con el modelo y extraer conclusiones de sus resultados para apoyar la toma de decisiones (Ríos-Insua, Ríos-Insua & Martín-Jiménez 2000).

Las áreas de aplicación de la simulación son muy amplias, numerosas y diversas, basta mencionar sólo algunas de ellas: análisis del impacto ambiental causado por diversas fuentes, análisis y diseño de sistemas de manufactura, análisis y diseño de sistemas de comunicaciones, análisis de sistemas de transporte terrestre, marítimo o aéreo, entre otros.

3.2. Modelos matemáticos

La simulación de un fenómeno o del comportamiento exhibido por un sistema, requiere la formulación previa de un modelo matemático. Un modelo matemático consiste en ecuaciones matemáticas o un conjunto de éstas, que representan cuantitativamente las hipótesis realizadas sobre un caso real y mediante las cuales se puede conocer el comportamiento de un sistema dado (González-Mantiega 2003).

Clasificación de los modelos matemáticos

Un modelo es dinámico si la variación con el tiempo en él es una característica esencial. Existen dos tipos de modelos dinámicos: continuos y discretos. Se dice que un modelo dinámico es continuo si la variable tiempo puede tomar valores en el conjunto de los números reales o en un subconjunto de él. Se dice que es discreto si la variable tiempo está definida en un conjunto discreto, como el de los números naturales o una parte de ellos (González-Mantiega 2003).

De acuerdo al conjunto de resultados que proporciona un modelo se pueden observar otros dos tipos de éstos: deterministas y estocásticos. Los modelos estocásticos juegan un papel muy importante en la explicación de algunas áreas de las ciencias naturales. Estos son muy útiles para analizar la variabilidad inherente en los procesos biológicos, médicos, para abordar decisiones sujetas a incertidumbre, para tratar la complejidad de influencias sociales o psicológicas. Se dice que un modelo es determinista si una vez conocidos los datos que lo conforman, el resultado que éste arroja es totalmente previsible (González-Mantiega 2003).

Los modelos juegan un rol muy importante en todas las ciencias. Pueden ser usados para diversos propósitos: organización de datos, síntesis de la información, construir predicciones. Los modelos expresan las consecuencias lógicas de una serie de hipótesis y permiten generar predicciones, mismas que deben basarse en uno o varios modelos de algún tipo, que pueden ir desde simples analogías tomadas del mundo real, por medio de regresiones basadas en modelos estáticos hasta complejos modelos matemáticos multidimensionales que requieren métodos de simulación numérica para llegar a una solución (Canham, Ehrlich & Cole 2003).

Modelo matemático para predicción de población

Según Larson & Hostetler (2005), el cálculo para el estimado de población a futuro está dado por la división del cambio en la población entre el cambio en años (Ec. 1). El cambio

en la población se obtiene a través de la diferencia de la población en un rango de años dado. El cambio en años se obtiene de la diferencia del rango de años dado. Por ejemplo, si el rango de años dado es 1990 y 2005 cuya población es de 14,120 y 31,420, respectivamente, el cambio en la población sería el resultado de la diferencia de 31,420 menos 14,120 y el cambio en años sería el resultado de la resta de 2005 y 1990.

$$\text{Ritmo o velocidad de cambio} = \frac{\text{Cambio en población}}{\text{Cambio en años}} \quad (1)$$

Modelo matemático para cálculo futuro de bacterias contaminantes.

El cálculo a futuro del incremento de las bacterias esta dado por una ecuación de una incógnita (Ec. 2) (Moctezuma-Cantorán, Jarquín-Pérez & Sosa-Gómez 2010).

$$\text{CantidadFuturo} = \frac{(k)(Pf)}{Pa} , \quad (2)$$

donde **CantidadFuturo** representa la cantidad de bacterias esperadas en el futuro, **k** es la cantidad de bacterias obtenidas durante el proceso de muestreo, en las campañas de octubre de 2007, abril o agosto de 2008. **Pa** representa el total de la población de Puerto Escondido en el 2007 ó 2008 y **Pf** representa el total de población esperada en el futuro, para el año 2012.

3.3. Herramientas de software auxiliares en simulación

En la actualidad, las computadoras se han convertido ya en una herramienta indispensable para realizar las actividades relacionadas con la investigación, sin importar el área o tipo de investigación. Es precisamente en el área de simulación en donde tienen un auge de vital importancia.

La tarea de construir una simulación, así como su ambiente, es bastante compleja; más aún cuando se trata de crear simulaciones que permitan predecir el comportamiento de un sistema dado, pues esto requiere de una capacidad de procesamiento y almacenamiento

verdaderamente considerable que solamente una computadora puede proveernos. Es por ello que diversas empresas, así como centros de investigación se han ocupado de crear productos de software que faciliten a los investigadores realizar tal tarea.

El deterioro ambiental producto de la descontrolada actividad humana se ha convertido en nuestros días en un tema de vital importancia y causa de estudio, es por ello que han surgido diversos proyectos de investigación sobre esta rama. El centro de investigación *Marine and Environmental Tecnology Center* (MARETEC, por sus siglas en inglés) se ha dado a la tarea de crear un modelo informático cuyo objetivo es apoyar a los investigadores en sus proyectos de investigación, creando simulaciones en tiempo presente y futuro de un sistema en estudio.

3.4. El modelo MOHID

El modelo MOHID fue desarrollado por investigadores del MARETEC (2002b) perteneciente al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa. Actualmente, MOHID es un sistema tridimensional que se encarga del modelado de la dinámica de diversos cuerpos de agua como ríos, estuarios y océanos. El nombre MOHID es un acrónimo de MOdelo HIDrodinâmico, en portugués (MARETEC 2002c).

El sistema de modelado MOHID, es una herramienta capaz de simular procesos físicos y biogeoquímicos tanto en columnas de agua como en sedimentos; esto gracias a la adopción de la filosofía de modelos integrados. Además, debido al paradigma de programación Orientado a Objetos, MOHID permite simular diferentes escalas (mismas que consienten en el uso de modelos anidados) y sistemas (como estuarios y cuencas hidrográficas). Inicialmente, MOHID fue un modelo que estaba escrito en lenguaje FORTRAN 77 y fue utilizado para estudiar los estuarios y zonas costeras, principalmente en Portugal, en sus últimas versiones está implementado en FORTRAN 95 y .NET, lo que permite al modelo usar todas las características de la programación orientada a objetos como: polimorfismo, encapsulación, herencia y sobrecarga de funciones. El modelo MOHID está integrado por tres herramientas principales: MOHID Water, MOHID Soil y MOHID Land, y por más de 60 módulos que implican aproximadamente 300,000 líneas de

código (MARETEC 2002c). Por lo que desde el punto de vista informático se puede catalogar como un sistema de tamaño considerablemente grande.

Existen versiones del modelo implementadas para correr en los sistemas operativos Microsoft Windows y Linux. Así también se ofrecen lineamientos para poder extender el modelo y pueda ser utilizado en otros sistemas operativos (como UNIX y MAC OS).

MOHID cuenta con una interfaz gráfica (también llamada MOHID GUI), ésta es bastante útil para calibrar el modelo y poder utilizar los módulos ejecutables del mismo, pero sólo es posible usarla en el sistema operativo Windows, ya que está implementada sobre la plataforma Microsoft .NET. Sin embargo, la GUI es una herramienta de uso opcional ya que en caso de no contar con ella, es posible invocar las instrucciones del modelo desde línea de comandos. En el anexo A se puede encontrar más información sobre el modelo MOHID; la interfaz gráfica de usuario, el entorno de trabajo, la arquitectura del modelo y sus principales módulos ejecutables.

Conclusiones

Para predecir el comportamiento de un sistema en estudio, se requiere construir una simulación que esté alimentada por el procesamiento de datos antecedentes, lo cual depende sin duda de tres factores importantes: la capacidad de almacenamiento, la capacidad y velocidad de procesamiento, y del modelo que se esté usando para la simulación.

Los tres factores mencionados en el párrafo anterior están directamente relacionados con equipo de tecnología de punta, pues de ello depende el éxito de la investigación. El avance tecnológico da como resultado día con día nuevos y mejores equipos de cómputo, así como nuevos y potentes sistemas de software, esto ha llevado a que los modelos de simulación, en la actualidad sean escritos en lenguajes de programación y se presenten como paquetes informáticos.

El uso de las computadoras así como las herramientas de software en proyectos de simulación, hacen posible el desarrollo de investigaciones que podrían llevar mucho tiempo

en ser concluidas o que sencillamente no serían posibles, dado la enorme cantidad de procesos de cálculo que requieren y el costo económico que pudiera generar.

En este capítulo se han planteado las bases teóricas que fundamentan el desarrollo de esta tesis; los modelos matemáticos para calcular el número esperado de bacterias en el año 2012 y el cálculo de la población esperada para dicho año. Así también, se habló sobre el sistema de modelado hidrodinámico MOHID, que se utilizó como principal herramienta en el desarrollo de este proyecto, cuyo proceso de desarrollo se describe en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL TEMA

Las simulaciones sirven para mantener el control y predecir el comportamiento de un sistema. Bajo esta premisa se optó por realizar simulaciones de dispersión de las bacterias *E. coli* (Coliformes fecales) y *Enterococcus faecalis* a futuro para el año 2012, en la Bahía Principal y la Playa Colotepec de Puerto Escondido.

Durante el desarrollo del proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)” se realizaron tres campañas de muestro (en los meses de octubre de 2007, abril y agosto de 2008), de donde se obtuvieron datos importantes para el desarrollo de tales simulaciones: como el número de bacterias existentes en las zonas de estudio (Bahía Principal y Playa Colotepec), propiedades del agua como el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH (potencial de hidrógeno) y la salinidad. Para realizar las simulaciones a futuro se requiere estimar el número de bacterias en los puntos de descarga para el año que se desea, en este caso 2012, considerando la

relación del número de contaminantes en cada descarga con la cantidad de habitantes de Puerto Escondido.

Por lo tanto, el primer punto es proyectar el total de habitantes para el año 2012. De acuerdo al INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) en sus últimos conteos, Puerto Escondido en conjunto con sus colonias urbanas y suburbanas ha tenido el número de habitantes indicado en la tabla I (INEGI 2006).

Tabla I. Número de habitantes de Puerto Escondido según INEGI.

Año	1990	1995	2000	2005
Número de Habitantes	14,120	23,638	28,855	31,420

Con los datos de la tabla I y con base en la ecuación 1 de la sección de modelos matemáticos en el capítulo 3, se realizó el cálculo del incremento anual de población, determinando que Puerto Escondido en conjunto con sus colonias urbanas y suburbanas para el año 2012 contará con 39,493 habitantes (Tabla II).

Tabla II. Incremento de población de Puerto Escondido para 2012.

Año	1990	1995	2000	2005	2012
Número de Habitantes	14,120	23,638	28,855	31,420	39,493

En la figura 4.1 se presenta una gráfica que muestra el incremento de la población de Puerto Escondido hasta el año 2012 usando los datos de la tabla II.

Los datos respecto a la cantidad de *E. coli* (Coliformes fecales) y *Enterococcus faecalis* en las descargas del Río Regadío y Río Colotepec, se obtienen a través de la ecuación 2 establecida en la sección de modelos matemáticos del capítulo 3. Considerando que las condiciones de temperatura y salinidad se mantienen sin cambio alguno en cada una de las estaciones del año, así como las condiciones de infraestructura del sistema de drenaje de Puerto Escondido permanecen sin cambios, se prevé un incremento en las descargas de drenaje y por consiguiente un aumento en el número de bacterias en las descargas de los ríos antes mencionados.

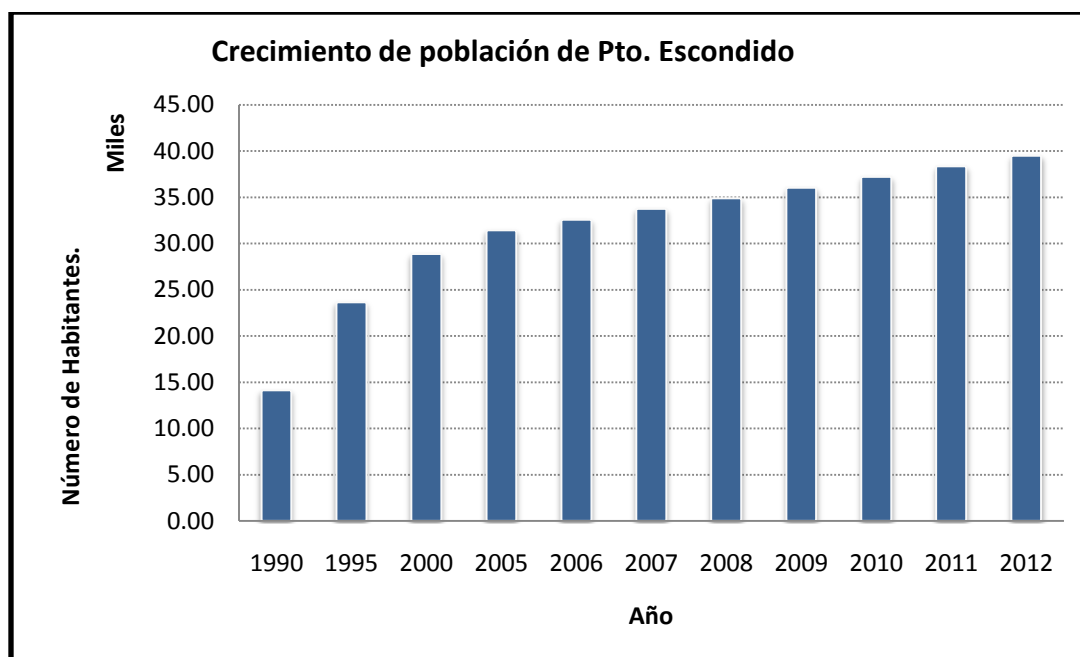


Figura 4.1. Proyección de habitantes en Puerto Escondido para el año 2012.

Apoyándose en el modelo matemático para el cálculo futuro de las bacterias contaminantes (Ec. 2) y basándose en los datos usados en la tesis de Jarquín-Pérez (2010), se realizaron los cálculos esperados para el año 2012 de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis*. Dicho cálculo se realizó para cada periodo de muestreo, mismos que se presentan, para la zona de estudio Bahía Principal, en las tablas III y IV y, para la zona de estudio Playa Colotepec, en las tablas V, VI y VII.

Tabla III. Incremento de *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo octubre de 2007 en la Bahía Principal.

Año 2007		Año 2012	
Población	33,727	Población	39,493
<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
960	2117	1124.83	2478.92

Tabla IV. Incremento de *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo agosto de 2008 en la Bahía Principal.

Año 2008		Año 2012	
Población	34,880	Población	39,493
<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
1178	960.6	1333.79	1087.64

Tabla V. Incremento de *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo octubre de 2007 en la Playa Colotepec.

Año 2007		Año 2012	
Población	33,727	Población	39,493
<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
2419.6	331	2833.26	387.59

Tabla VI. Incremento de *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo abril de 2008 en la Playa Colotepec.

Año 2008		Año 2012	
Población	34,880	Población	39,493
<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
583	0.9	660.10	1.02

Tabla VII. Incremento de *E. coli* y *Enterococcus faecalis* para el año 2012 con respecto del incremento de la población. Periodo agosto de 2008 en la Playa Colotepec.

Año 2008		Año 2012	
Población	34,880	Población	39,493
<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>E. coli</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
1732.9	331	1962.08	374.78

4.1. Configuración del modelo MOHID

Para poder iniciar con el proceso de creación de las simulaciones, es necesario configurar al sistema de modelado MOHID. La tarea de configuración de dicho sistema consiste en establecer los datos que éste necesita para poder construir las simulaciones.

Para el proceso de creación de las simulaciones de predicción para el año 2012 sobre el comportamiento y distribución de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis*, el sistema MOHID necesita los datos de batimetría, velocidad y dirección del viento.

Mallas batimétricas y MOHID GIS

Las mallas batimétricas constituyen un archivo creado con el modulo de MOHID GIS. En este archivo se especifican los parámetros para el archivo que hará posible que el modelo dibuje el área de trabajo para cada simulación. Por ejemplo, si el área de estudio es una laguna, a través de este archivo se le especifica al modelo que debe dibujar los bordes de la laguna y por medio de una escala de colores representar las profundidades en cada zona de la laguna.

De acuerdo con el manual de usuario del módulo Hidrodinámico del modelo MOHID (MARETEC 2002a), la estructura de los archivos de batimetría debe contener los siguientes parámetros:

- La dimensión de largo y ancho de la malla (X y Y).
- El tipo de coordenadas. Que pueden ser Geográfica/Elipsoide, UTM, Portugués militar, Geográfica/Esferoide, Coordenada de malla (cuando el origen está ubicado en la esquina superior izquierda de la malla) y Circular.
- Las coordenadas Latitud y longitud que indica origen de la malla, en la esquina inferior izquierda de la misma.
- El ángulo de inclinación de la malla con respecto al plano. Debe especificarse en dirección opuesta a las manecillas de reloj.
- Los valores correspondientes a la batimetría se colocan dentro de bloques marcados por las palabras reservadas: <BeginBathymetry> y <EndBathymetry>.
- También se deben especificar las distancias entre cada celda de la malla con relación a la esquina inferior izquierda y las celdas alineadas en las direcciones X y Y. Estos datos se especifican en bloques <BeginXX><EndXX> y <BeginYY><EndYY> respectivamente.

Para el caso de estudio de esta tesis se analizan dos zonas, la Bahía Principal de Puerto Escondido y la Playa Colotepec. La batimetría de las dos zonas de interés antes mencionadas se obtuvo mediante una ecosonda marca garmin, modelo GPSMAP178C SOUNDER con transductor de doble frecuencia 200/50 kHz, en la recolección de datos durante el desarrollo del proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)”. A continuación se describe la creación de las mallas batimétricas para las dos zonas de estudio.

Batimetría de la Bahía Principal de Puerto Escondido. La Bahía Principal de Puerto Escondido está ubicada en las coordenadas Latitud 15.858557° y Longitud -97.062867° . En la figura 4.2 se presenta una imagen de la ubicación de esta bahía, tomada de Google Earth (Google 2009). Desde esta imagen también se aprecia la desembocadura del Río Regadío en un marcador de color verde, una de las principales fuentes de contaminación de la Bahía Principal.



Figura 4.2. Imagen de la Bahía Principal de Puerto Escondido.

Para escribir los archivos con los datos de batimetría, no es necesario tener algún software sofisticado y especial, para el caso de esta tesis los archivos de batimetría se han escrito en el bloc de notas “Notepad ++ Portable v4.8.5” gracias a que es de gran ayuda en

el uso e identificación de las palabras clave usadas. Una vez creado el archivo, éste se debe guardar con la extensión .DAT para su posterior uso con MOHID GIS. En la figura 4.3 se observa parte de los datos de entrada de batimetría correspondiente a la malla batimétrica de la Bahía Principal, con 35 celdas de largo y 18 de alto, usando coordenadas geográficas, inicia en las coordenadas -97.0669021, 15.85659980 longitud y latitud respectivamente.

```

ILB_IUB      :      1      18
JLB_JUB      :      1      35
COORD_TIP    :      4
ORIGIN       :  -97.0669021 15.85659980
GRID_ANGLE   :      0
LATITUDE     :  15.85659980
LONGITUDE    :  -97.0669021

<BeginBathymetry>
-9.90E+01
1.6667
5.1479
9.61
16.806
26.65
35.55
43.596
50.964
54.19
53.446
51.38
48.245
44.289
39.765
34.922

```

Figura 4.3. Formato de datos de entrada de batimetría para la Bahía Principal.

Una vez generado el archivo de batimetría, el siguiente paso es exportarlo a un proyecto de MOHID GIS para construir y obtener la malla, para esto se debe crear un nuevo proyecto (Fig. 4.4). Se ha creado y guardado el nuevo proyecto.

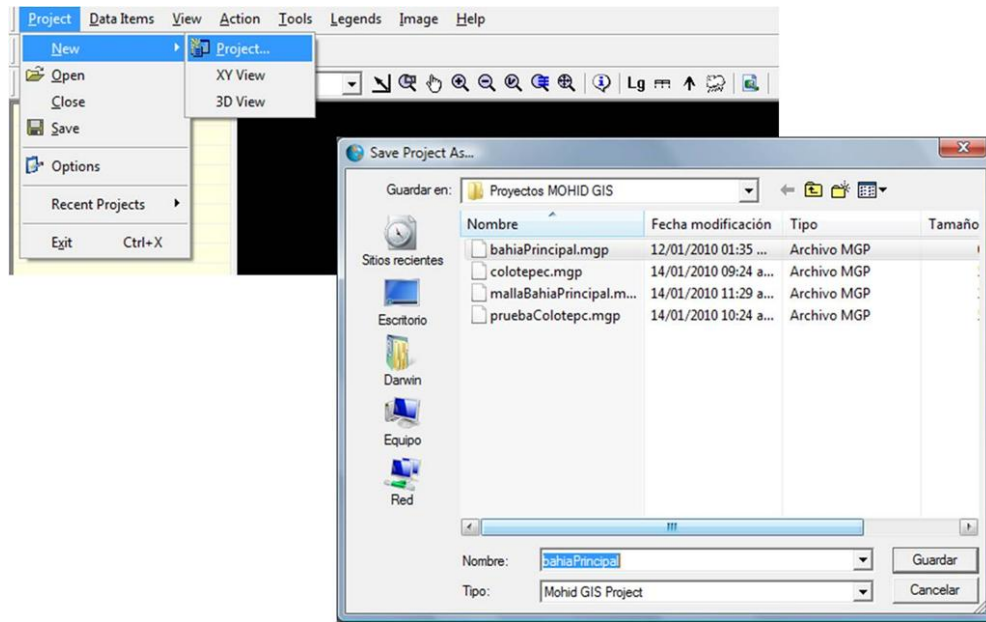


Figura 4.4. Nuevo proyecto en MOHID GIS.

Con el proyecto ya creado se debe importar el archivo de batimetría al proyecto. En la figura 4.5 se observa este procedimiento.

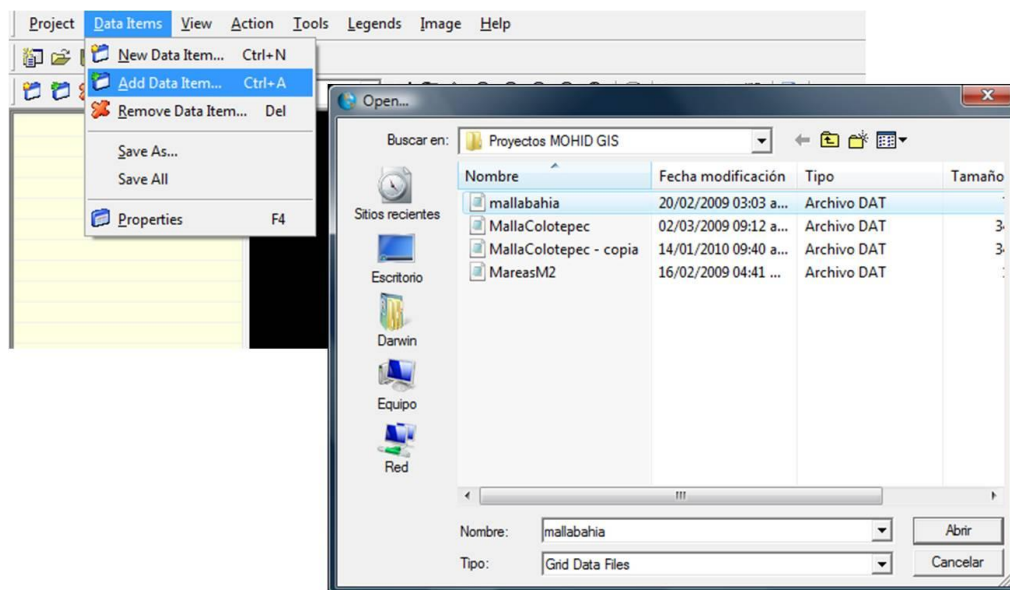


Figura 4.5. Importando el archivo de batimetría.

Una vez colocado el archivo de batimetría dentro del proyecto se debe hacer las configuraciones pertinentes para finalizar el proceso de creado de la malla. En la figura 4.6 se pueden observar dichas configuraciones dentro las cuales se mencionan las siguientes: las formas de visualización de la malla, la escala y orden de los colores que indicarán la batimetría de la zona, si se usa algún archivo de textura; es también en este paso donde se configura el archivo y se le indica al sistema que en lugar de usar escala de colores tome la textura.

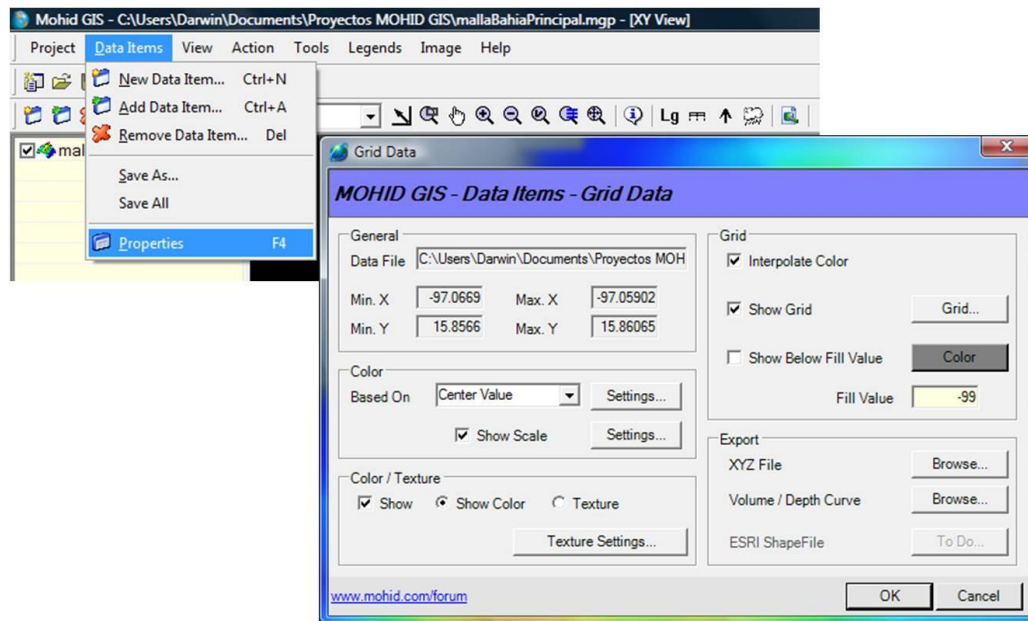


Figura 4.6. Configuración de la malla.

En la figura 4.7 se observa terminada la malla de batimetría para la Bahía Principal de Puerto Escondido, en la escala de colores que va desde azul a rojo se presentan las profundidades en metros, siendo el color azul la menor profundidad (desde 0 metros) y el rojo la mayor profundidad (hasta 54.19 metros).

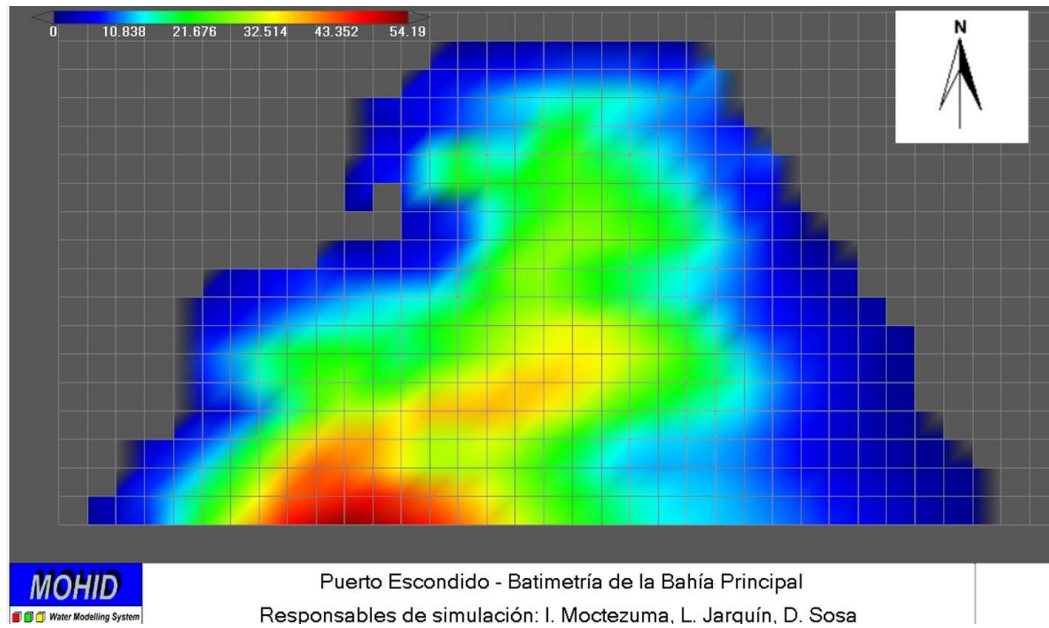


Figura 4.7. Malla batimétrica de la Bahía Principal.

Batimetría Playa Colotepec Puerto Escondido. La Playa Colotepec de Puerto Escondido está ubicada en las coordenadas Latitud 15.811319° y Longitud -97.026547° . En la figura 4.8 se presenta una imagen de la ubicación de esta playa, tomada de Google Earth (Google 2009). Desde esta imagen también se observa la desembocadura del Río Colotepec, representada por el marcador de color verde, una de las principales fuentes de contaminación en dicha playa. En la figura 4.9 se presenta parte de la estructura batimétrica para dicha playa.



Figura 4.8. Imagen de la Playa Colotepec.

En la figura 4.9 se observa que a diferencia de la malla creada para la bahía principal, ésta será más grande, con 45 celdas de alto y 80 celdas de largo, usa el mismo tipo de coordenadas (geográfica), el origen de la malla esta en las coordenadas longitud -97.0389 y latitud 15.79675, mismas que se observan marcadas en la figura 4.8, y tiene un ángulo de inclinación de 350 grados.

```

ILB_IUB      :      1      45
JLB_JUB      :      1      80
COORD_TIP    :      4
ORIGIN       :  -97.0389  15.79675
GRID_ANGLE   :  350
LATITUDE     :  15.79675
LONGITUDE    :  -97.0389
|
<BeginBathymetry>
39.59
39.59
39.59
39.59
39.59
39.59
39.59
27.25

```

Figura 4.9. Formato de datos de entrada de batimetría para la Playa Colotepec.

Para concluir con el procedimiento de creación de la malla de esta playa, se siguen los mismos pasos que se explicaron en la creación de la malla para la Bahía Principal.

- Crear un nuevo proyecto en MOHID GIS (Fig. 4.4).
- Importar el archivo de batimetría de la figura 4.9 (Fig. 4.5).
- Configurar el archivo importado para terminar la malla (Fig. 4.6)

En la figura 4.10 se observa la malla terminada, en la escala de colores ubicada en la parte central superior de esta imagen, se presenta la profundidad en metros de acuerdo a los colores que van desde azul (siendo este la menor profundidad con 0 metros) hasta rojo (siendo la mayor profundidad con 69.99 metros).

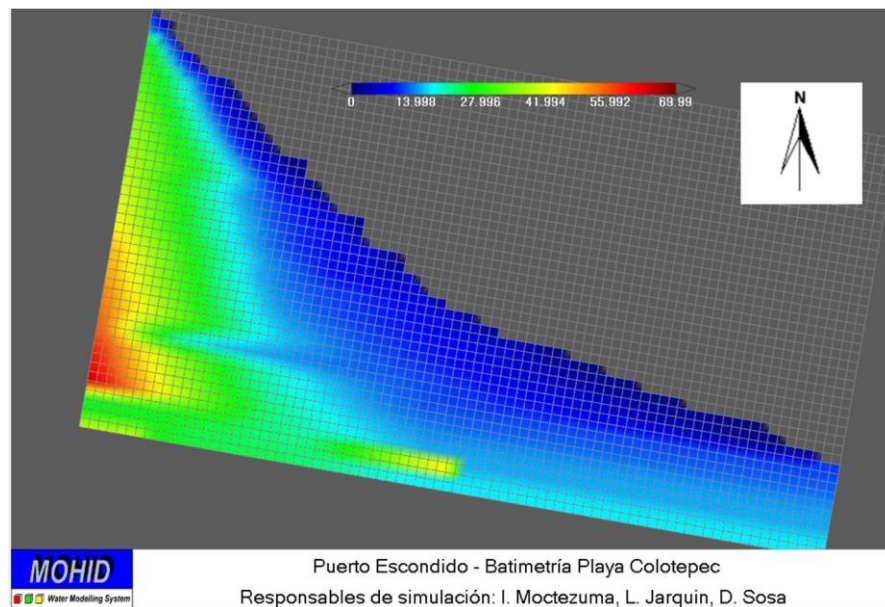


Figura 4.10. Malla batimétrica de la Playa Colotepec.

Archivos de dirección y velocidad del viento

El viento constituye un factor muy importante para el movimiento de las olas del mar (Ramírez 2006), por consecuencia es también un factor significativo respecto a la dirección en que se desplazan las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis*. Las muestras de los datos de viento fueron tomadas desde una mini estación meteorológica en los meses de octubre

de 2007, abril y agosto de 2008, por lo anterior y dadas las necesidades de estudio de la presente tesis, es necesario desarrollar simulaciones en tres escenarios diferentes, para los meses de abril, agosto y octubre pero de 2012 y como consecuencia de ello, se han de escribir tres archivos de viento diferentes. En la figura 4.11 se muestra la estructura de un archivo de viento MOHID. De igual forma que los archivos de batimetría, los de viento también se han escrito con la herramienta bloc de notas “Notepad ++ Portable v4.8.5”.

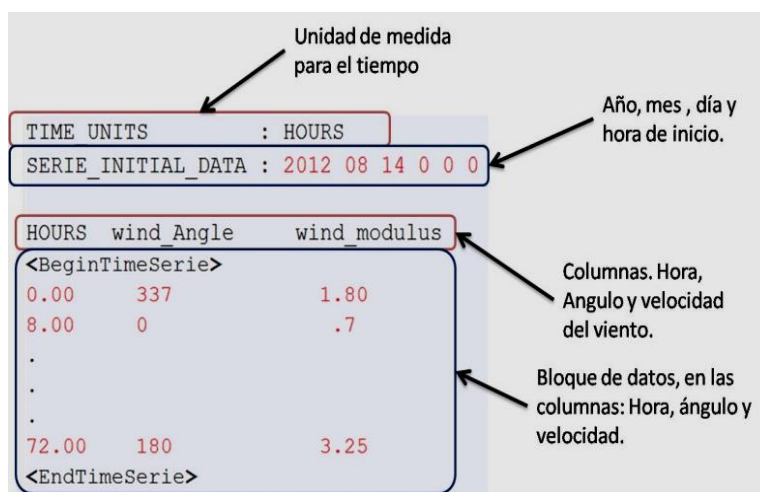


Figura 4.11. Estructura de los archivos de viento MOHID.

El ángulo de la dirección del viento en los archivos de viento MOHID se define en sentido de las manecillas del reloj, siendo la dirección norte el inicio (Fig. 4.12).

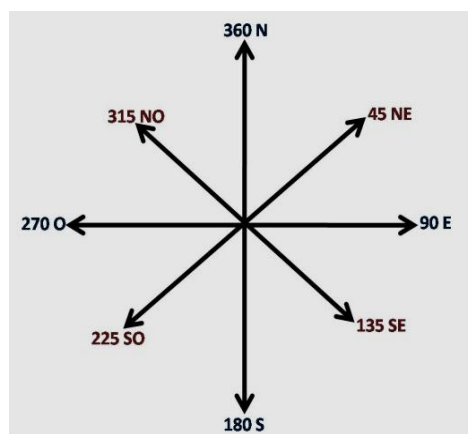


Figura 4.12. Orden de referencia para la dirección del viento.

Archivo de viento para el escenario abril de 2012. En la figura 4.13 se observa la estructura final del archivo de viento correspondiente al escenario abril de 2012. La unidad de medida para el viento está dada en horas, la configuración de fecha y tiempo de inicio del módulo de viento es: año 2012, mes abril (4), día 3 y la hora de inicio es a las 0:00 am. El bloque de datos está dividido en tres columnas: en la primera se ponen las horas que durará el proceso de ejecución del módulo de viento; dicha ejecución durará 72 horas (3 días), en la segunda columna los ángulos que indican la dirección del viento (Fig. 4.12) y en la tercera se coloca la velocidad del mismo dada en metros sobre segundos (m/s).

```

TIME_UNITS      : HOURS
SERIE_INITIAL_DATA : 2012 4 3 0 0 0

HOURS  wind_Angle  wind_modulus
<BeginTimeSerie>
0.00    337        1.80
8.00     0         .7
16.00   225        3.63
24.00   270        3.76
32.00   270        1.14
40.00   225        2.32
48.00   225        2.08
56.00    45        1.72
64.00   180        3.28
72.00   180        3.25
<EndTimeSerie>

```

Figura 4.13. Archivo de viento para el escenario abril de 2012.

Archivo de viento para el escenario agosto de 2012. En la figura 4.14 se presenta la estructura final del archivo de viento para el escenario agosto de 2012, la configuración de fecha y tiempo de inicio del módulo de viento es: año 2012, mes agosto (08), día 14 y la hora de inicio es a las 0:00 am. El bloque de datos “<BeginTimeSerie><EndTimeSerie>” está dividido en tres columnas: en la primera se colocan las horas que durará el proceso de ejecución del modulo de viento; dicha ejecución durará 72 horas, en la segunda columna los ángulos que indican la dirección del viento (ver orden en la figura 4.12) y en la tercera se coloca la velocidad del mismo dada en metros sobre segundos (m/s).

```

TIME_UNITS      : HOURS
SERIE_INITIAL_DATA : 2012 08 14 0 0 0

HOURS  wind_Angle  wind_modulus
<BeginTimeSerie>
0.00    337        1.8
8.00    225        1.58
16.00   225        3.32
24.00    0        3.31
32.00   225        3.18
40.00   225        2.37
48.00    45        2.26
56.00   225        2.92
64.00   225        3.60
72.00    0        3.01
<EndTimeSerie>

```

Figura 4.14. Archivo de viento para el escenario agosto de 2012.

Archivo de viento para el escenario octubre de 2012. En la figura 4.15 se presenta la estructura del archivo de viento para el escenario octubre de 2012. El día de inicio es 27 del mes de octubre (10) a las 0:00 horas, de igual forma la ejecución del módulo de viento durará 72 horas (3 días).

```

TIME_UNITS      : HOURS
SERIE_INITIAL_DATA : 2012 10 27 0 0 0

HOURS  wind_Angle  wind_modulus
<BeginTimeSerie>
0.00    337        1.8
8.00    315        1.20
16.00   270        3.13
24.00   270        2.44
32.00    45        2.50
40.00   180        2.49
48.00    45        1.91
56.00    45        2.82
64.00   225        2.70
72.00    45        2.21
<EndTimeSerie>

```

Figura 4.15. Archivo de viento para el escenario octubre de 2012.

4.2. Calibración del modelo MOHID

La calibración del modelo incluye la construcción de las simulaciones y el análisis de las mismas en la fase de post procesamiento. En la primera etapa se introducen las variables que el modelo necesita para crear una simulación, en la segunda es donde se incorporan los datos arrojados por el modelo para hacer el análisis (post procesamiento).

A continuación se describen la etapa de la calibración del modelo, así como la creación y el análisis de las simulaciones hechas para las dos zonas de estudio: la Playa Colotepec y la Bahía Principal de Puerto Escondido. Las simulaciones se han creado en tres escenarios: abril, agosto y octubre de 2012. En cada escenario se modela por separado a las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis*, lo que significa que para cada escenario se han creado dos simulaciones. Generalmente las variables que se toman en cuenta para el desarrollo de las simulaciones y mismas que son indispensables para la calibración del modelo son:

- Flujo del río dado en m^3/s .
- Concentración de bacterias ya sea *E. coli* o *Enterococcus faecalis* dado en NMP/100 ml (Número más probable por cada 100 ml de agua).
- Salinidad dado en unidades prácticas de salinidad (psu, por sus siglas en inglés).
- Temperatura dada en °C.
- Oxígeno disuelto dado en mg/l.
- Fecha de inicio y termino de la simulación.
- Hora de inicio y término de la simulación.

Requerimientos de Hardware para el desarrollo de las simulaciones

Por la exigencia de memoria y velocidad de cómputo que representa desarrollar simulaciones, se indican a continuación los datos del equipo usado.

- Laptop marca Dell modelo XPS M1530.
- Sistema Operativo Windows Vista Home Premium de 32 bits, versión 6.0 con service pack 2.
- Procesador Intel® Core™ 2Duo CPU 2.00 GHz.

- Memoria Ram de 3GB.
- Tarjeta grafica nVidia GeForce 8600M GT de 512 Mb.
- DirectX versión 10.0

Simulaciones correspondientes a la zona de estudio Bahía Principal

En la zona presentada en la figura 4.2, la principal fuente contaminante es el Río Regadío, por lo que los datos para estos escenarios de simulación están basados en las muestras bacteriológicas tomadas en la desembocadura de este río.

Descarga Río Regadío, escenario abril de 2012. Durante el proceso de muestreo se identificó que en esta época el flujo del río es cero (0), por consecuencia para esta época, la Bahía Principal no tiene entrada de contaminantes a través de este flujo y no se realizó ninguna simulación para este escenario en esta zona.

Descarga Río Regadío, escenario agosto de 2012. Datos generales para el desarrollo de las simulaciones en este escenario:

- Salinidad: 17.20 psu.
- Temperatura: 28.50 °C
- Oxígeno disuelto: 0.50 mg/l
- Flujo del río: 0.02 m³/s
- Fecha de inicio: 14 de agosto de 2012.
- Hora de inicio: 0:00 hrs.
- Fecha de término: 16 de agosto de 2012.
- Hora de término: 23:00 hrs.

Simulando la bacteria *E. coli*. A continuación, en la tabla VIII están los datos necesarios para el desarrollo de esta simulación, la concentración total de bacterias *E. coli* modelada se puede observar en la tabla IV, el periodo de simulación será de 3 días. Para complementar el resultado se utiliza el archivo de viento creado para el escenario de agosto.

Tabla VIII. Datos de la simulación *E. coli*, zona Regadío-agosto 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río	14/agosto/2012 0:00 hrs	<i>E. coli</i>	0.02 m ³ /s
Regadío	16/agosto/2012 23:00 hrs		

En la figura 4.16 se presenta el día uno de la simulación creada para este escenario. En la parte inferior izquierda de la simulación, se presenta una escala de colores que va desde el color azul hasta el color rojo, cada color indica los diferentes valores de las bacterias modeladas. De acuerdo a la normatividad establecida por la OMS (2003) para aguas costeras de uso recreativo, el valor permisible de *E. coli* es de 0 a 100 unidades por cada 100 ml de agua (NMP/100 ml), este rango se encuentra indicado por el color azul.

Según lo establecido por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS 2007), el límite permisible de *E. coli* en aguas costeras para uso recreativo con contacto primario es hasta 400 unidades por cada 100 ml de agua (NMP/100 ml), en la simulación este rango se está indicado con el color naranja con el valor de (101 – 400). Los valores que van desde 401-1400 unidades de *E. coli* (NMP/100 ml) son valores que sobrepasan los límites permisibles establecidos por las dos normas antes mencionadas, lo que significa que se tendrá para el periodo agosto 2012 un problema de contaminación, mismo que puede reflejarse en considerables daños al turismo que visite la zona.

En el anexo B se presentan las imágenes del seguimiento completo de los dos días restantes de la simulación, además por cada día de simulación se presenta una imagen que muestra el historial de dispersión de cada bacteria modelada. Las imágenes con el historial de dispersión ayudan a identificar el alcance que tienen las bacterias en la zona de estudio.

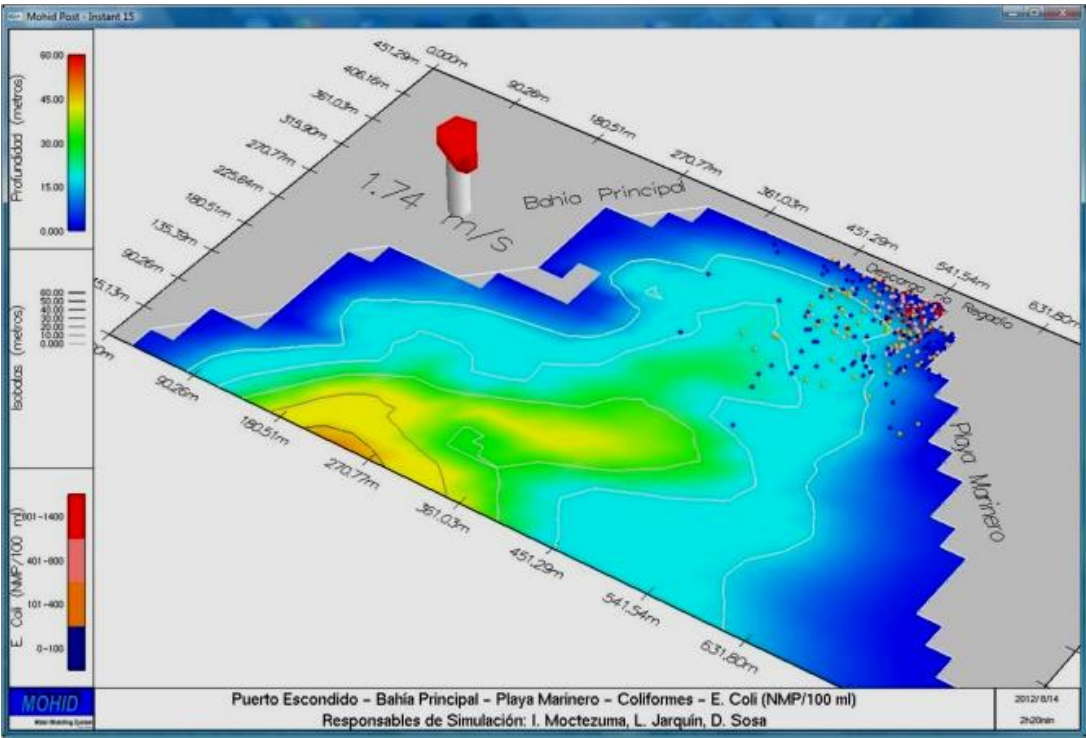


Figura 4.16. Día uno, escenario agosto 2012 *E. coli* en la Bahía Principal.

Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*. A continuación, la tabla IX presenta los datos necesarios para el desarrollo de esta simulación, la concentración total de bacterias *Enterococcus faecalis* modelada se presenta en la tabla IV. El periodo de simulación será de 3 días. Para complementar el resultado se utiliza el archivo de viento creado para el escenario de agosto.

Tabla IX. Datos de la simulación *Enterococcus faecalis*, zona Regadío-agosto 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río	14/agosto/2012 0:00 hrs	<i>Enterococcus faecalis</i>	0.02 m ³ /s
Regadío	16/agosto/2012 23:00 hrs		

En la figura 4.17 se presenta el resultado del día uno de esta simulación. Para hacer práctico el análisis de esta simulación, el total de las bacterias modeladas se ha dividido en rangos, mismos que se presentan en la escala de colores en la esquina inferior izquierda de la figura 4.17. Se muestran en color verde las partículas *Enterococcus faecalis* de origen

animal (de la fauna que habita la zona Regadío). En azul el rango de 1 a 100 *Enterococcus faecalis* (NMP/100 ml) de acuerdo a lo establecido por la OMS (2003). De acuerdo a lo establecido por COFEPRIS (2007) se presentan en color naranja el rango de 101-500 (NMP/100 m l).

En la figura 4.17, los rangos 501-800 y 801-1100 representados por los colores rosa y rojo respectivamente, son los valores que sobrepasan los límites permisibles para aguas de uso recreativo con contacto primario establecido por la OMS y COFEPRIS. Por lo anterior, es evidente que esta zona presentará un problema de contaminación por la bacteria *Enterococcus faecalis*.

En el anexo C se pueden consultar las imágenes correspondientes a los otros dos días de la simulación, por cada día de simulación se presenta también una imagen que muestra el historial de dispersión de las bacterias, en las imágenes que muestran el historial de dispersión se puede observar el área afectada por las bacterias.

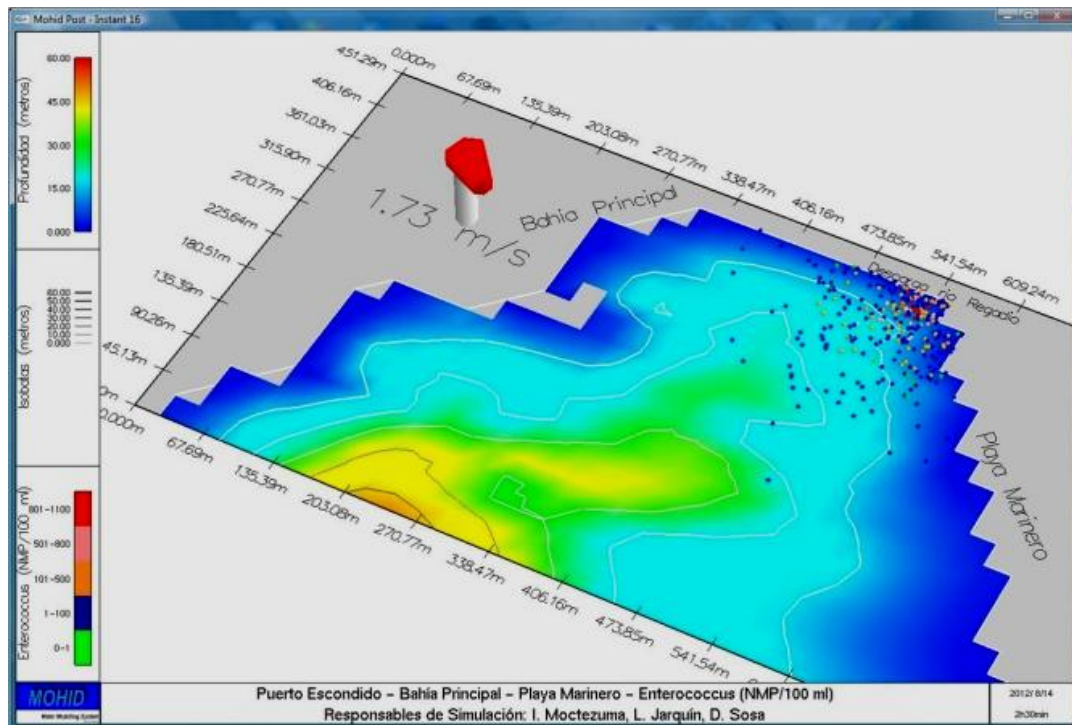


Figura 4.17. Día uno, escenario agosto 2012 *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal.

Descarga Río Regadío, escenario octubre de 2012. Datos generales para el desarrollo de las simulaciones en este escenario:

- Salinidad: 32.8 psu.
- Temperatura: 31.7 °C
- Oxígeno disuelto: 6.8 mg/l
- Flujo del río: 0.03 m³/s
- Fecha de inicio: 27 de octubre de 2012.
- Hora de inicio: 0:00 hrs.
- Fecha de término: 29 de octubre de 2012.
- Hora de término: 23:00 hrs.

Simulando la bacteria *E. coli*. En la tabla X se establecen los parámetros de esta simulación, para este escenario la concentración de bacterias *E. coli* modelada se puede observar en la tabla III, de igual forma a las simulaciones anteriores el tiempo de simulación es de tres días. A diferencia del escenario pasado, el flujo del río se ha incrementado dado que la época de simulación en este escenario corresponde al periodo de lluvias.

Tabla X. Datos de la simulación *E. coli*, zona Regadío-octubre 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río Regadío	27/octubre/2012 0:00 hrs 29/octubre/2012 23:00hrs	<i>E. coli</i>	0.03 m ³ /s

En la figura 4.18 se muestra el resultado final para el día uno de esta simulación. En la escala de colores, en colores azul, las bacterias *E. coli* en el rango 0-100 NMP/100 ml, que es el límite permisible establecido por la OMS (2003), en color naranja el rango de 101-400 que es el límite establecido por COFEPRIS (2007). Como se puede observar los colores rosa y rojo con rangos 401-800 y 801-1200 respectivamente representan la alta contaminación en la zona, sin embargo esto solo ocurre en la desembocadura del río y su desplazamiento no superan los 360 metros mar adentro.

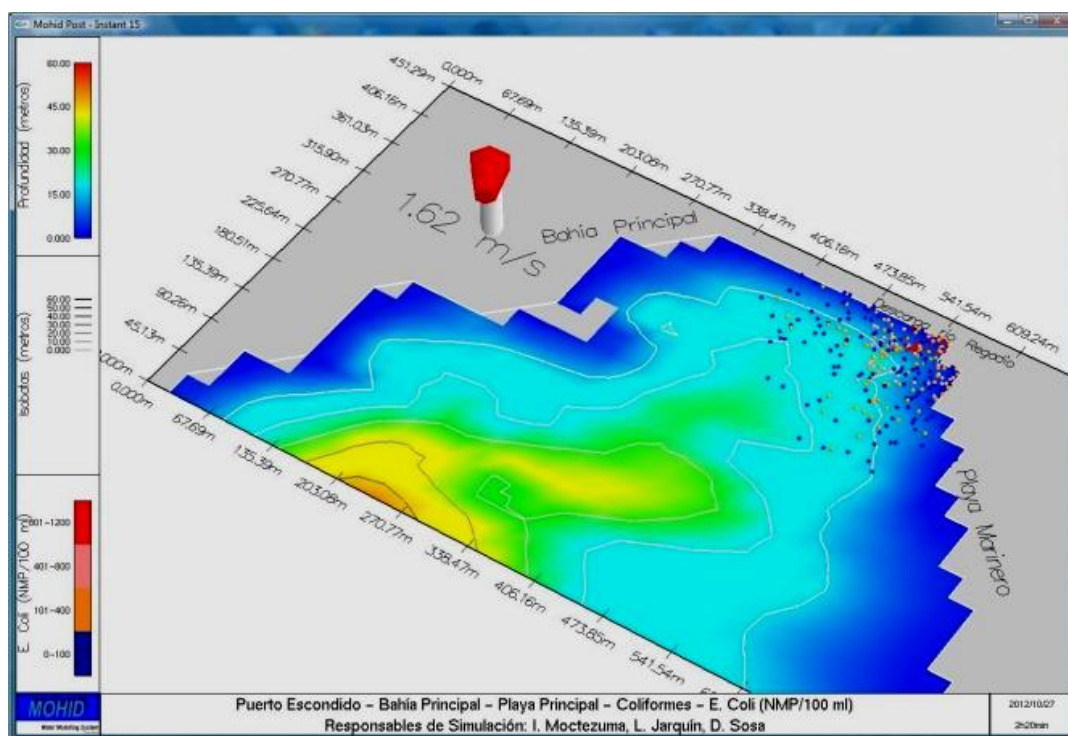


Figura 4.18. Día uno, escenario octubre 2012 *E. coli* en la Bahía Principal.

Consultar el anexo D para ver las imágenes correspondientes a los dos días restantes de la simulación. En este anexo también se presentan las imágenes con el historial de dispersión de las bacterias.

Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*. En la tabla XI se presentan los parámetros para la simulación, en este escenario la concentración de bacterias *Enterococcus faecalis* modeladas se presenta en la tabla III.

Tabla XI. Datos de la simulación *Enterococcus faecalis*, zona Regadío-octubre 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río	27/octubre/2012 0:00 hrs	<i>Enterococcus</i>	0.03 m ³ /s
Regadío	19/octubre/2012 23:00hrs	<i>faecalis</i>	

En la figura 4.19 se presenta una captura de la ejecución referente al día uno de dicha simulación. Las partículas en color verde representan a los *Enterococcus faecalis* de la fauna local, en color azul se presenta el límite permisible establecido por la OMS (2003)

para aguas costeras de uso recreativo con contacto primario, en color naranja se presenta el limite permisible establecido por la COFEPRIS (2007), las escalas en color rosa, rojo y rojo oscuro representan el exceso de bacterias, que están principalmente en el punto inicial de la descarga y se puede apreciar que éstas no se desplazan a más de 360 metros hacia adentro de la bahía.

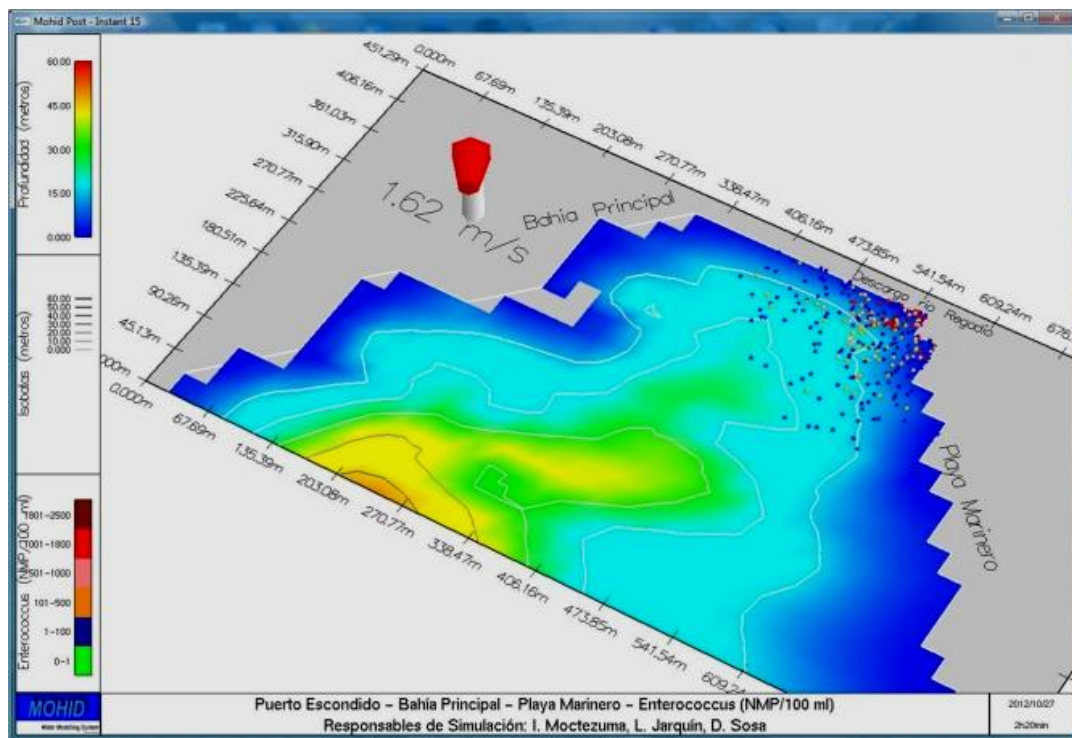


Figura 4.19. Día uno, escenario octubre 2012 *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal.

En el anexo E se muestra una secuencia de imágenes, mismas que presentan los dos días restantes de la simulación; por cada día de simulación también se muestra una imagen con el historial de dispersión de las bacterias modeladas.

Simulaciones correspondientes a la zona de estudio Playa Colotepec

Como se observa en la figura 4.8, en esta zona la principal fuente contaminante es el Río Colotepec, por lo que los datos para estos escenarios de simulación están basados en las muestras tomadas en la desembocadura de este de río, misma que en las simulaciones se ha colocado como punto de descarga.

Descarga Río Colotepec, escenario abril 2012. Datos generales para el desarrollo de las simulaciones en este escenario:

- Salinidad: 34.29 psu.
- Temperatura: 27.9 °C
- Oxígeno disuelto: 6.47 mg/l
- Flujo del río: 4.92 m³/s
- Fecha de inicio: 03 de abril de 2012.
- Hora de inicio: 0:00 hrs.
- Fecha de término: 05 de abril de 2012.
- Hora de término: 23:00 hrs.

Simulando la bacteria *E. coli*. En la tabla XII se muestran los parámetros específicos para la simulación de *E. coli*, en este escenario la concentración de bacterias modelada se puede observar en la tabla VI.

Tabla XII. Datos de la simulación *E. coli*, zona Colotepec-abril 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río Colotepec	3/abril/2012 0:00 hrs 5/abril/2012 23:00hrs	<i>E. coli</i>	4.92 m ³ /s

En la figura 4.20 se muestra una captura del día uno de dicha simulación, en la escala de colores se presentan solo tres rangos de clasificación: el primero en color azul que representa el límite permisible establecido por la OMS (2003) para aguas costeras de uso recreativo con contacto primario, el segundo en color naranja representa al límite establecido por la COFEPRIS (2007). El último rango cuyo color en la simulación es rojo, representa el exceso de contaminación y cuya concentración es de 401 a 700 (NMP/100 ml) unidades por cada 100 ml de agua, por lo general este rango sólo está en el punto de la descarga y no se desplazará a más 600 metros mar adentro.

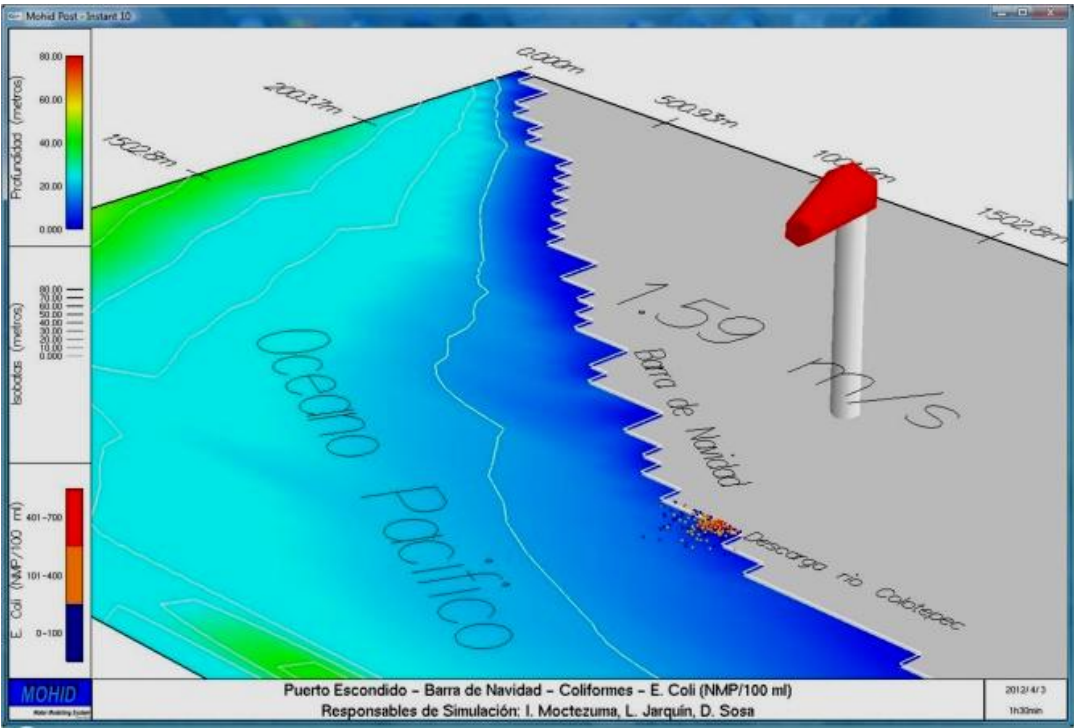


Figura 4.20. Día uno, escenario abril 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

Consultar el anexo F para ver las capturas de los días dos y tres de la simulación, asimismo se presentan imágenes con el historial de dispersión de las bacterias para los días uno, dos y tres. El historial de dispersión ayudará a observar el alcance que tienen las bacterias sobre el área de estudio.

Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*. En la tabla XIII se establecen los parámetros para la simulación las bacterias *Enterococcus faecalis*, para este escenario la concentración de bacterias modelada se puede observar en la tabla VI.

Tabla XIII. Datos de la simulación *Enterococcus faecalis*, zona Colotepec-abril 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río Colotepec	3/abril/2012 0:00 hrs 5/abril/2012 23:00hrs	<i>Enterococcus faecalis</i>	4.92 m ³ /s

La concentración de *Enterococcus faecalis* modelados para este escenario es de 1 (NMP/100 ml) mismo que se muestra en la figura 4.21, donde se presenta el día uno de esta

simulación. Así también, se estima que la mayoría de esta concentración sean bacterias *Enterococcus faecalis* de proveniente de la fauna que habita en la zona (Domínguez-Hernández et al. 2008b), las cuales están indicadas en la simulación con color verde. Por lo anterior, es importante mencionar que este escenario de simulación es el único que no presenta problemas de exceso de contaminación por esta bacteria.

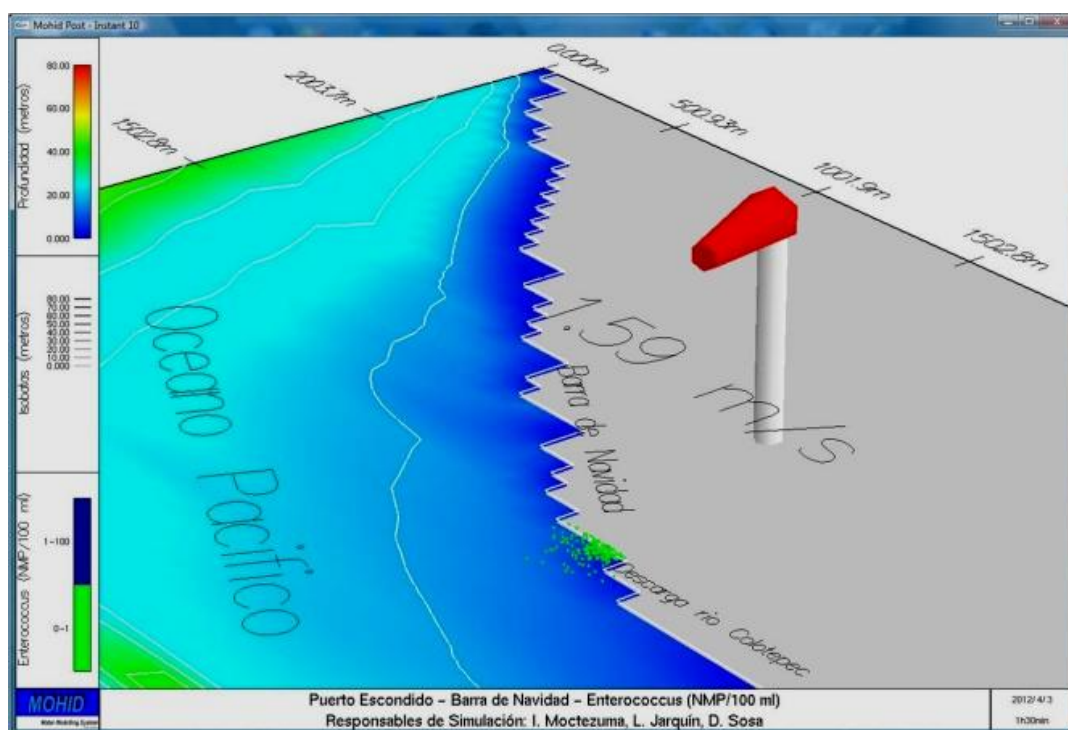


Figura 4.21. Día uno, escenario abril de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

En el anexo G se presentan las imágenes correspondientes a los días dos y tres de la simulación correspondiente a este escenario, asimismo se muestran imágenes con el historial de dispersión de las bacterias para los días uno, dos y tres.

Descarga Río Colotepec, escenario agosto 2012. Datos generales para el desarrollo de las simulaciones en este escenario:

- Salinidad: 17.20 psu.
- Temperatura: 28.50 °C

- Oxígeno disuelto: 0.50 mg/l
- Flujo del río: 40.5 m³/s
- Fecha de inicio: 14 de agosto de 2012.
- Hora de inicio: 0:00 hrs.
- Fecha de término: 16 de agosto de 2012.
- Hora de término: 23:00 hrs.

Simulando la bacteria *E. coli*. En la tabla XIV se establecen los parámetros complementarios para la simulación de bacterias *E. coli*, en este escenario la concentración de bacterias modelada se presenta en la tabla VII.

Tabla XIV. Datos de la simulación *E. coli*, zona Colotepec-agosto 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río	14/agosto/2012 0:00 hrs	<i>E. coli</i>	40.5 m ³ /s
Colotepec	16/agosto/2012 23:00hrs		

Debido a la alta concentración de bacterias *E. coli* modeladas, en esta simulación hay un excedente de contaminación, mismo que supera los límites permisibles establecidos por la OMS (2003), representado en la simulación con partículas de color azul, y la COFEPRIS (2007), representado en las partículas con color naranja. Como se ha venido mencionando en las anteriores simulaciones el exceso de contaminación está generalmente en el punto de la descarga y el avance de estas partículas no supera los 600 metros mar adentro. En la figura 4.22 se presenta la captura de la ejecución correspondiente al día uno de esta simulación, en donde se muestran los límites arriba mencionados.

En el anexo H se pueden observar las imágenes correspondientes a las capturas de los días dos y tres de la simulación de este escenario. En este anexo también se presentan las imágenes con el historial de dispersión de las bacterias en los días uno, dos y tres.

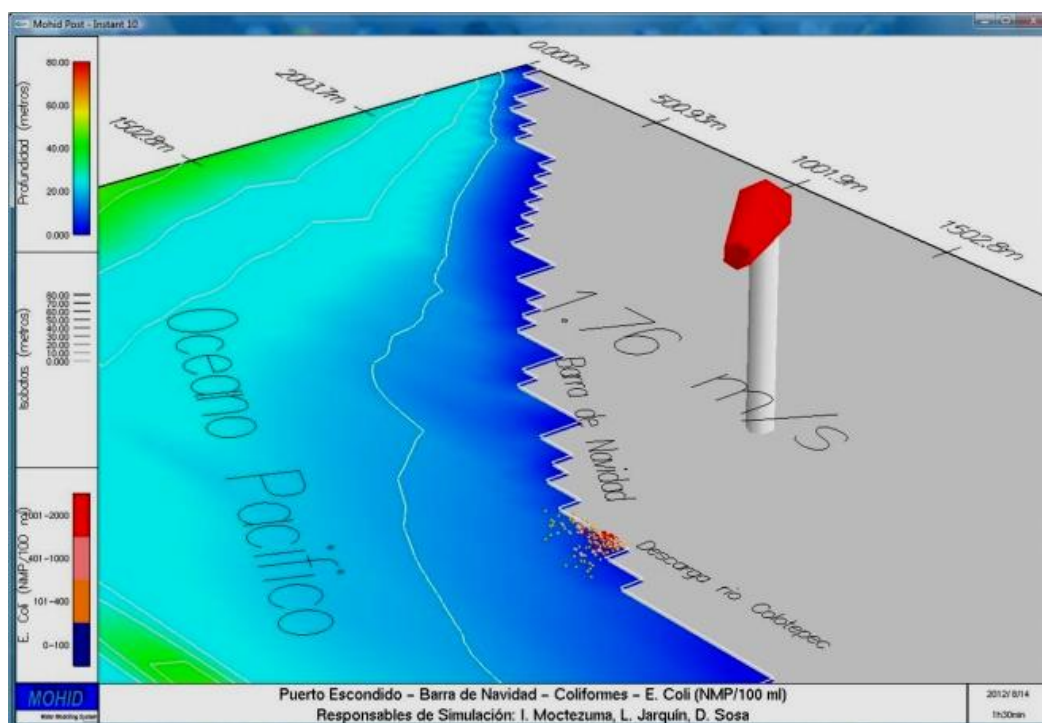


Figura 4.22. Día uno, escenario agosto de 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*. La tabla XV presenta los parámetros complementarios para el desarrollo de esta simulación, en este escenario la concentración de bacterias *Enterococcus faecalis* modelada se puede observar en la tabla VII.

Tabla XV. Datos de la simulación *Enterococcus faecalis*, zona Colotepec-agosto 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río Colotepec	14/agosto/2012 0:00 hrs 16/agosto/2012 23:00 hrs	<i>Enterococcus faecalis</i>	40.5 m ³ /s

Dado el número de bacterias *Enterococcus faecalis* modeladas en este escenario (Tabla VII), se concluye que en esta playa no habrá exceso de contaminación ya que los rangos establecidos están dentro de los límites permisibles establecidos por la OMS (2003), el rango de partículas en color azul, y la COFEPRIS (2007), cuyo rango se indica en la simulación con las partículas de color naranja (Fig. 4.23).

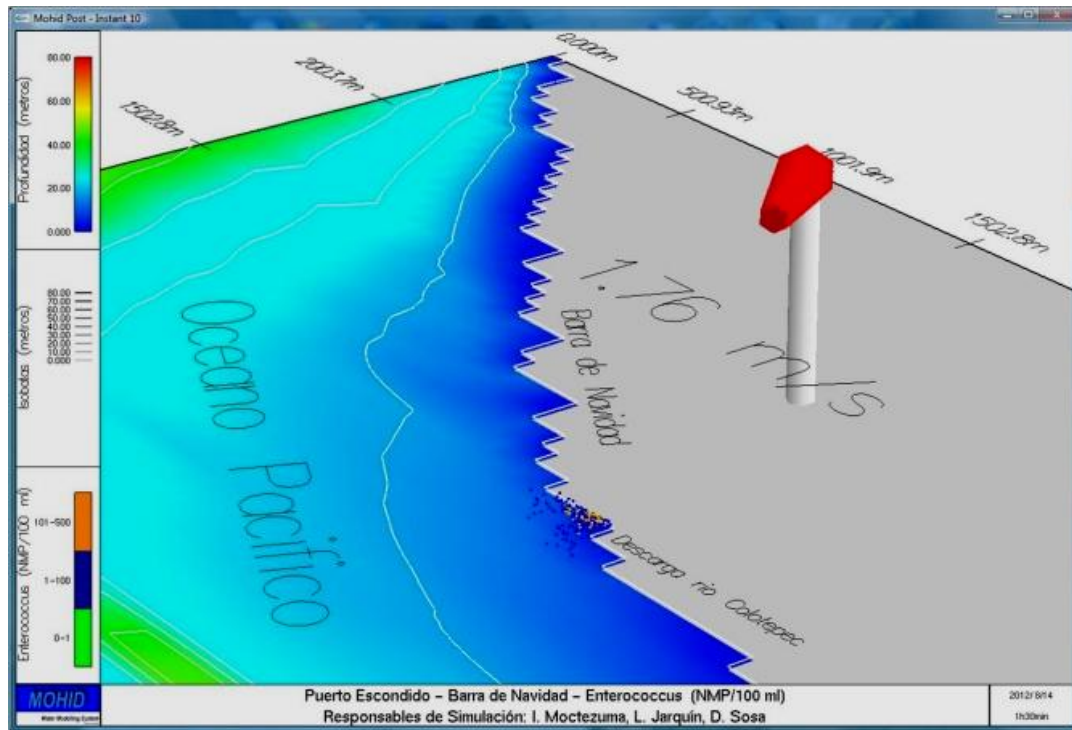


Figura 4.23. Día uno, escenario agosto de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

Para consultar las imágenes correspondientes a los días dos y tres de la simulación ver el anexo I, también se presentan en este anexo las imágenes con el historial de dispersión de las bacterias para los días uno, dos y tres. En las imágenes con el historial de dispersión se puede observar el alcance, así como el impacto que tienen las bacterias sobre el área de estudio.

Descarga Río Colotepec, escenario octubre de 2012. Datos generales para el desarrollo de las simulaciones en este escenario:

- Salinidad: 32.9 psu.
- Temperatura: 30.7 °C
- Oxígeno disuelto: 7.2 mg/l
- Flujo del río: 47.55 m³/s
- Fecha de inicio: 27 de octubre de 2012.

- Hora de inicio: 0:00 hrs.
- Fecha de término: 29 de octubre de 2012.
- Hora de término: 23:00 hrs.

Simulando la bacteria *E. coli*. En la tabla XVI se presentan los parámetros específicos para la construcción de la simulación correspondiente al escenario Colotepec-octubre 2012, la concentración de bacterias *E. coli* que se modela en este escenario se puede observar en la tabla V.

Tabla XVI. Datos de la simulación *E. coli*, zona Colotepec-octubre 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río Colotepec	27/octubre/2012 0:00 hrs 29/octubre/2012 23:00hrs	<i>E. coli</i>	47.55 m ³ /s

La concentración de bacterias modeladas (Tabla V) es un claro indicador de que en este escenario existe un exceso de contaminación. Los límites permisibles establecidos por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007), establecen 100 NMP/100 ml y 400 NMP/100 ml respectivamente, mismos que se pueden apreciar en la captura de pantalla de la ejecución del día uno de esta simulación en la figura 4.24, de color Azul. Los rangos de bacterias representados en colores rosa (401-1000 NMP/100 ml), rojo (1001-2000 NMP/100 ml) y rojo oscuro (2001-3000 NMP/100 ml) indican el exceso de contaminación, mismo que generalmente se presenta en la desembocadura del Río Colotepec, tal concentración de bacterias no avanza a más de 600 metros mar adentro.

En el anexo J se pueden observar las imágenes que muestran los días dos y tres de la simulación, para cada día de simulación se presenta también una imagen mostrando el historial de dispersión de las bacterias, en estas se puede observar el alcance que tienen las bacterias sobre esta zona de estudio.

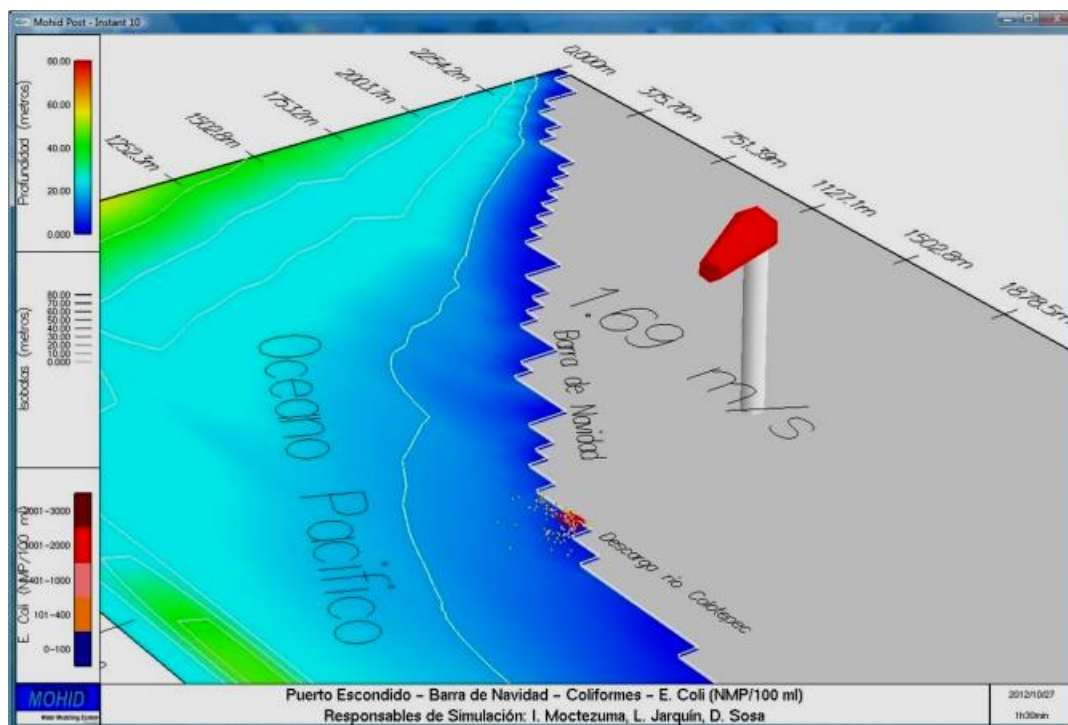


Figura 4.24. Día uno, escenario octubre de 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*. La tabla XVII presenta los datos complementarios correspondientes al desarrollo de esta simulación la concentración de bacterias *Enterococcus faecalis* para este escenario se presenta en la tabla V.

Tabla XVII. Datos de la simulación *Enterococcus faecalis*, zona Colotepec-octubre 2012.

Lugar	Periodo de simulación	Bacteria modelada	Flujo del río
Río	27/octubre/2012 0:00 hrs	<i>Enterococcus</i>	47.55 m ³ /s
Colotepec	29/octubre/2012 23:00hrs	<i>faecalis</i>	

En la figura 4.25 se puede observar que la cantidad de bacterias *Enterococcus faecalis* modelada no representa un problema de exceso de contaminación. En dicha figura se presenta de color azul el límite permisible establecido por la OMS (2003), de color naranja el límite establecido por la COFEPRIS (2007). La mayor concentración de bacterias, de color naranja, se encuentra en el punto de la descarga. En color verde se presentan las bacterias *Enterococcus faecalis* proveniente de la fauna que habita en la zona

cuya concentración es de 1 NMP/100 ml. La dispersión de estas bacterias son las que más avanzan hacia mar adentro, sin embargo dicha dispersión no superan los 600 metros.

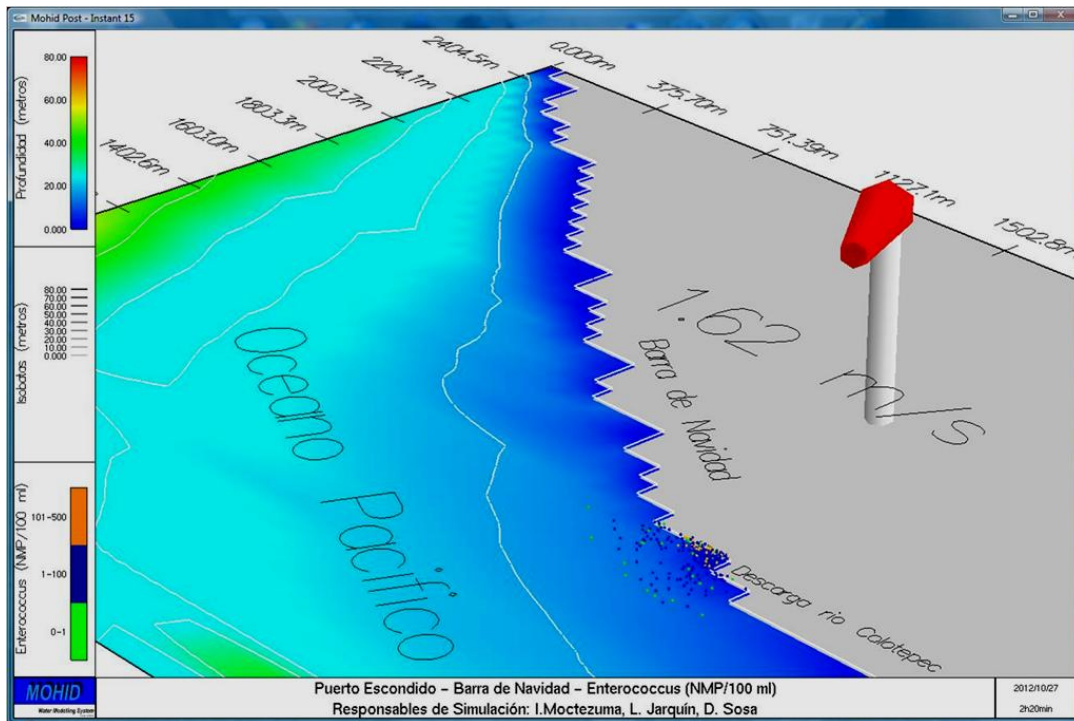


Figura 4.25. Día uno, escenario octubre de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

En el anexo K se muestran las imágenes correspondientes a los días dos y tres de la simulación, también se presentan las imágenes con el historial de dispersión para los días uno, dos y tres de la simulación.

Conclusiones. En este capítulo solo se ha mostrado un día para cada escenario de simulación planteado; para ver los dos días restantes de cada simulación se recomienda consultar los anexos B, C, D, E, F, G, H, I, J y K. En estos se presentan las capturas de las simulaciones con el historial de seguimiento de las bacterias modeladas. También en este capítulo se han analizado los resultados obtenidos con el desarrollo de dichas simulaciones.

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones generales y los trabajos futuros que pudieran surgir de este interesante proyecto de tesis.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Conclusiones

Gracias al avance tecnológico se han creado potentes herramientas de hardware y de software que han venido a revolucionar la era de la investigación. El avance de dichas herramientas se refleja sin duda en el resultado presentado en este trabajo de tesis el cual se logró gracias a una herramienta de éstas, mismo que consistió en la creación de simulaciones predictivas que ayuden a conocer en materia de contaminación ambiental parte del futuro de la Playa Colotepec y la Bahía Principal de Puerto Escondido Oaxaca. A lo largo de este proyecto se han abordado, con éste, cinco capítulos muy importantes, a través de los cuales se detalló desde el proceso de preparación y depuración de los datos hasta llegar al paso de desarrollo y análisis de las simulaciones a futuro y con esto determinar el comportamiento de la dispersión de las bacterias *Enterococcus faecalis* y *E. coli*.

Las simulaciones fueron desarrolladas en tres escenarios, modelando para cada una de las bacterias antes mencionadas en las dos zonas de estudio: la Bahía Principal y la Playa Colotepec. Dada la concurrencia turística de Puerto Escondido en las diferentes épocas del año, se plantearon dichos escenarios y para los cuales tras desarrollar este interesante proyecto de tesis, se llegó a las siguientes conclusiones.

Escenario de secas con afluencia turística alta. Se da en el mes de abril, ya que es en esta temporada cuando el servicio al turismo se incrementa, provocando un mayor consumo en los recursos de la zona como el servicio en los restaurantes, hoteles, cabañas y bungalows.

Dado que el flujo del Río Regadío en esta época es nulo, para el mes de abril de 2012 no se espera entrada de contaminantes a la Bahía Principal a través de este río.

En lo que respecta a la Playa Colotepec, con base en las simulaciones realizadas en la tesis “Simulaciones bajo diferentes escenarios para determinar la calidad de agua de las playas de Puerto Escondido” (Jarquín-Pérez 2010) cuyo valor modelado de la bacteria *E. coli* es de 583 (NMP/100 ml), se espera un incremento de 77 unidades (NMP/100 ml), provocando consecuentemente un excedente de contaminación de 260 (NMP/100 ml) unidades de esta bacteria, mismo que supera los límites permisibles establecidos por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007). En cuanto a la bacteria *Enterococcus faecalis*, es importante mencionar que no se espera cambio alguno en la cantidad de este tipo de bacterias, concluyendo así que en este escenario no se presentarán problemas de contaminación.

Escenario de lluvias con afluencia turística normal. Se da en el mes de agosto cuando se inicia la temporada de lluvias para Puerto Escondido y es en esta época donde se incrementa el nivel de agua de los ríos Regadío y Colotepec, quienes arrastran los desechos contaminantes hacia el mar, así también el consumo de los servicios turísticos es normal.

Para la zona de estudio Bahía Principal, respecto a la bacteria *E. coli* se espera un incremento de 156 unidades (NMP/100 ml), en comparación con los valores obtenidos durante la toma de muestras bacteriológicas en agosto de 2008 (Jarquín-Pérez 2010) cuya cantidad total modelada fue de 1778 (NMP/100 ml), se pronostica un exceso de contaminación sobrepasando numéricamente el límite permitido por la OMS (2003) y la

COFEPRIS (2007) en 934 unidades (NMP/100 ml). En la simulación realizada para modelar la bacteria *Enterococcus faecalis* y con base en los valores usados en la simulación del escenario agosto 2008 (Jarquín-Pérez 2010), se espera que éste se incremente en 127 unidades (NMP/100) trayendo consigo un exceso de contaminación de 588 unidades (NMP/100 ml) de esta bacteria, mismo que también rebasa el límite establecido por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007).

En la otra zona de estudio, la Playa Colotepec, en la simulación realizada para modelar la bacteria *E. coli*, con base en los datos usados para las simulaciones del escenario agosto 2008 (Jarquín-Pérez 2010), se espera que ésta se incremente en 229 unidades (NMP/100 ml), con este aumento se espera un excedente de contaminación que supera los límites permisibles establecidos por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007) en 1562 unidades (NMP/100 ml). Respecto a la simulación hecha para modelar la bacteria *Enterococcus faecalis* se espera un incremento de 44 unidades (NMP/100 ml), con un total de 375 unidades (NMP/100 ml) modeladas, se concluye que en este escenario la Playa Colotepec no presentará problemas de contaminación pues los valores esperados se encuentran dentro del rango permisible según la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007).

Escenario de lluvias con afluencia turística baja. En el mes de octubre, en esta época del año el consumo de servicios turísticos en los restaurantes, hoteles, cabañas y bungalows, es el más bajo de todas las temporadas y usualmente es el turismo local quien hace dicho consumo. Dado que en este mes también se presentan lluvias en la zona, los ríos arrastran la materia contaminante hacia el mar, dicho arrastre es de menor intensidad pues dos meses atrás (agosto, el escenario anterior) también se presentaron lluvias, provocando el mismo efecto de arrastre.

En la Bahía Principal, la simulación hecha para modelar la bacteria *E. coli*, arrojó como resultado un excedente de contaminación de 725 unidades (NMP/100 ml), por lo que se espera tener un problema de contaminación de 1125 unidades (NMP/100 ml), mismo que sobrepasa el límite permisible establecido por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007). La simulación realizada para modelar la bacteria *Enterococcus faecalis*, proyectó un resultado con exceso de contaminación, pues se espera que para el mes de octubre de 2012 se tengan

2479 unidades (NMP/100 ml), valor que numéricamente supera en 1979 unidades (NMP/100 ml) el límite permisible establecido por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007)

En la Playa Colotepec, la simulación para modelar la bacteria *E. coli* dio como resultado valores que superan numéricamente los límites establecidos por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007) en 2433 unidades (NMP/100 ml). En la simulación realizada para modelar la bacteria *Enterococcus faecalis*, se esperan 388 unidades (NMP/100 ml) dicho valor se encuentra dentro de los rangos establecidos por la OMS (2003) y la COFEPRIS (2007) por lo que se concluye que para esta playa no habrá problemas de contaminación respecto a esta bacteria.

Conclusión final. Dadas las conclusiones anteriores, se concluye también que de las dos zonas estudio la que menos problemas de contaminación presentó fue la Playa Colotepec en el modelado de la bacteria *Enterococcus faecalis* para los escenarios abril, agosto y octubre de 2012. Siendo la Bahía Principal la zona que se pronostica tenga más problemas. En ambos casos se concluye que habrá problemas de contaminación ocasionados principalmente por la bacteria *E. coli*.

En las simulaciones creadas para la Bahía Principal, se observó que el patrón de comportamiento de las bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* está dado por la distribución uniforme en toda la bahía, teniendo un desplazamiento no mayor a los 360 metros mar adentro. En lo que respecta a la Playa Colotepec, la distribución esperada por dichas bacterias tiene un desplazamiento no mayor a los 600 metros mar adentro, sin embargo dicha distribución afecta en gran medida la desembocadura del río Colotepec no afectando a toda la playa, lugar que generalmente es más concurrido por los visitantes que la desembocadura del río.

Trabajos futuros

Aunque este proyecto de tesis ha colaborado satisfactoriamente con el desarrollo del proyecto “Estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido (caracterización y análisis)” y ha cumplido con todo lo requerido por el mismo, no deja de inquietar la idea de innovar y crear nuevos proyectos de investigación en donde la gente de informática e

investigadores interesados en el medio ambiente tengan nuevos quehaceres. Dentro de los trabajos futuros y mejoras a este proyecto de tesis se citan los siguientes.

Las simulaciones creadas en este trabajo se hicieron sólo con los datos de viento. Como se ha mencionado en las limitantes de este proyecto establecidas en el capítulo 2, las simulaciones creadas carecen de los datos que describen la dirección y velocidad de las corrientes marinas. Por lo anterior se propone complementar este proyecto agregando a las simulaciones los datos de las corrientes marinas que pasan por las costas de puerto escondido, en especial las cercanas a la Bahía Principal y Playa Colotepec.

En este proyecto de tesis se desarrollaron simulaciones para observar el comportamiento de las bacterias y estado de contaminación de la Bahía Principal y Playa Colotepec para el año 2012 y con un periodo de simulación de tres días en cada escenario, con base en estos datos se propone desarrollar simulaciones para más años y asimismo incrementar el periodo de simulación de cada escenario.

Otro campo de acción para complementar este proyecto es crear una malla batimétrica más grande, misma que cubra las dos zonas de interés (Bahía Principal y Playa Colotepec), a fin de desarrollar simulaciones que permitan modelar las dos zonas de estudio al mismo tiempo y a su vez exista la posibilidad de modelar descargas múltiples de las dos bacterias estudiadas. Tómese en cuenta que para desarrollar esto se requerirá un equipo de superior al establecido en la subsección “Requerimientos de Hardware para el desarrollo de las simulaciones” del capítulo 4.

Puerto Escondido, así como sus playas y bahías son un lugar de gran concentración turística local, nacional e internacional, por esta razón se propone implementar un sistema de monitoreo basado en web. Con base en los datos obtenidos en este proyecto, desarrollar simulaciones que pronostiquen el estado de contaminación de la zona durante las épocas correspondientes a los escenarios planteados en esta tesis. Esto pudiera obligar en cierta medida a las autoridades y prestadores de servicios a comprometerse con el bienestar sanitario de Puerto Escondido, provocando así un incremento en la calidad de sus servicios.

Dado que este proyecto plantea una proyección a futuro del estado de contaminación de la Bahía Principal y Playa Colotepec de Puerto Escondido, no es posible

hacer una verificación minuciosa de los resultados arrojados. Basándose en el grado de exactitud de la tesis “Simulaciones bajo diferentes escenarios para determinar la calidad de aguas de las playas de Puerto Escondido” (Jarquín-Pérez 2010), también se puede decir que los resultados de esta tesis tienen un 75% de semejanza a la realidad. Por lo anterior, surge la idea de que en el año 2012 se realice un nuevo muestreo en las zonas estudiadas y en los escenarios planteados en este proyecto de tesis, a fin de determinar el grado de semejanza de este proyecto con la realidad.

Se espera que los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis sirvan a la sociedad, así como a las autoridades vigentes de Puerto Escondido, a tomar decisiones y ejercer acciones que ayuden a la mejora de la calidad de las aguas de nuestro destino turístico. Asimismo es importante mencionar que la mejora de la situación ambiental de la Bahía Principal y Playa Colotepec de Puerto Escondido es también tarea de la sociedad. Se debe ser consciente de que si el grado de contaminación por bacterias *E. coli* y *Enterococcus faecalis* sigue afectando a las zonas antes mencionadas, al grado de que se lleguen a cumplir los escenarios planteados y obtenidos en esta tesis, se pueden contraer severos daños a la salud de la comunidad visitante, reduciendo así el atractivo turístico de Puerto Escondido.

Para los investigadores de estos tiempos, observar y predecir el comportamiento de cierto sistema ha sido un reto bastante complicado, principalmente cuando todas las variables son dadas por la naturaleza y siendo ésta en nuestros días de carácter muy impredecible. Afortunadamente el avance tecnológico de nuestra era nos ha llevado sin duda a fronteras que hace unas décadas jamás hubiésemos imaginado.

ANEXO A. EL ENTORNO DE TRABAJO MOHID

En cuanto a la organización del entorno de trabajo de MOHID, se pueden encontrar tres componentes esenciales.

1. **Herramientas numéricas:** Que son las encargadas de efectuar el cálculo de los diferentes módulos y otras herramientas auxiliares de MOHID. Todas estas herramientas están escritas en lenguaje FORTRAN 95, basadas en un diseño orientado a objetos. Las dos principales herramientas numéricas del modelo MOHID son: MOHID Agua y MOHID Tierra.
2. **Traspaso y almacenamiento de datos:** Se encarga de guardar la información producida por el modelo.
3. **Interfaces de usuario (GUI):** Permite el manejo de entrada, control de ejecución del modelo y el análisis de resultados. El intercambio de información entre las herramientas numéricas y las interfaces gráficas de usuario se logra a través de dos formatos de archivo:

- El formato implementado por la clase `EnterData` que permite la escritura y la lectura de archivos ASCII de datos estructurados con forma muy similar a los archivos XML. Con el fin de intercambiar información entre las herramientas numéricas escritas en FORTRAN 95 y la interfaz gráfica de usuario escrito en Visual Basic .NET. La clase `EnterData` se ha desarrollado en ambos lenguajes.
- El formato de datos jerárquica (HDF). Otra forma de intercambio de información entre las herramientas numéricas y la interfaz gráfica de usuario, es por medio de la clase `HDF` que al igual que la clase `EnterData` está escrita en FORTRAN 95 y en Visual Basic .NET.

El entorno de trabajo MOHID consta también de tres principales núcleos ejecutables: MOHID Water (agua), MOHID Land (Tierra) y MOHID Soil (Suelo). La integración de éstos se utiliza para estudiar el ciclo del agua en un enfoque integrado. Dado que estas herramientas se basan en el mismo marco, el acoplamiento de ellas es fácil de lograr. La figura A.1 presenta de manera gráfica la distribución del entorno de trabajo de MOHID.

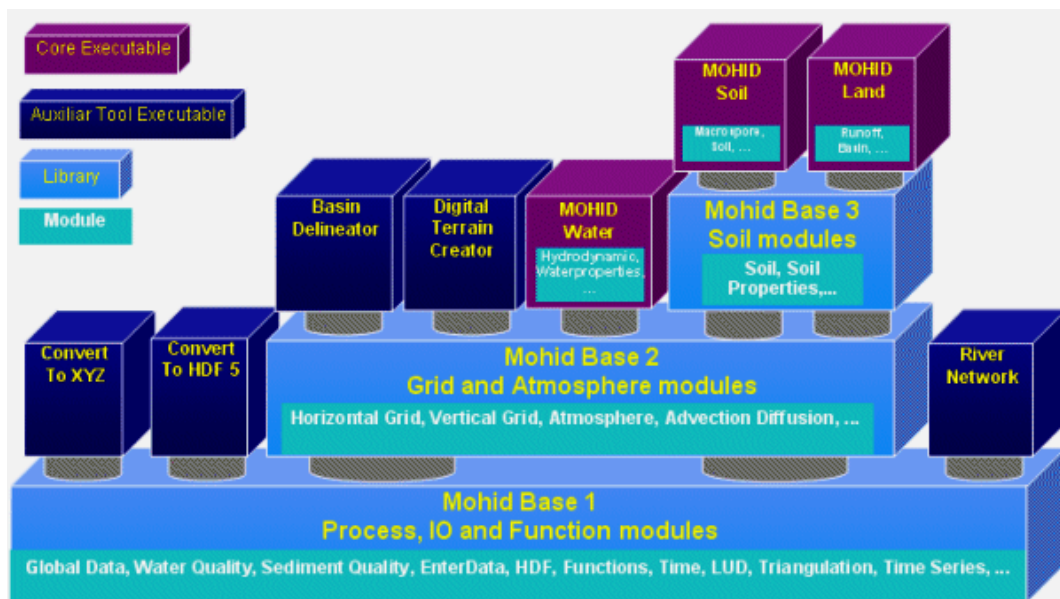


Figura A.1. Arquitectura del entorno de trabajo de MOHID.

En la base se encuentran dos bibliotecas de gran importancia: MOHID Base 1 y MOHID Base 2. Éstas son las encargadas de resolver cualquier problema específico del modelo, ya sea numérico, de procesamiento de datos de entrada y salida, etc.

- **Biblioteca MOHID Base 1:** Se encuentra en la base del entorno de trabajo MOHID. Agrupa las funciones que realizan las tareas de entrada y salida de datos; es decir, lee los archivos que contienen los datos de entrada para llevar a cabo las simulaciones de MOHID y escribe en archivos los resultados obtenidos de las mismas. Una vez terminada la simulación, estos archivos son analizados por otras herramientas para llevar a cabo el trabajo de post-procesamiento. Además de encargarse de realizar funciones de cálculo típicas, como la resolución de sistemas lineales, la biblioteca MOHID Base 1 es la encargada de establecer los tiempos de cada simulación realizada; esto gracias a que cuenta con módulos específicos que se encargan del manejo del tiempo.
- **Biblioteca MOHID Base 2:** A diferencia de la anterior, que utiliza únicamente módulos dentro de la misma biblioteca, esta biblioteca usa módulos existentes dentro de MOHID Base 1 para realizar cálculos más complejos que MOHID Base 2 no brinda por sí mismo y que sirven para otros módulos que se encuentran más arriba en la arquitectura del entorno de trabajo.

Principales Núcleos ejecutables de MOHID

A continuación se describen los tres núcleos ejecutables del sistema MOHID.

MOHID Land (tierra). Es un programa diseñado para simulaciones en cuencas (flujo por tierra, zonas saturadas y no saturadas, mantos acuíferos y red de drenaje). Algunas de las clases desarrolladas para este programa están relacionadas con los procesos que ocurren en las cuencas, ejemplo de éstas son:

- Clase `RunOff` (o clase de escorrentía), que calcula el escurrimiento de agua en una superficie terrestre sobre un área determinada, que generalmente en el modelo se especifica con una malla estructurada, el cálculo se hace en función de la precipitación, la infiltración y la pendiente del terreno. La infiltración es

calculada a través de la ecuación de Richards, mientras que la escorrentía es calculada por la ecuación de Manning.

- Clase de infiltración que se ocupa de los procesos de infiltración.
- Red de drenaje que se encarga del manejo del enrutamiento de agua dentro de los ríos.

MOHID Soil (suelo). Este programa está diseñado para crear simulaciones sobre el flujo de agua en el suelo, así también, permite el estudio de medios porosos saturados y no saturados a través de la resolución de la ecuación de Richards.

MOHID Water (agua). Se trata de un programa numérico tridimensional muy versátil, que simula diversos procesos que ocurren en cuerpos de agua como ríos, reservas, estuarios, áreas costeras u océanos. Es uno de los programas más importantes dentro del sistema de modelado MOHID. Las principales áreas científicas cubiertas por MOHID Water son:

- Hidrodinámica. Pautas de circulación y velocidad del transporte del agua en el modelo así como las propiedades presentes en ella (fitoplancton, nitrato, arsénico, amoníaco, etc.).
- Ondas. Olas de difracción y refracción, así como su influencia en el transporte de sedimentos.
- Transporte de sedimentos. Movimiento vertical, horizontal e inferior de los sedimentos.
- Calidad del agua. Producción primaria y secundaria del ciclo de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Pluma de dispersión (JetModel). Simula la dilución inicial y la trayectoria de los fluidos asociados a los chorros de desagüe.
- Pluma de dispersión (Módulo de transporte lagrangeano). Simula la dispersión y la trayectoria de los fluidos.
- Derrames de hidrocarburos. Predicción y simulación de la trayectoria de los procesos de meteorización que participan en el derrame de petróleo.
- Turbulencia. Determina el impulso de transporte turbulento.

Principales módulos de MOHID

El módulo Model (Modelo). Es el módulo principal en la arquitectura del sistema. Maneja toda la información de un solo módulo. Dentro de sus funciones principales destacan la ejecución de las coordenadas del módulo hidrodinámico y de transporte y la coordinación de la comunicación entre los módulos padre-hijo entre los módulos anidados. Cuando se trabaja con modelos anidados las comunicaciones entre estos se hacen de forma recursiva, es decir, las condiciones iniciales y otros datos que se calculan durante la simulación se envían desde el padre al hijo.

- Depende de los módulos: Hidrodinámico (Hydrodynamic), Propiedades del agua (WaterProperties) y Lagrangeano (Lagrangian) (Fig. A.2).
- Es el responsable de construir, modificar y destruir cada modelo.

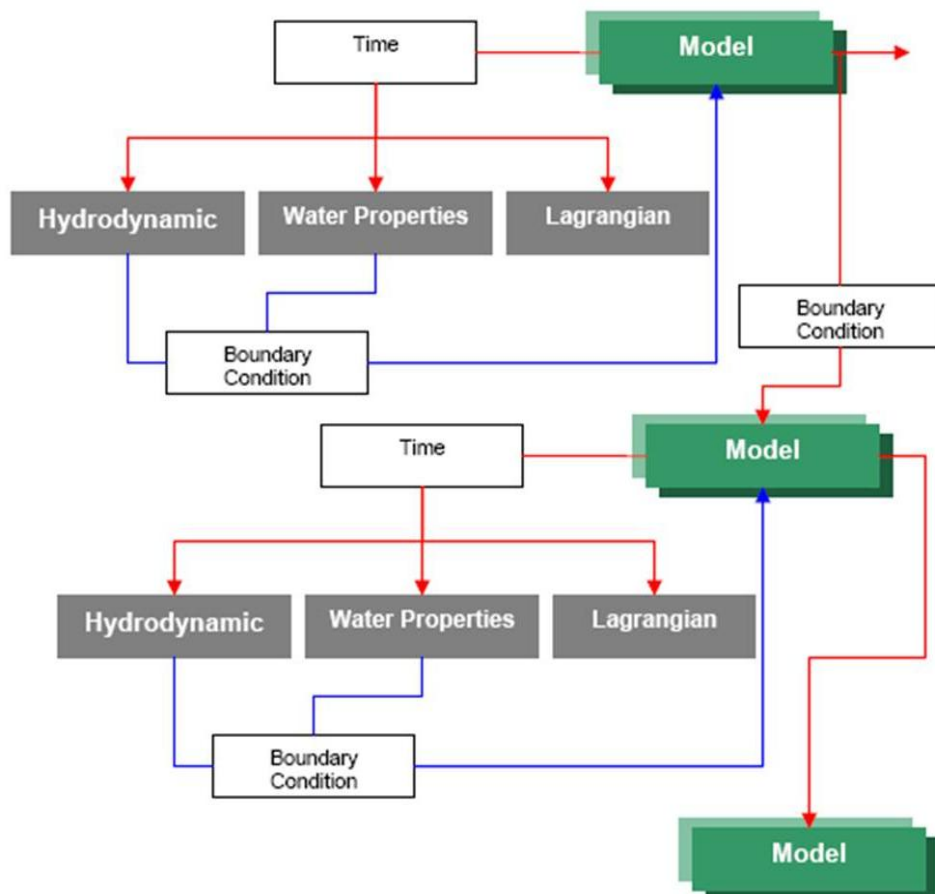


Figura A.2. Interacción del módulo de modelo con otros módulos.

El módulo Bathymetry (batimetría). Es un módulo más del sistema de modelado MOHID. Básicamente, su función es leer los datos batimétricos desde un archivo de entrada de tipo ASCII y publicarlos a todos los módulos cliente que así lo requieran.

Los datos batimétricos se almacenan en una malla regular, de tamaño X por Y, por cada punto especificado en la malla se debe indicar la profundidad. Las coordenadas horizontales se pueden dar de diversos tipos, siendo las más comunes las métricas y las geográficas. En la figura A.3 se muestra la interacción que tiene el módulo Bathymetry con otros módulos.

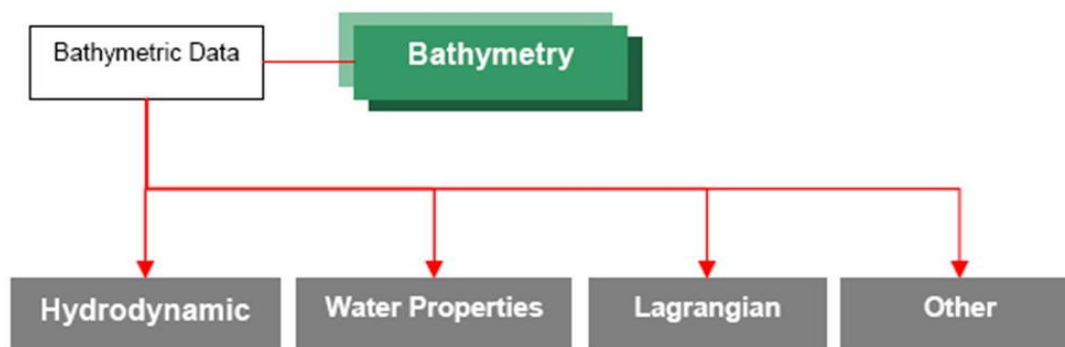


Figura A.3. Interacción del módulo de batimetría con otros módulos.

El módulo Hydrodynamic (hidrodinámico). Este módulo ha sido utilizado para simular los procesos hidrodinámicos en los océanos Atlántico NE y Atlántico SW, en varias zonas costeras a lo largo de Brasil y Portugal, a más de 30 estuarios y lagunas de Europa, África y Brasil y en las presas de agua al sur de Portugal.

El módulo hidrodinámico del sistema MOHID es capaz de simular el flujo de masas de agua donde la velocidad del flujo es inferior a la rapidez de la onda de presión. También calcula el nivel, la velocidad y el flujo de agua en cada paso de tiempo. Este módulo tiene por objeto ser una herramienta numérica orientada a ayudar a comprender los procesos biogeoquímicos y resolver los problemas ecológicos asociados con la actividad humana.

La discretización espacial es realizada por una aproximación de volúmenes finitos y la discretización temporal se realiza a través de un método semi-implícito, llamado Método

En la figura A.4 se muestra la interacción que tiene el módulo Hydrodynamic con otros módulos, así como el flujo de datos que existe entre éstos.

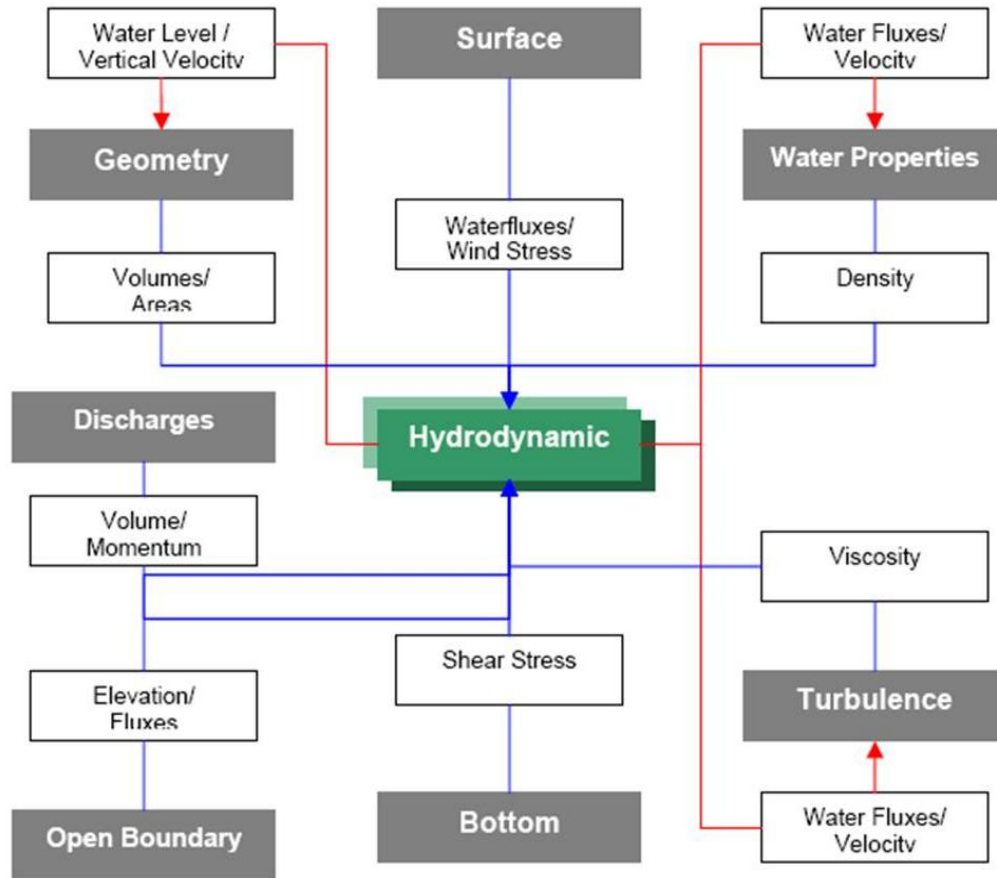


Figura A.4. Interacción del módulo hidrodinámico con otros módulos.

El algoritmo de Thomas consta de tres pasos: descomposición del problema, sustitución hacia adelante y sustitución hacia atrás.

1. **Descomposición.** Cambia las diagonales principales, eliminando una de éstas para que el problema quede de la forma diagonal superior (Código 1).

```

DO k=2, n
  ek= ek/ek-1
  fk=fk-ek*gk-1
END DO
  
```

Código 1. Fase de descomposición del algoritmo de Thomas.

2. **Sustitución hacia adelante.** Modifica el vector de resultados, b (Código 2).

```
DO k=2, n
    bk=bk-ek*bk-1
END DO
```

Código 2. Fase de Sustitución hacia adelante del algoritmo de Thomas.

3. **Sustitución hacia atrás.** Realiza la solución del problema (Código 3).

```
Xn=bn/fn
DO k=n-1, 1, -1
    xk=(bk-gk*xk+1)/fk
END DO
```

Código 3. Fase de Sustitución hacia atrás del algoritmo de Thomas.

El módulo WaterProperties (propiedades del agua). Coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua utilizando un modelo de transporte Euleriano. Para llevar a cabo dicha tarea, este módulo se apoya de otros módulos (Fig. A.5), como son:

- **AdvectionDifussion.** Cuyo trabajo principal es calcular el transporte de las propiedades.
- **WaterQuality.** Es uno de los módulos encargados de calcular los procesos biogeoquímicos.

Gracias a este módulo, MOHID es capaz de simular diferentes propiedades del agua como son: la temperatura, la salinidad, los sedimentos, el fitoplancton, los nutrientes, los contaminantes, entre otros.

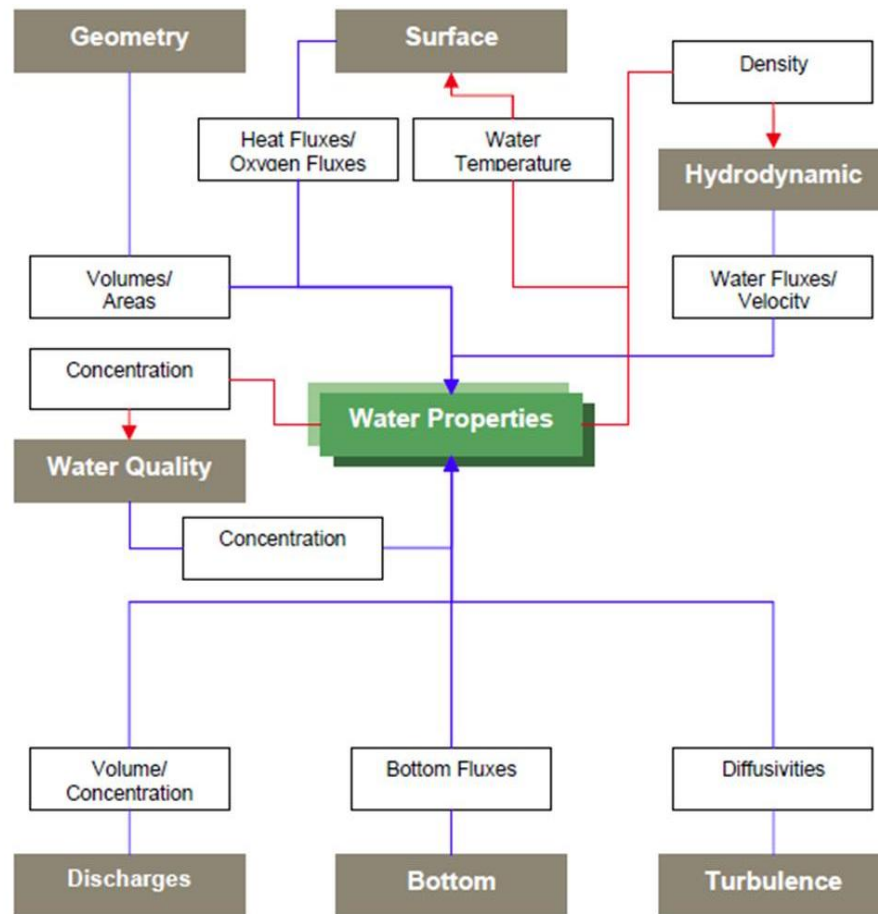


Figura A.5. Interacción del módulo propiedades del agua con otros módulos.

El módulo Lagrangian (también llamado de transporte Lagrangeano). Éste gestiona las mismas propiedades que el módulo WaterProperties. Puede ser utilizado por ejemplo para la simulación de dispersión del petróleo. En el caso de esta tesis fue usado para determinar la dispersión de los contaminantes, por lo que es el motor de desarrollo de las simulaciones.

Actualmente, este módulo es capaz de simular la dispersión del petróleo, la evolución de la calidad del agua y el transporte de sedimentos. Para simular la dispersión del petróleo, el módulo de transporte lagrangeano interactúa con el módulo Oil (Fig. A.6); para simular la evolución de la calidad del agua, con el módulo WaterQuality. El transporte de sedimentos se puede asociar directamente a los trazadores utilizando el concepto de solución de velocidad.

Otra característica importante de este módulo es la capacidad para calcular los tiempos de residencia. Esto puede ser muy útil al estudiar el intercambio de masas de agua en bahías o estuarios. El uso de este módulo se basa principalmente en:

- El concepto de trazador, cuya propiedad fundamental es la posición espacial (x,y,z) de las partículas simuladas (que también son llamadas por este módulo como trazadores), el volumen y una lista de propiedades; cada una con una determinada concentración. Cada trazador tiene asociada una posición espacial para llevar a cabo el movimiento de las partículas.
- El volumen y la concentración de las partículas simuladas, que pueden ser cualquiera de las establecidas en el módulo de calidad del agua (que como ya se mencionó en el inicio de la descripción de este módulo, serán las propiedades de las partículas contaminantes).

La velocidad media es el principal responsable del movimiento de las partículas, cuyas coordenadas espaciales están dadas por la ecuación 5, donde u representa la velocidad media y x la posición de las partículas en movimiento.

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(x_i, t) \quad (5)$$

La tasa de muerte o tiempo de desintegración de las bacterias Coliformes (*E. coli*) se calcula mediante la ecuación 6, donde C representa la concentración de las bacterias y T_{90} el intervalo de tiempo que tardan en morir el 90% de las bacterias Coliformes.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{\ln 10}{T_{90}} C \quad (6)$$

El módulo lagrangeano permite supervisar la distribución de las partículas dentro de los cuadros de control, que corresponden a cada una de las celdas de la malla. Esta característica es muy útil para calcular el tiempo de residencia del agua dentro de tales cuadros, el monitoreo de los cuadros de control se hace de la siguiente forma:

- En cada instante de tiempo el volumen de cada caja está denotado por la ecuación 7 y es almacenado en la variable `InstBoxVol`.

$$InstBoxVol(b) = \int (h + Z) dx dy \quad (7)$$

- En cada instante de tiempo se calcula el origen y el volumen del agua, dentro de cada cuadro de control, este dato se almacena en la variable *InstVolumeByOrigin* y se calcula mediante la ecuación 8.

$$InstVolumeByOrigin(b, o) = \sum_o Vol_j^b \quad (8)$$

- En caso de emisión instantánea en más de un cuadro de control, la integración de orígenes y volúmenes se hace mediante la ecuación 9 y se almacena en la variable *IntgVolumeByOrigin*.

$$IntgVolumeByOrigin(b, o) = \int InstVolumeByOrigin(b, o) dt \quad (9)$$

El tiempo de residencia del agua emitida para un origen **o** en un cuadro de control **b**, está dado por la ecuación 10 y el valor es almacenado en la variable *ResidenceTimePerBox*.

$$ResidenceTimePerBox(b, o) = \frac{IntgVolumeByOrigin(b, o)}{InitialVol(o)} \quad (10)$$

El tiempo de residencia total dentro de todo el sistema está dado por la sumatoria de todos los tiempos de residencia en cada cuadro de control. Se denota por la ecuación 11 y se almacena en la variable *ResidenceTime*.

$$ResidenceTime(o) = \sum_b ResidenceTimePerBox(b, o) \quad (11)$$

Estos valores también permiten calcular cómo cada cuadro de control monitoreado se ve influenciado por cada emisión en cada cuadro (Ec. 12). Tal valor se almacena en la variable *InfluenceOverBox*.

$$InfluenceOverBox(b, o) = \frac{IntgVolumeByOrigin(b, o)}{InitialVol(b)} \quad (12)$$

Para el caso de emisión continua, el tiempo de residencia se puede calcular por medio de la ecuación 13. Dicho valor es almacenado en la variable *ResidenceTimePerBox*.

$$ResidenceTimePerBox(b, o) = \frac{InstVolumeByOrigin(b, o)}{DischargeRate(o)} \quad (13)$$

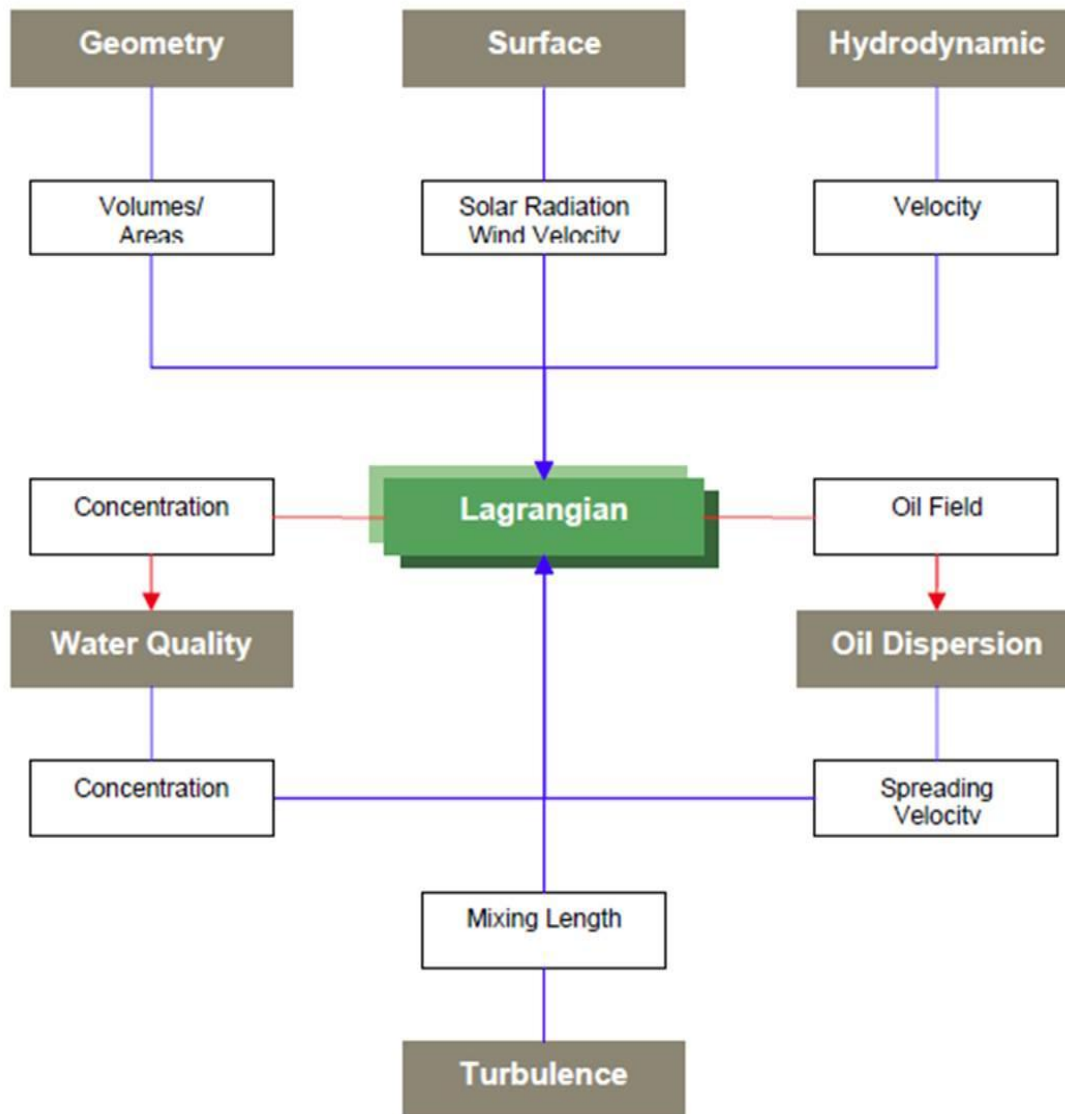


Figura A.6. Interacción del módulo Lagrangian con otros módulos.

La interfaz gráfica de usuario de MOHID

El crecimiento complejo de las herramientas numéricas del entorno de trabajo de MOHID originó la necesidad de crear una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que permitiera al usuario manejar más cómodamente el modelo. La GUI en MOHID está compuesta por dos programas principales: MOHID GUI y MOHID GIS, ambas desarrolladas en el entorno Microsoft .NET. La interfaz gráfica de usuario se encuentra disponible solamente en la

versión de MOHID para el sistema operativo Windows (probado en entornos Windows 2000 y XP por sus creadores, aunque el desarrollo de esta tesis se hizo en Windows Vista, en donde el modelo demostró su funcionamiento sin problemas).

Es importante destacar que desde el año 2004 se han estado desarrollando nuevas interfaces gráficas de usuario, siguiendo el mismo concepto que se utiliza en las herramientas numéricas de MOHID, bajo la tecnología .NET. Las interfaces gráficas de usuario han sido desarrolladas por los mismos autores, a fin de asegurar la constante sincronización con el modelo.

MOHID GUI. Es una aplicación basada en Windows, diseñada para manejar datos de entrada (pre-procesamiento) y de salida (post-procesamiento) requeridos por las herramientas numéricas de MOHID. Se ocupa de la estructura de directorios y archivos de datos necesarios para establecer un conjunto de simulaciones MOHID, y maneja archivos de datos de salida utilizados y generados por MOHID. También sirve como la aplicación principal que une a todo el software MOHID. Dentro de su programación utiliza extensiones ejecutables escritas en FORTRAN 95.

En la versión 4.9.2732.32264 de 2002, MOHID GUI se usa como interfaz para acceder a las herramientas MOHID Agua, MOHID Tierra y MOHID Suelo. La ventana principal del MOHID GUI está dividida en tres importantes áreas:

1. Una vista de árbol, que es donde se cargan todos los proyectos que se realizan y procesan en el modelo. En las figuras A.7 y A.8 se observa en el panel izquierdo.
2. Un panel de lista en donde se cargan todos los módulos y clases participantes en la simulación. En las figuras A.7 y A.8 se puede observar en el panel superior derecho.
3. Un campo disponible para agregar comentarios, datos, descripción, etc. referente a la simulación en cuestión. En las figuras A.7 y A.8 se puede observar en el panel inferior derecho.

MOHID GUI puede trabajar en dos modos diferentes: Pre-Procesamiento y Post-Procesamiento.

1. Pre-Procesamiento. En este modo se establecen los parámetros y propiedades para construir una simulación (Fig. A.7).

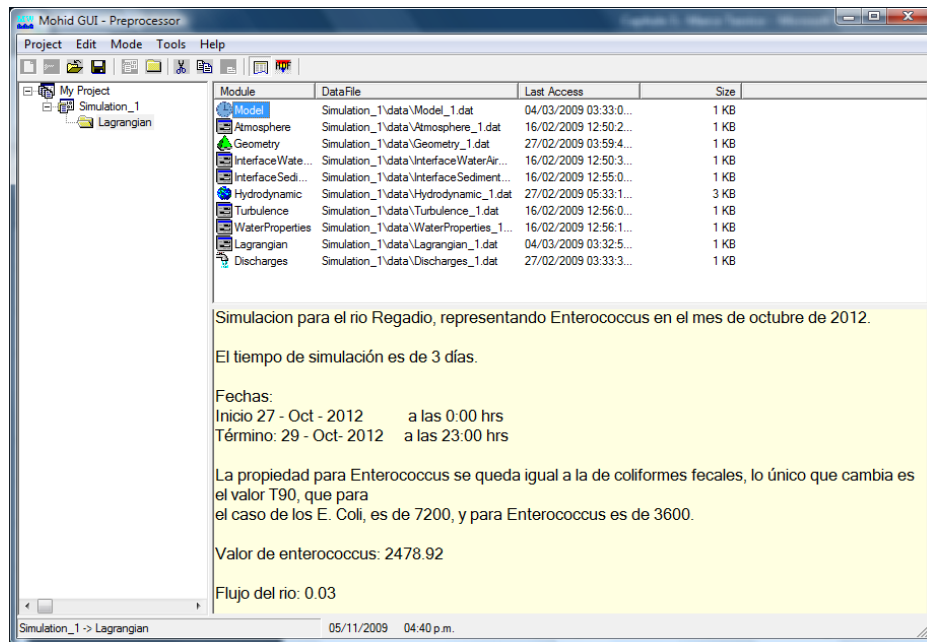


Figura A.7. MOHID GUI en modo de pre-procesamiento.

2. Post-Procesamiento: Es en este módulo se ejecutan y analizan los resultados arrojados por las simulaciones creadas (Fig. A.8).

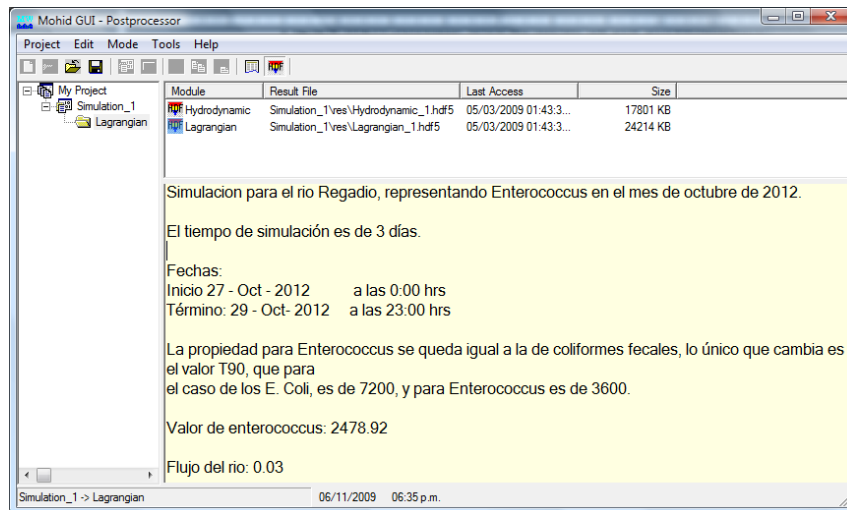


Figura A.8. MOHID GUI en modo de post-procesamiento.

MOHID GIS. Debido a que el manejo de datos es cada vez más importante y no puede resolverse sin el uso de un sistema de información geográfica (GIS), se desarrolló MOHID GIS (Fig. A.9), que permite fácilmente la entrada de datos en el modelo (cuadros de

definiciones, series de puntos, propiedades para inicializar campos, crear modelos digitales de terrenos, etc.). MOHID GIS es una herramienta de tipo sistema de información geográfica que maneja variables temporales y espaciales requeridas o producidas por las aplicaciones de MOHID. En su interior de igual forma que MOHID GUI usa extensiones ejecutables escritas en FORTRAN 95.

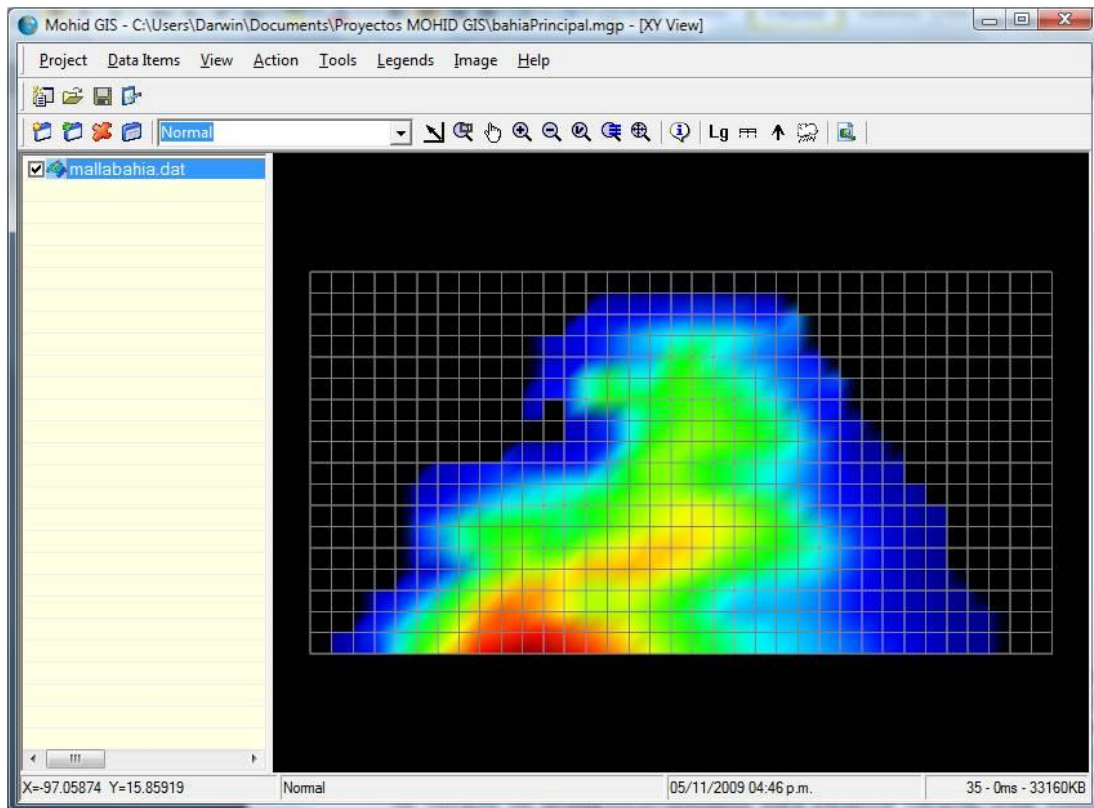


Figura A.9. MOHID GIS, modelo digital de la Bahía Principal en Puerto Escondido Oaxaca.

Tanto MOHID GUI como MOHID GIS incorporan otras herramientas auxiliares de post-procesamiento para el manejo de los datos de salida o entrada. A continuación se describen brevemente dichas herramientas.

- **Mohid PostProcessor.** Es una interfaz gráfica que despliega una pantalla, en esta se muestran los datos obtenidos de una simulación almacenados en archivos con formato HDF (Fig. A.10).

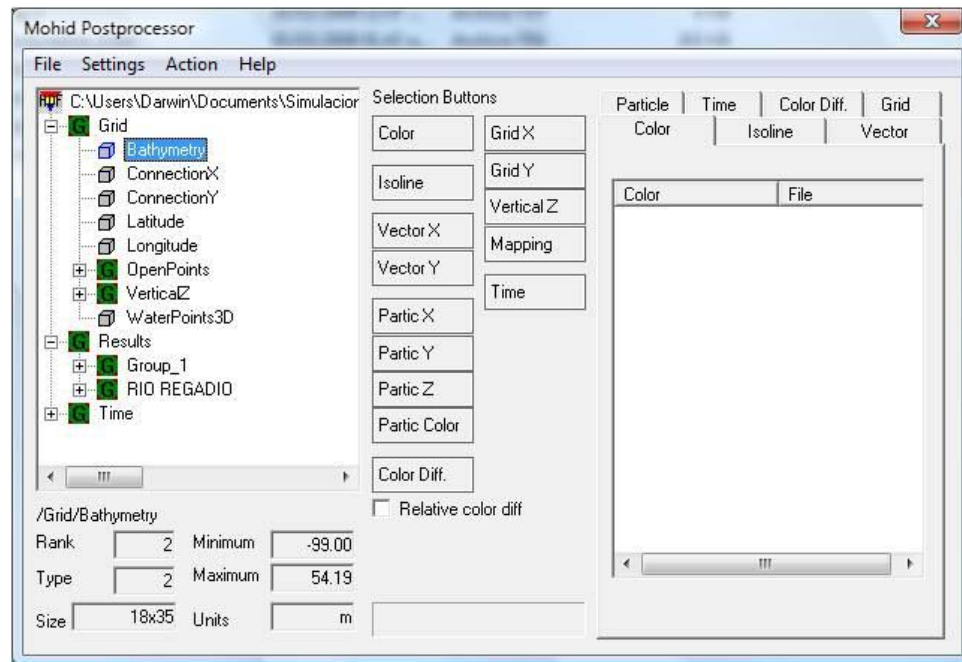


Figura A.10. Configuración de resultados con MOHID PostProcessor.

- **ConvertToHDF5.** Esta herramienta permite la aplicación de diferentes operaciones, mismas que involucran archivos en formato HDF5. Estas acciones pueden ser la conversión de datos a formato HDF5, interpolación de mallas del área de estudio y concatenación de varios archivos del mismo formato.
- **Digital Terrain Creator.** Este programa se usa básicamente para la creación de una malla de datos y para generar el archivo de entrada de batimetría del modelo.
- **Basin Delineator.** Realiza la delimitación de cuencas hidrológicas para utilizar MOHID Land.
- **River NetWork.** Es un programa numérico que permite simular un sistema de ríos.
- **Conver to XYZ.** Es una herramienta numérica que obtiene datos tridimensionales y los transforma en coordenadas XYZ. Es de gran utilidad para extraer datos y crear batimetrías.
- **PorusMedia.** Se encarga del cálculo de la infiltración y el movimiento de aguas saturadas y no saturadas.

- **PorusMediaProperties.** Es un módulo que actualmente se encuentra en desarrollo, básicamente se encarga de calcular el transporte de las propiedades del suelo.
- **Vegetation.** Maneja la información sobre la cubierta vegetal y la interacción con la atmósfera y las propiedades del suelo. La dinámica de la vegetación puede ser manejada por el modelo de dos maneras diferentes:
 - Las propiedades de la profundidad de la raíz es proporcionada por el usuario y la absorción del agua es simulada por el modelo. Los datos que el usuario proporcione, pueden ser establecidos en un archivo, que puede ser una serie de tiempo, archivos en formato HDF o incluso desde una malla.
 - Utilizando un modelo de crecimiento de la vegetación SWAT y la biomasa de la planta. El contenido y la absorción de los nutrientes son explícitamente simulados.
- **Basin.** Maneja la información entre los módulos de interfaz y obliga al cálculo de los flujos entre la atmósfera y el suelo.

ANEXO B. SIMULACIONES *E. coli* AGOSTO 2012 BAHÍA PRINCIPAL

A continuación, se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario agosto 2012 en la zona de estudio: Bahía Principal, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *E. coli*. Para este escenario se capturaron 6 imágenes; tres de ellas representan cada día de la simulación y las tres restantes representan el historial de seguimiento de las bacterias en cada uno de los días de la simulación.

En las figuras B.1 y B.2 se muestran los días dos y tres de la simulación de este escenario respectivamente. El día uno se presenta en la figura 4.16.

En las figuras B.3, B.4 y B.5 se muestran los seguimientos de historial de la bacteria *E. coli* para los días uno, dos y tres respectivamente. Nótese que en la figura B.6 el recorrido de la dispersión de estas bacterias, llega por casi toda la Bahía Principal.

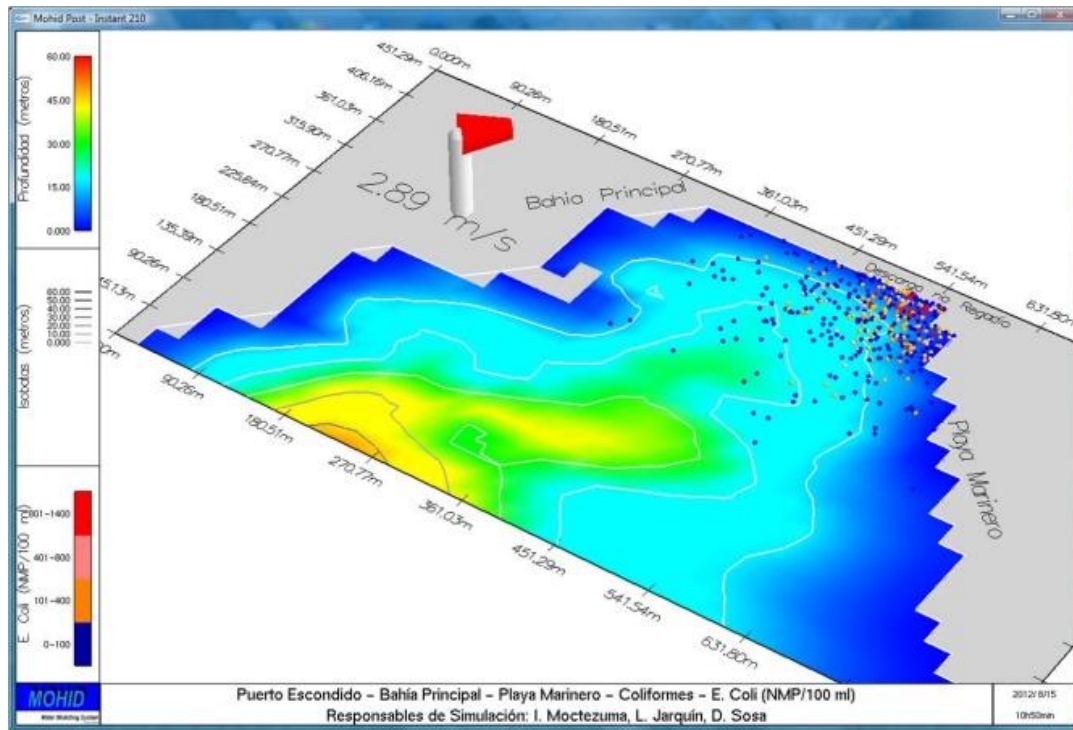


Figura B.1. Día dos, escenario agosto 2012 *E. coli* en la Bahía Principal.

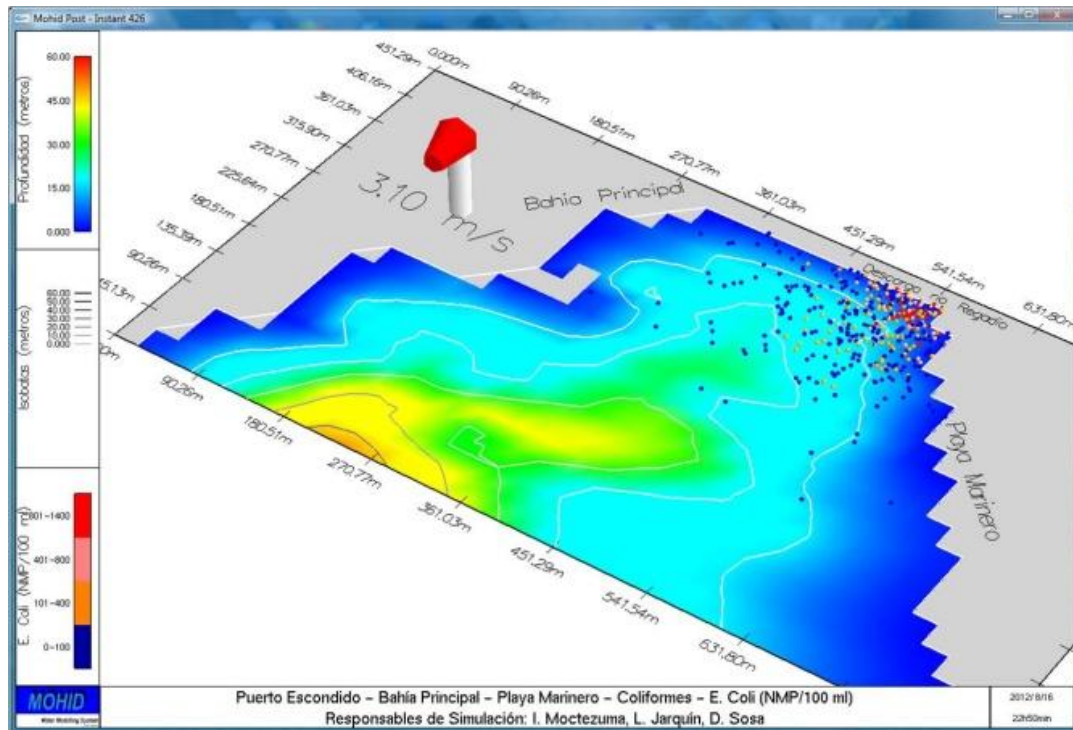


Figura B.2. Día tres, escenario agosto 2012 *E. coli* en la Bahía Principal.

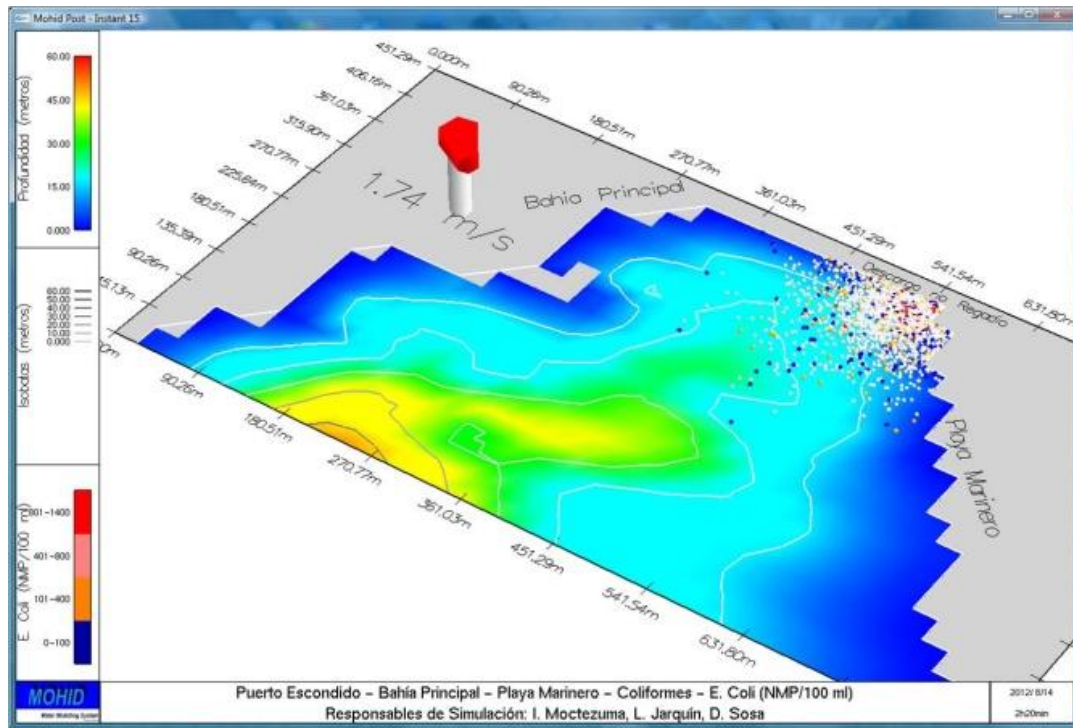


Figura B.3. Día uno, historial de seguimiento de *E. coli* en la Bahía Principal, escenario agosto 2012.

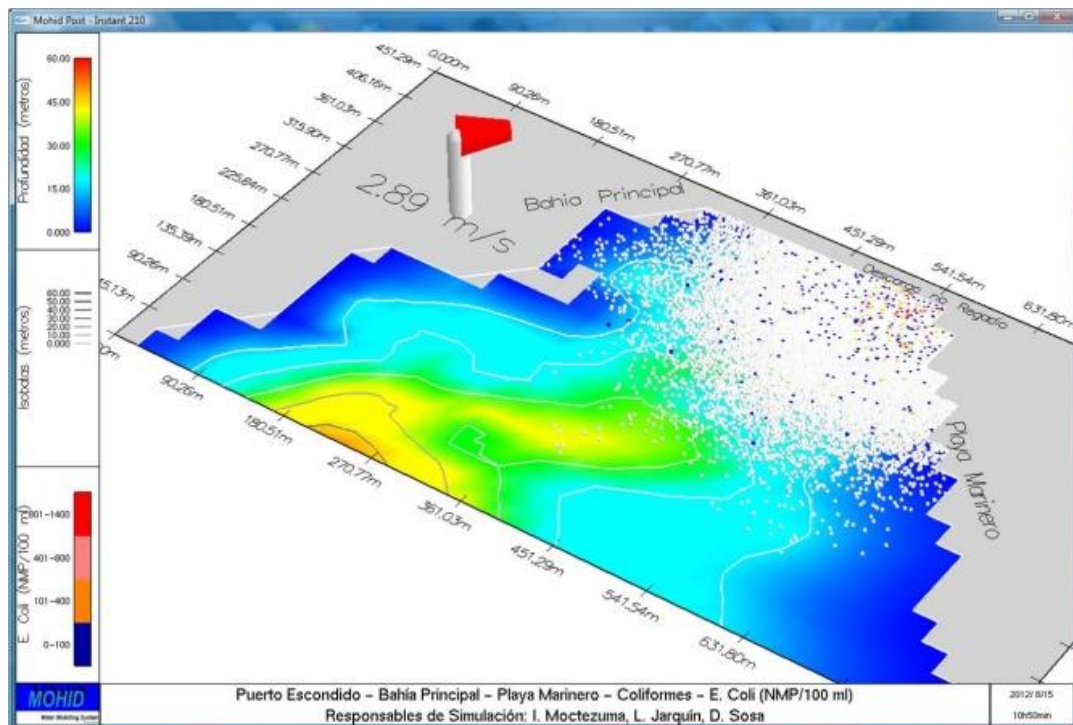


Figura B.4. Día dos, historial de seguimiento de *E. coli* en la Bahía Principal, escenario agosto 2012.

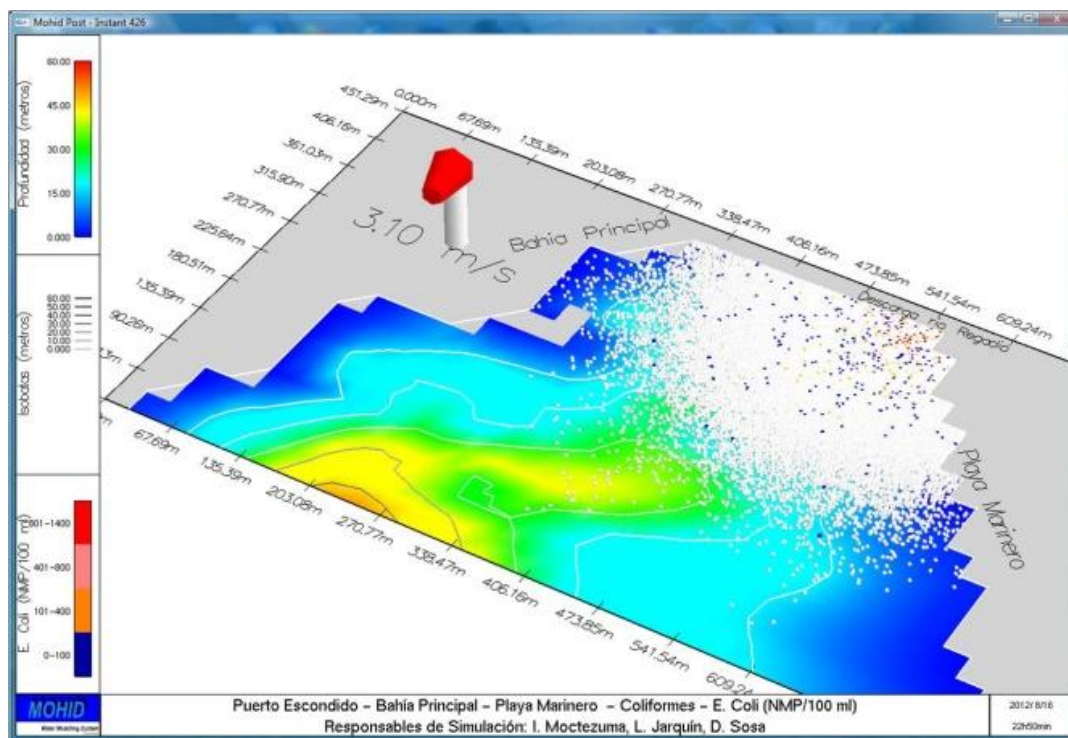


Figura B.5. Día tres, historial de seguimiento de *E. coli* en la Bahía Principal, escenario agosto 2012.

ANEXO C. SIMULACIONES *Enterococcus faecalis* AGOSTO 2012 BAHÍA PRINCIPAL

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario agosto 2012 en la zona de estudio: Bahía Principal, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*.

En las figuras C.1 y C.2 se observan los días dos y tres respectivamente para la simulación de este escenario. El día uno se puede observar en la figura 4.17.

Las figuras C.3, C.4 y C.5 muestran los seguimientos de historial para las bacteria *Enterococcus faecalis* modeladas, en los días uno, dos y tres respectivamente.

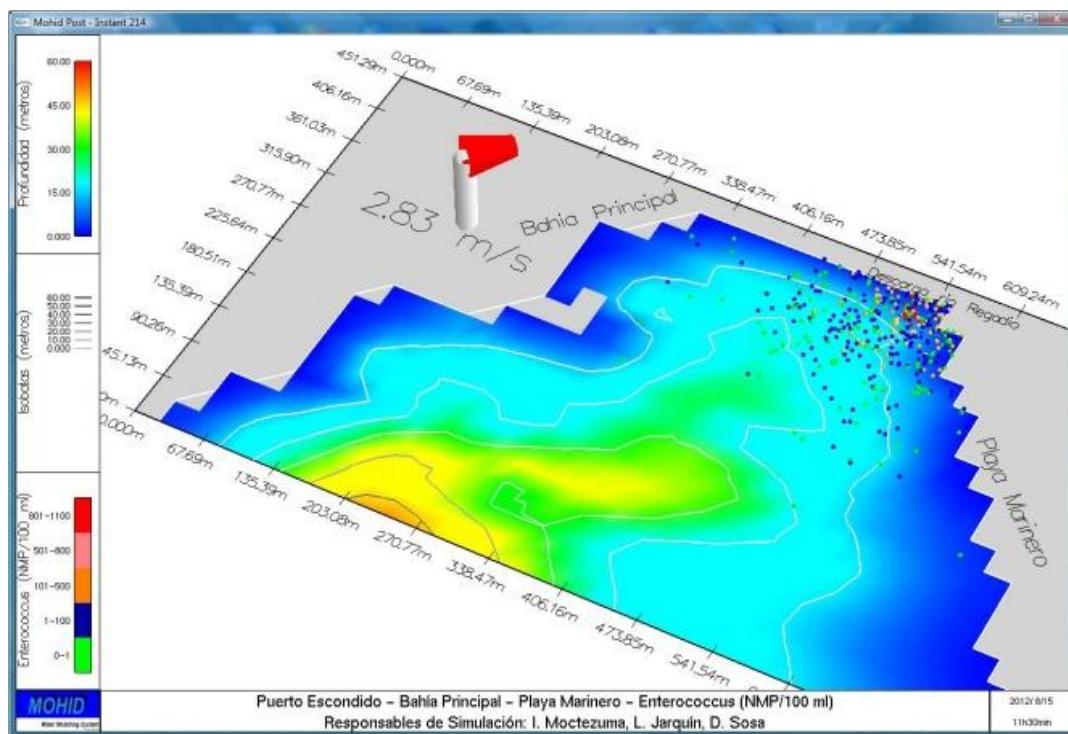


Figura C.1. Día dos, escenario agosto 2012 *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal.

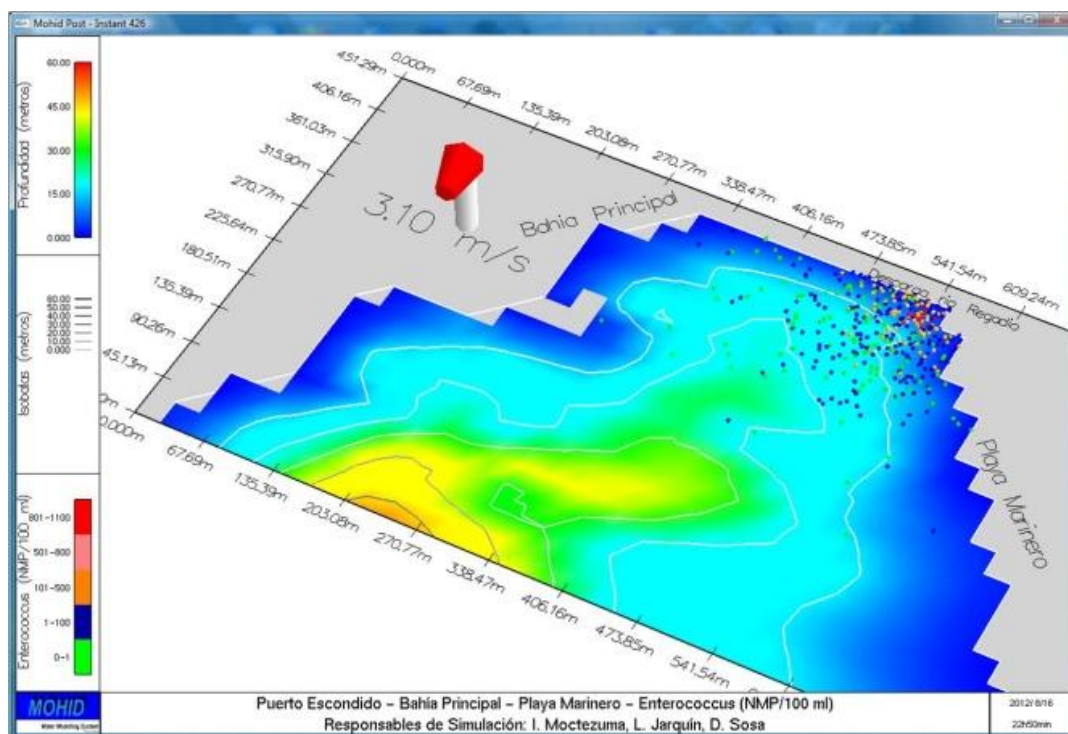


Figura C.2. Día tres, escenario agosto 2012 *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal.

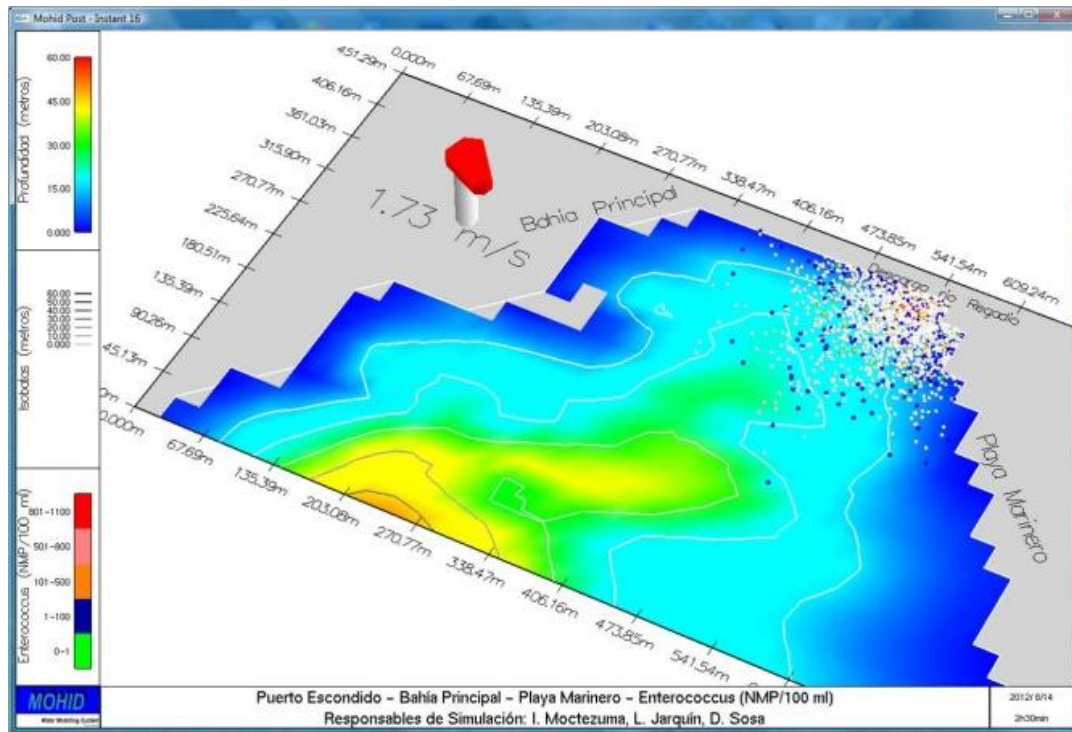


Figura C.3. Día uno, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal, agosto 2012.

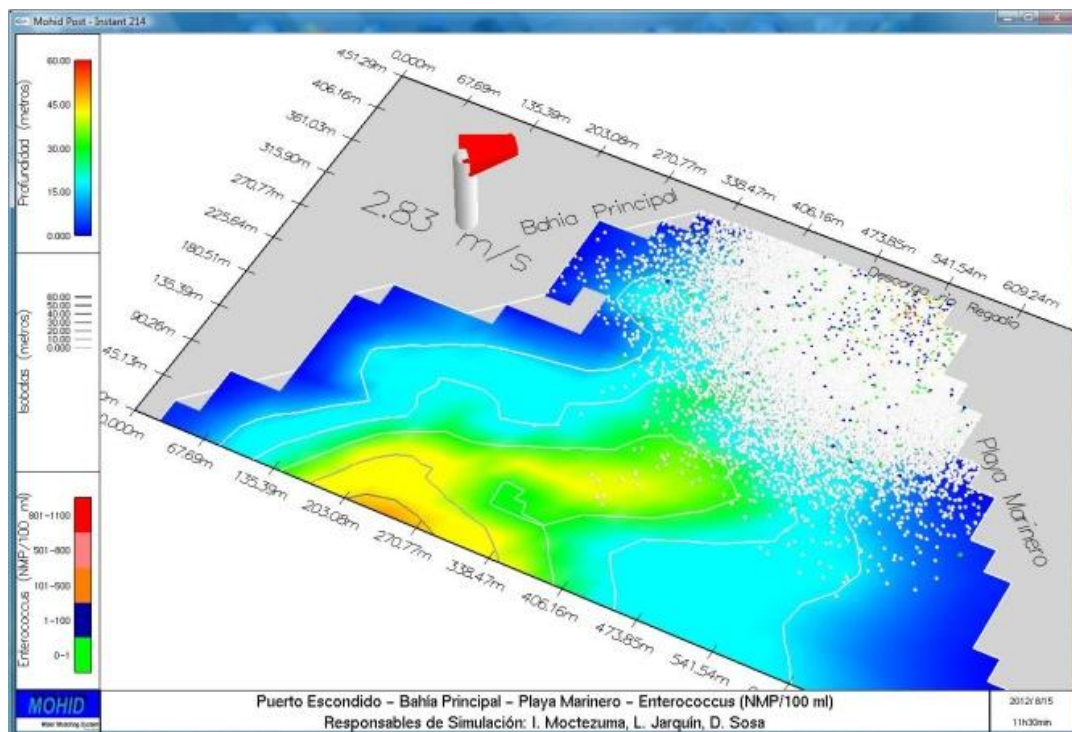


Figura C.4. Día dos, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal, agosto 2012.

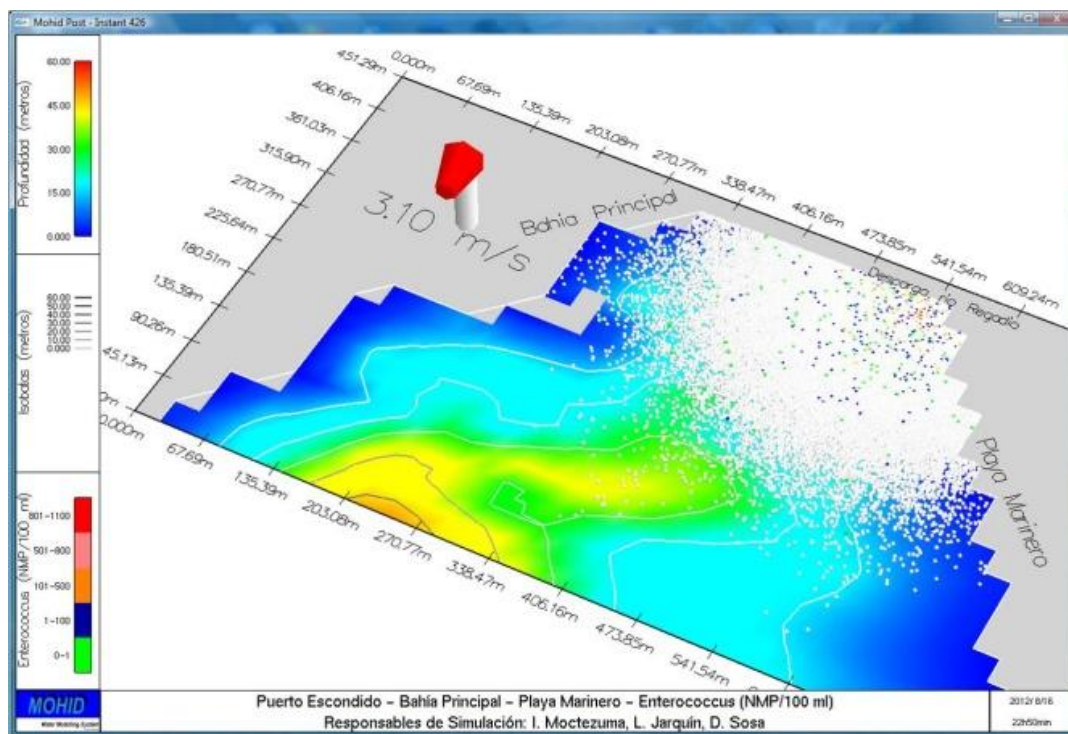


Figura C.5. Día tres, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal, agosto 2012.

ANEXO D. SIMULACIONES *E. coli* OCTUBRE 2012 BAHÍA PRINCIPAL

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario octubre 2012 en la zona de estudio: Bahía Principal, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *E. coli*.

En las figuras D.1 y D.2 se presentan los resultados obtenidos de la simulación hecha para los días dos y tres respectivamente, del escenario octubre 2012. El día uno de la simulación referente a este escenario se puede observar en la figura 4.18.

Las figuras D.3, D.4 y D.5 muestran el seguimiento de historial para cada bacteria *E. coli* modelada, en los días uno, dos y tres de la simulación para este escenario.

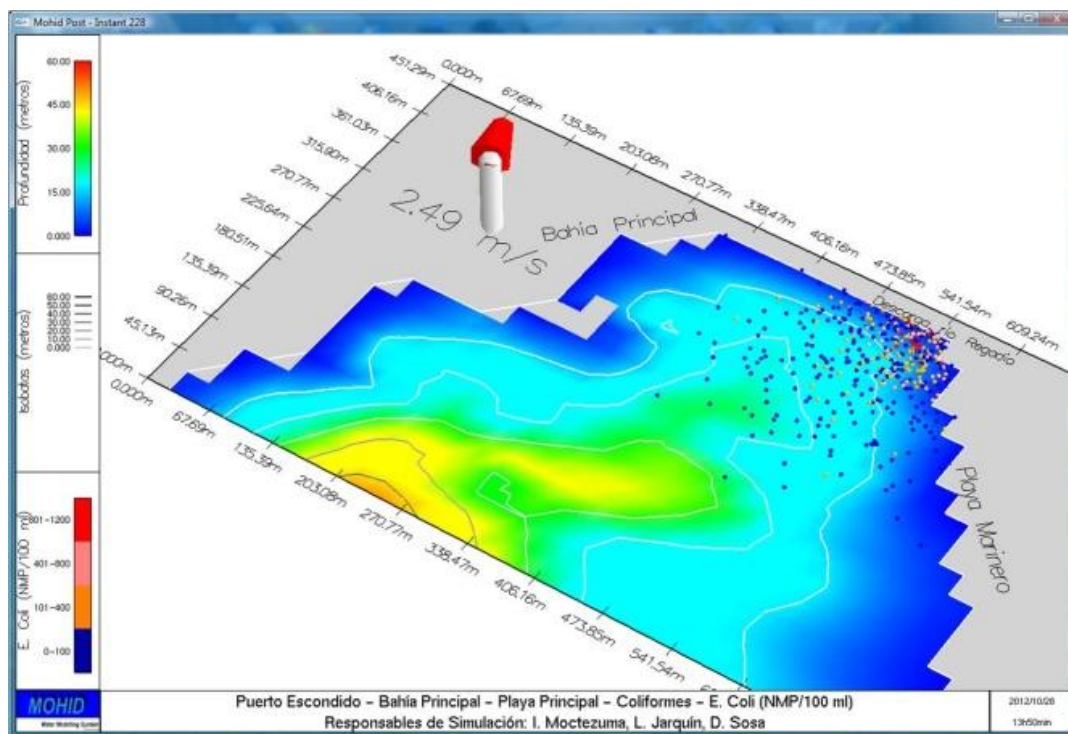


Figura D.1. Día dos, escenario octubre 2012 *E. coli* en la Bahía Principal.

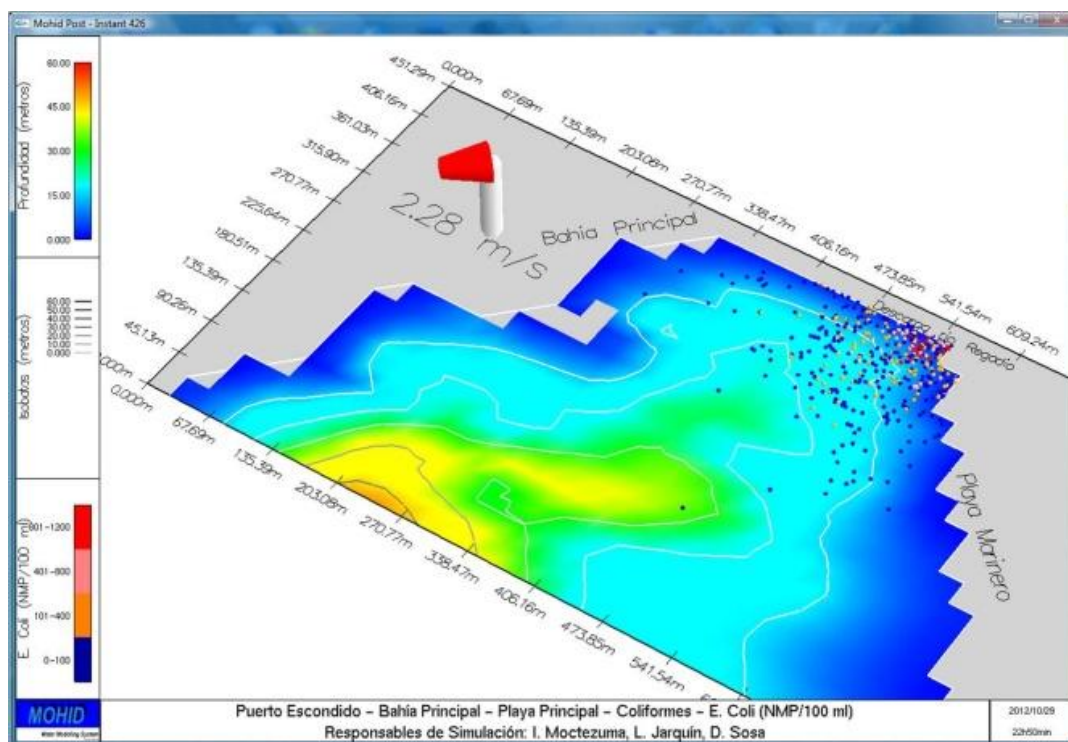


Figura D.2. Día tres, escenario octubre 2012 *E. coli* en la Bahía Principal.

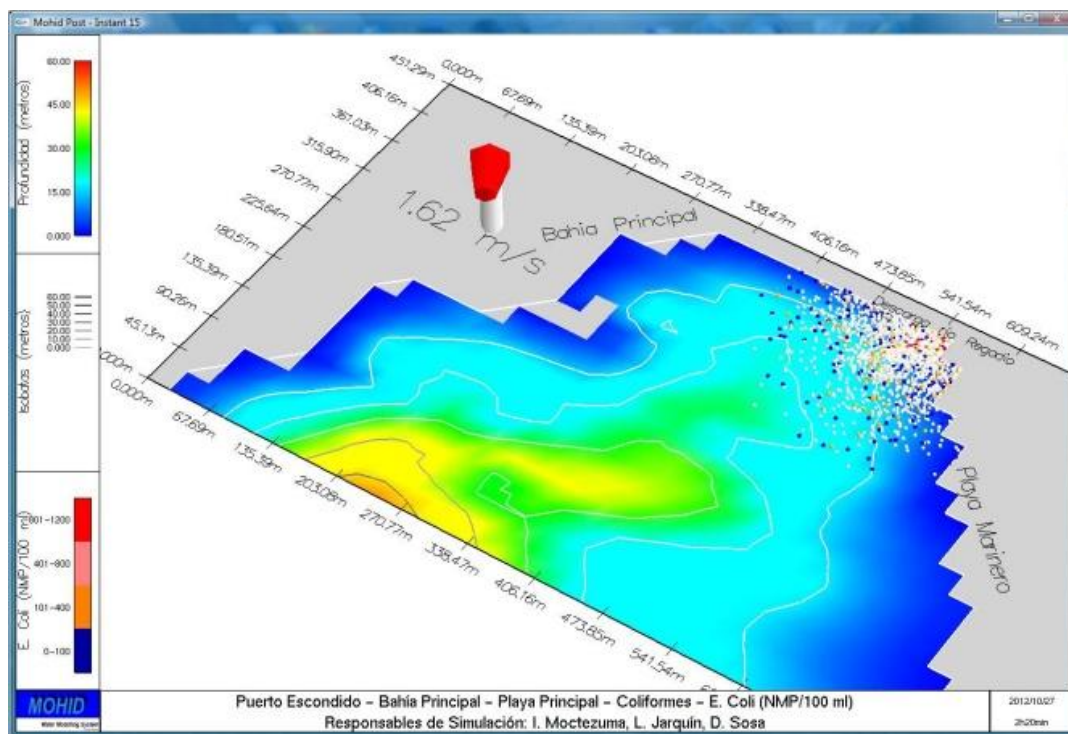


Figura D.3. Día uno, historial de seguimiento de *E. coli* en la Bahía Principal, octubre 2012.

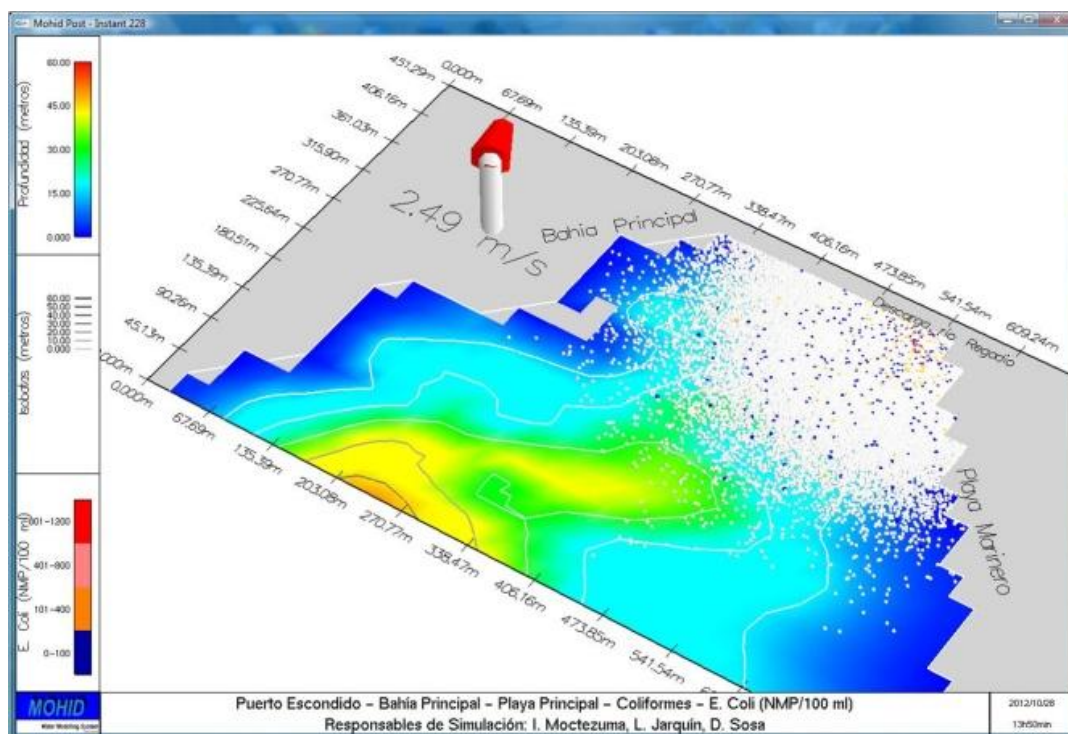


Figura D.4. Día dos, historial de seguimiento de *E. coli* en la Bahía Principal, octubre 2012.

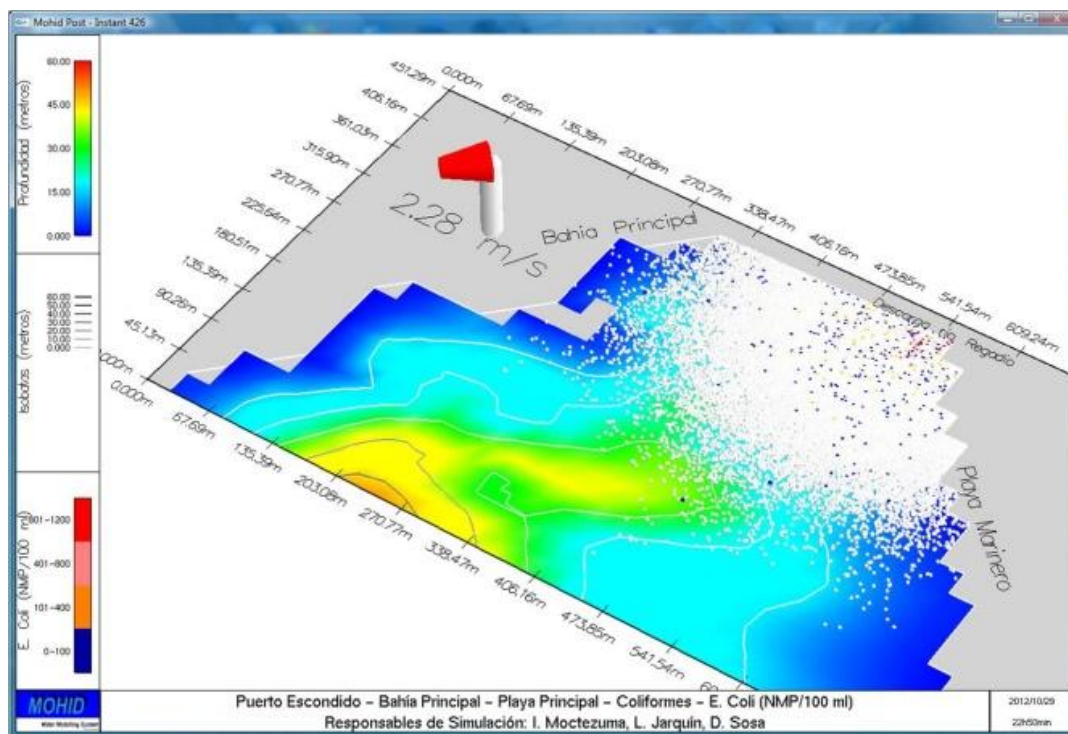


Figura D.5. Día tres, historial de seguimiento de *E. coli* en la Bahía Principal, octubre 2012.

ANEXO E. SIMULACIONES *Enterococcus faecalis* OCTUBRE 2012 BAHÍA PRINCIPAL

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario octubre 2012 en la zona de estudio: Bahía Principal, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*.

En las figuras E.1y E.2 se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación realizada para los días dos y tres de este escenario. La figura correspondiente al día uno de la simulación se puede observar en la figura 4.19.

Las figuras E.3, E.4 y E.5 muestran el seguimiento de historial de la trayectoria recorrida por cada bacteria *Enterococcus faecalis* modelada en los días uno, dos y tres, respectivamente.

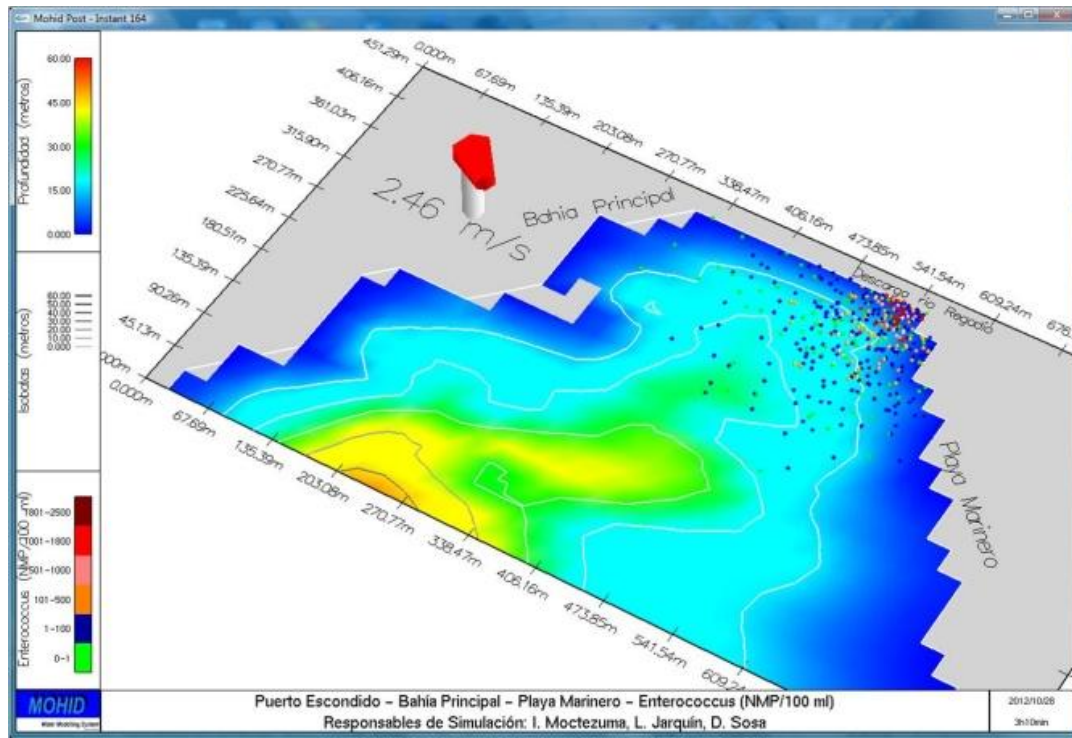


Figura E.1. Día dos, escenario octubre 2012 *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal.

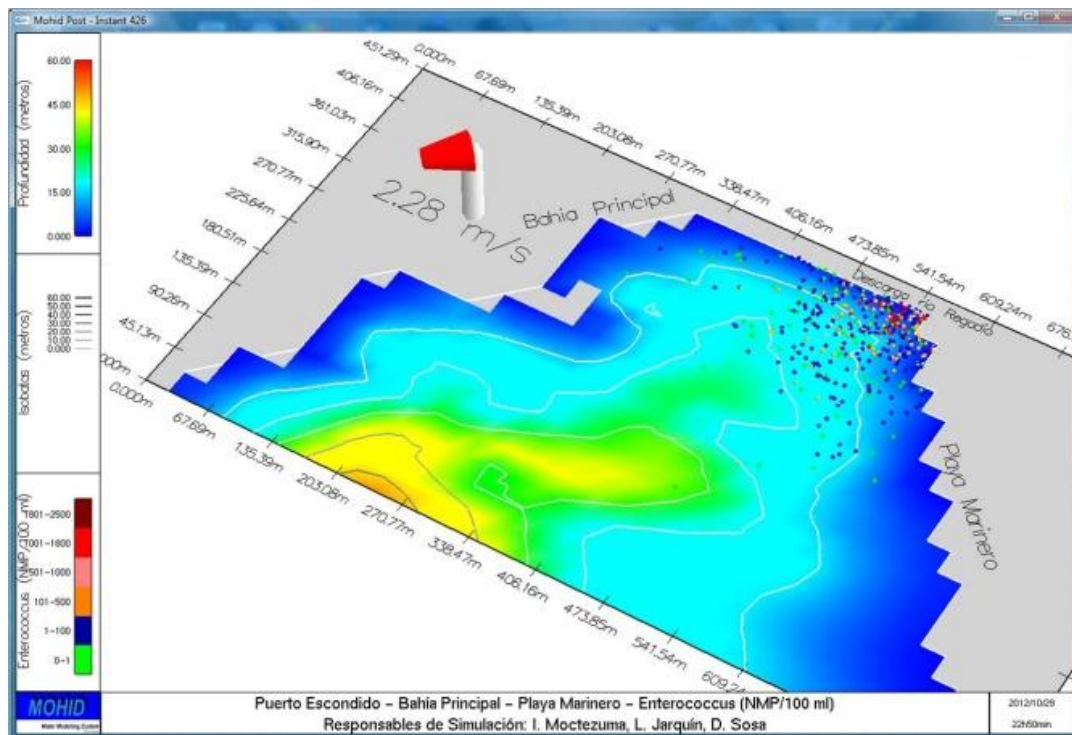


Figura E.2. Día tres, escenario octubre 2012 *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal.

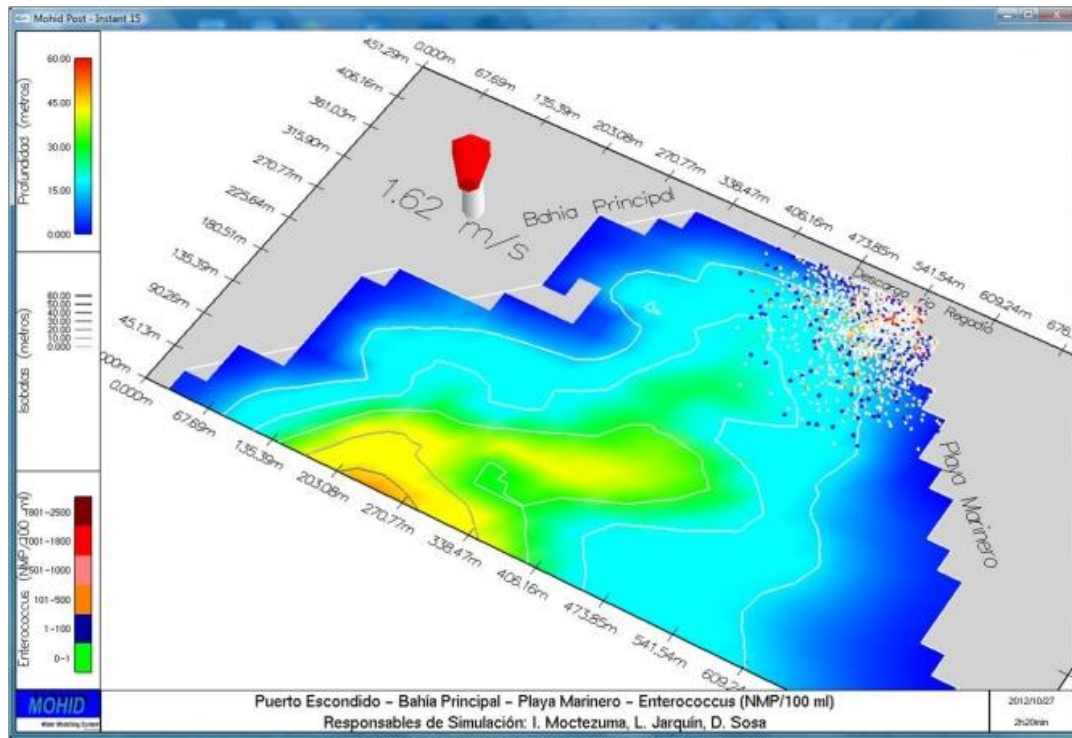


Figura E.3. Día uno, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal, octubre 2012.

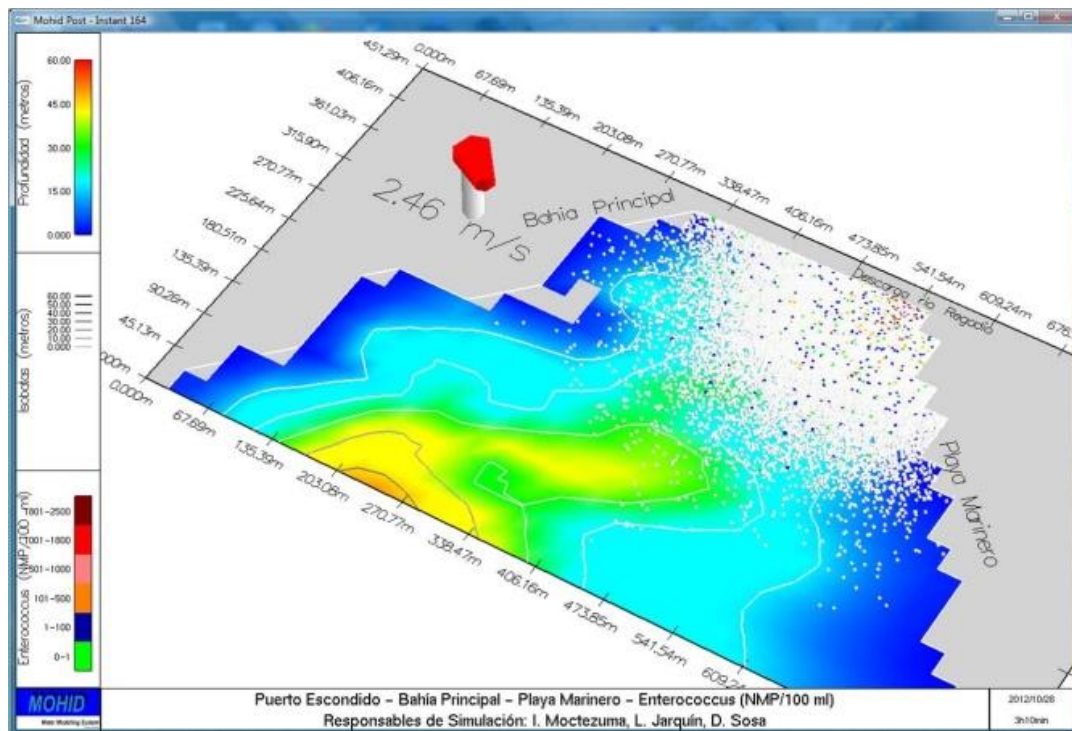


Figura E.4. Día dos, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal, octubre 2012.

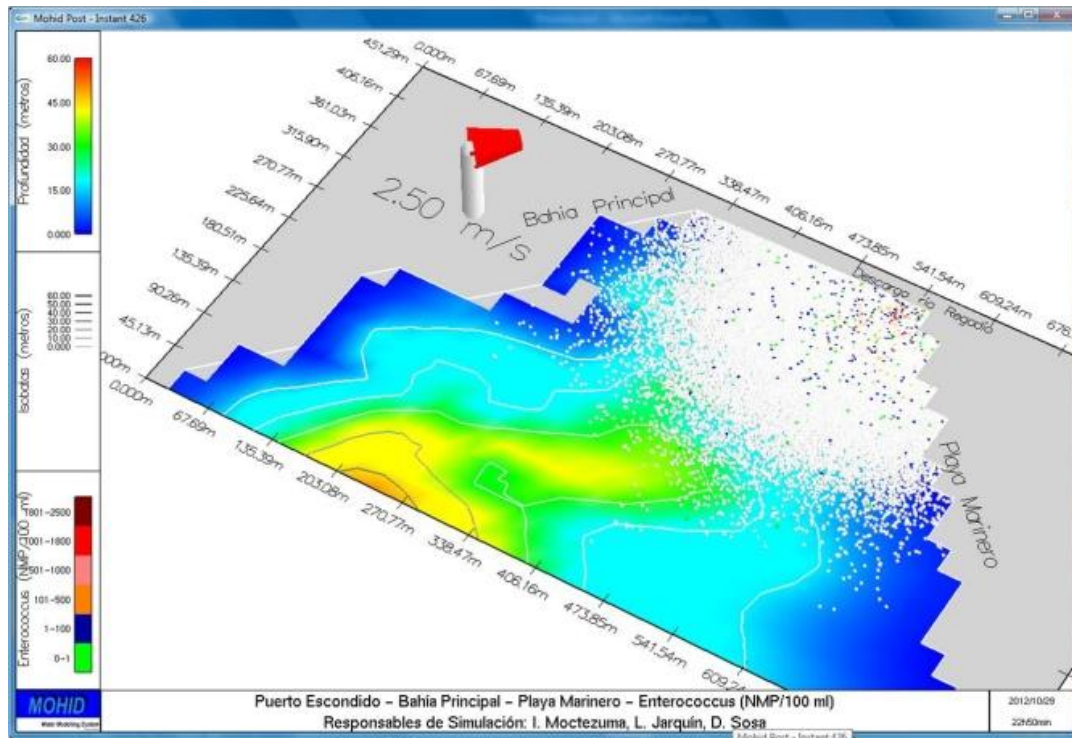


Figura E.5. Día tres, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Bahía Principal, octubre 2012.

ANEXO F. SIMULACIONES *E. coli* ABRIL 2012 PLAYA COLOTEPEC

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario abril 2012 en la zona de estudio: Playa Colotepec, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *E. coli*.

En las figuras F.1 y F.2 se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación realizada en los días dos y tres de este escenario. El día uno de este escenario se puede observar en la figura 4.20.

Las figuras F.3, F.4 y F.5 muestran el seguimiento de historial de cada bacteria *E. coli* modelada, en los días uno, dos y tres de la simulación, respectivamente.

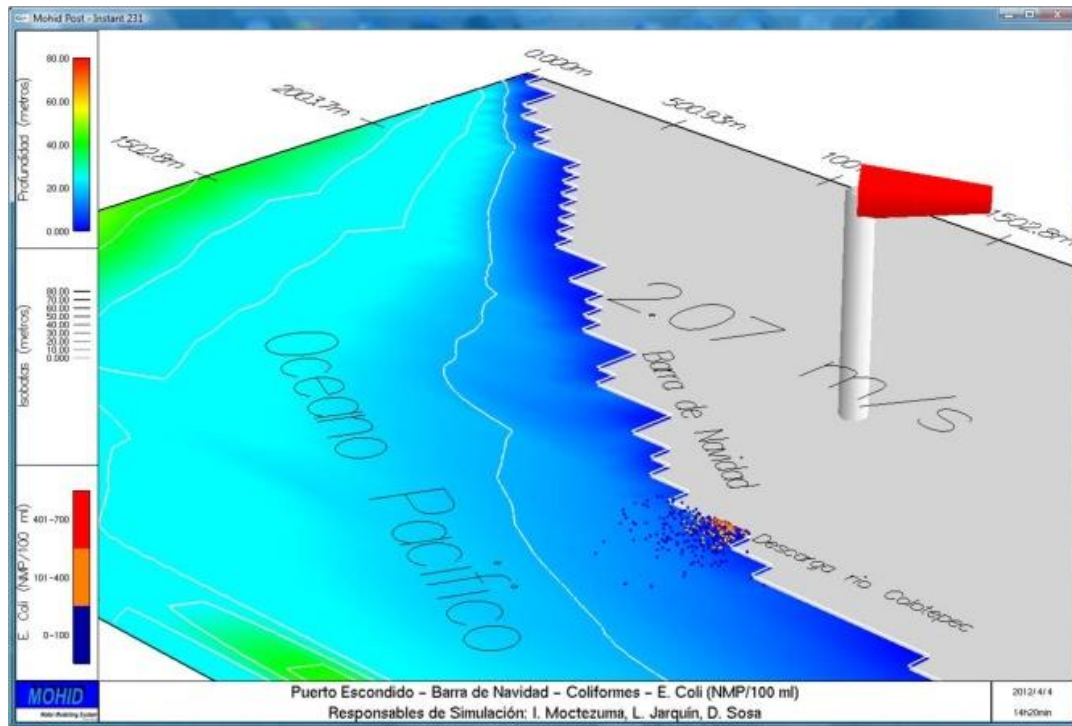


Figura F.1. Día dos, escenario abril 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

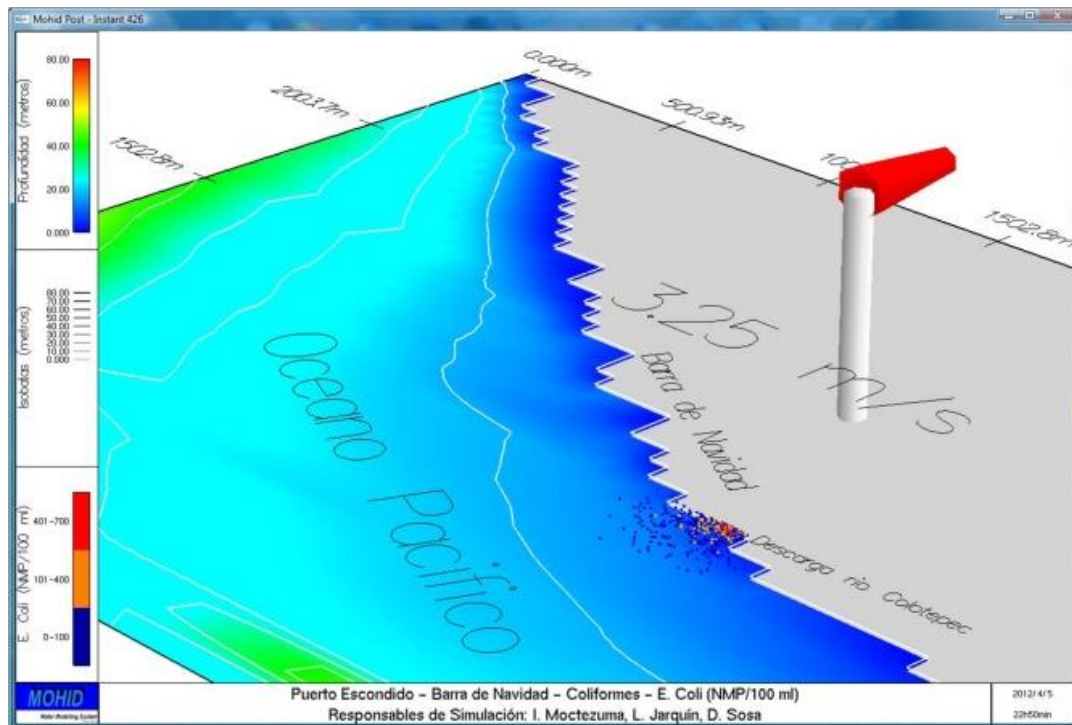


Figura F.2. Día tres, escenario abril 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

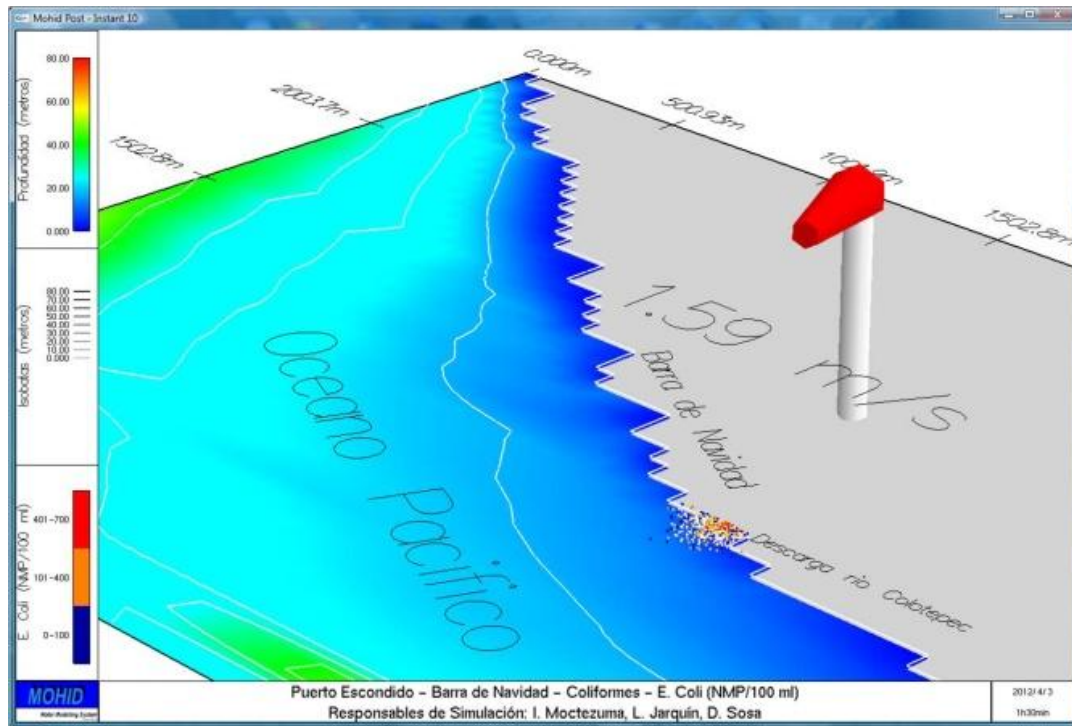


Figura F.3. Día uno, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, abril 2012.

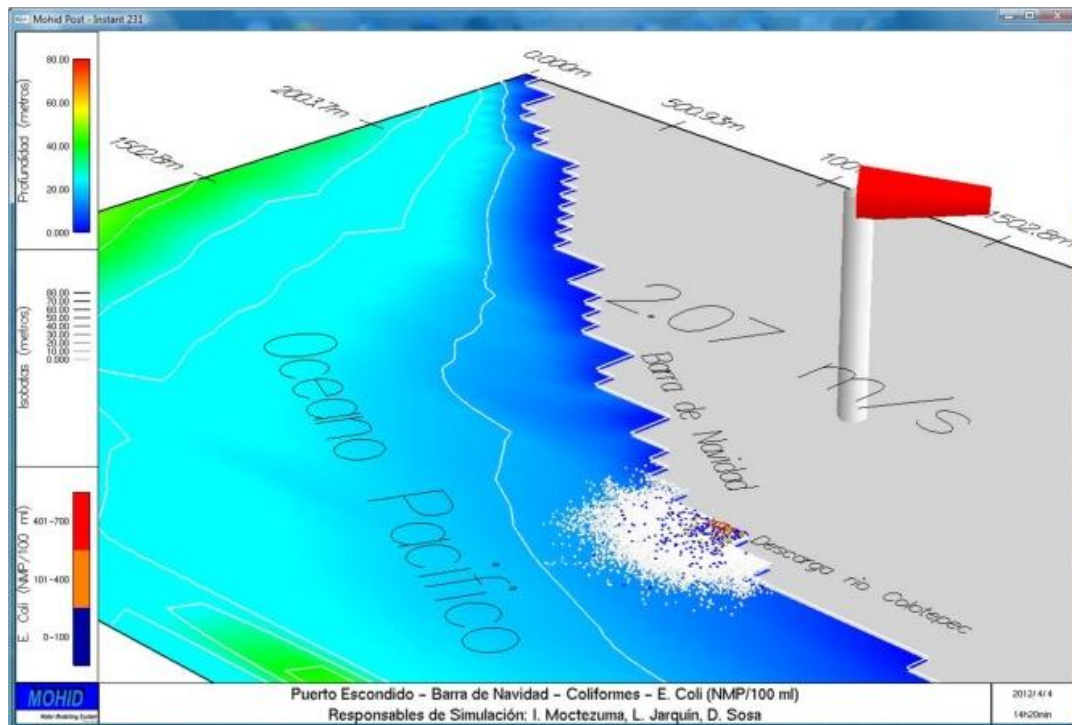


Figura F.4. Día dos, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, abril 2012.

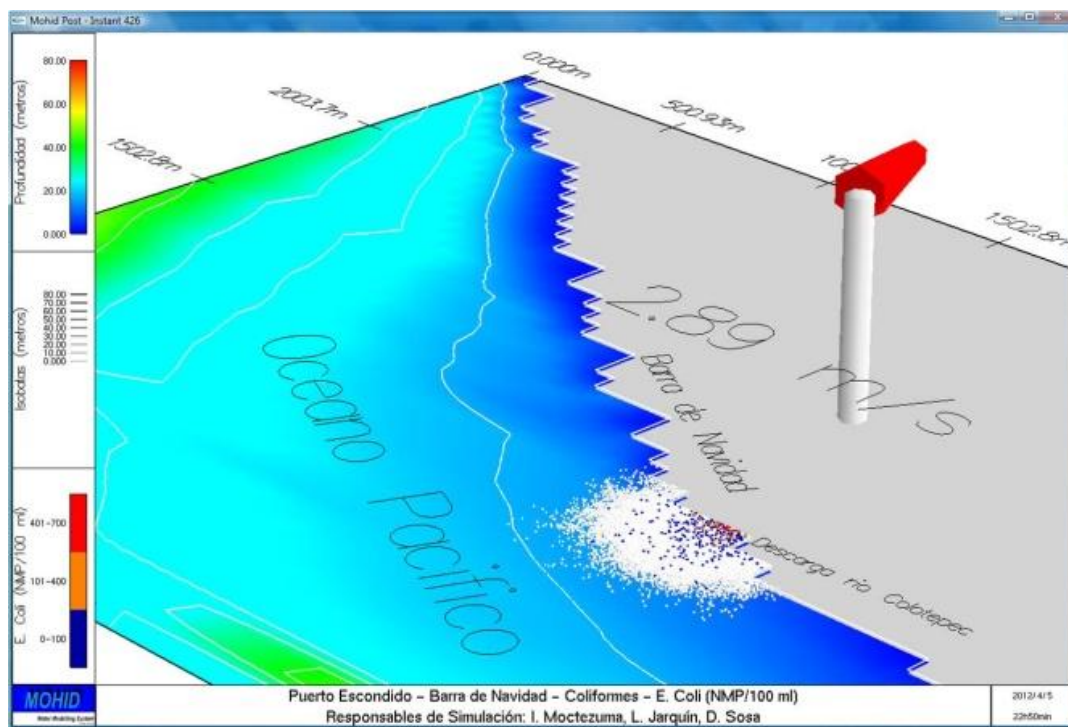


Figura F.5. Día tres, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, abril 2012.

ANEXO G. SIMULACIONES *Enterococcus faecalis* ABRIL 2012 PLAYA COLOTEPEC

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario abril 2012 en la zona de estudio: Playa Colotepec, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*.

Las figuras G.1 y G.2 muestran los resultados obtenidos en los días dos y tres de la simulación para el escenario abril 2012. El día uno de la simulación se puede apreciar en la figura 4.21.

En las figuras G.3, G.4 y G.5 se presentan los seguimientos de historial para cada bacteria *Enterococcus faecalis* modeladas, en los días uno, dos y tres respectivamente. Nótese que aunque la concentración de bacterias modeladas está dentro de los límites permisibles y en gran medida proviene de la fauna que habita la zona, la dispersión es uniforme generalmente en la desembocadura del río Colotepec.

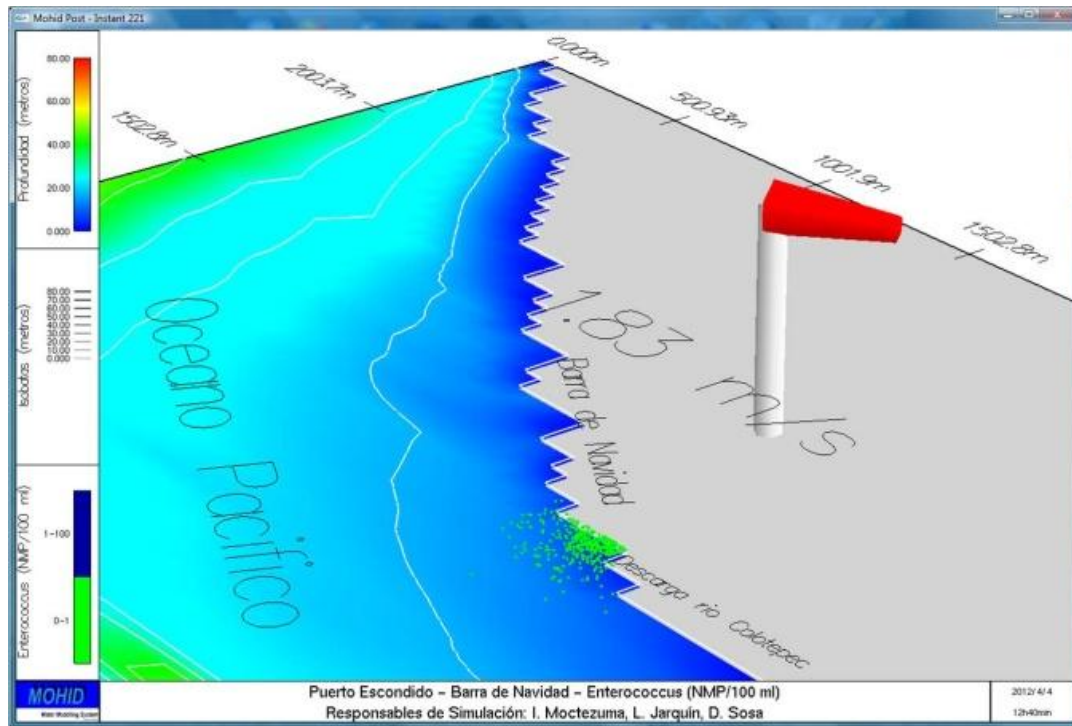


Figura G.1. Día dos, escenario abril de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

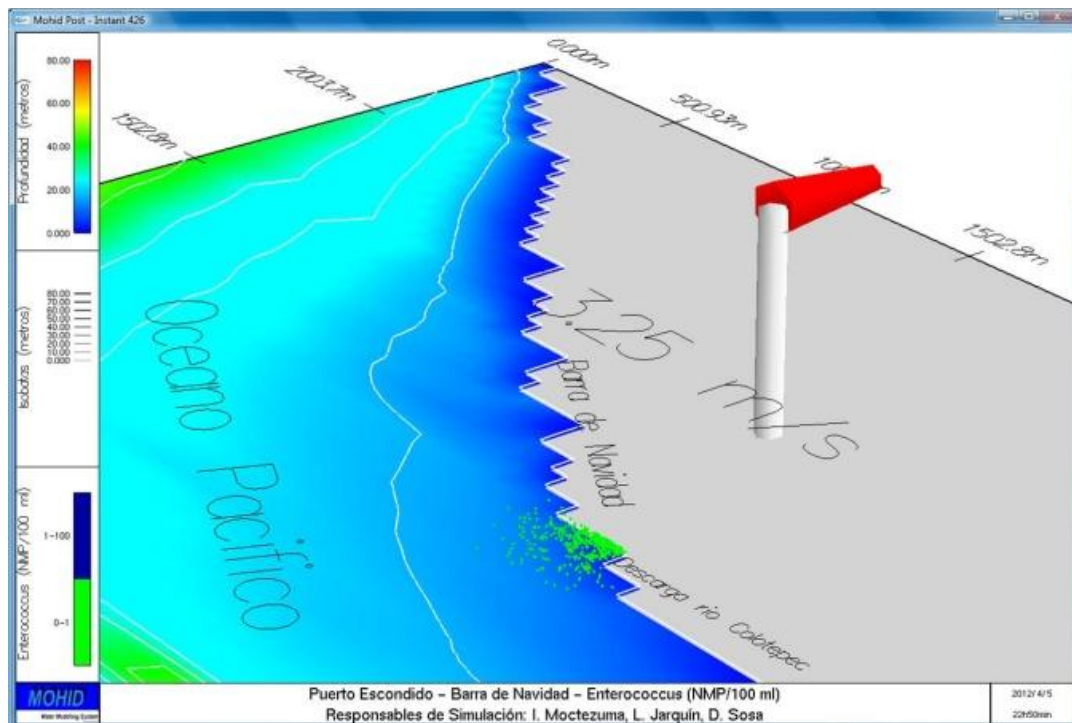


Figura G.2. Día tres, escenario abril de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

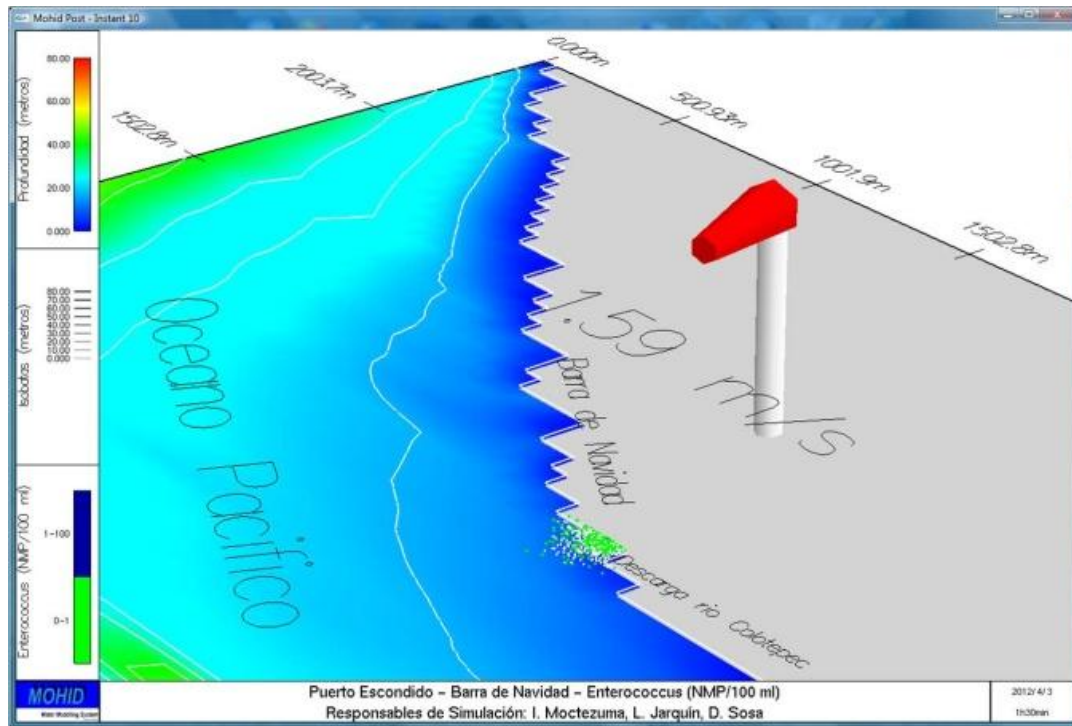


Figura G.3. Día uno, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, abril 2012.

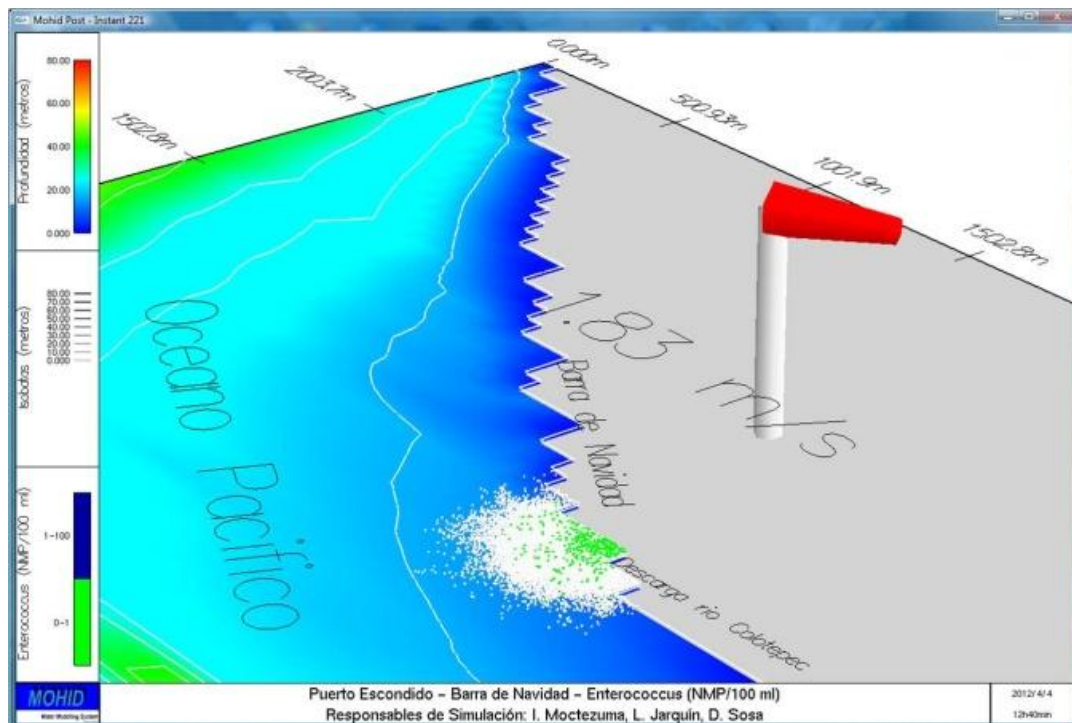


Figura G.4. Día dos, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, abril 2012.

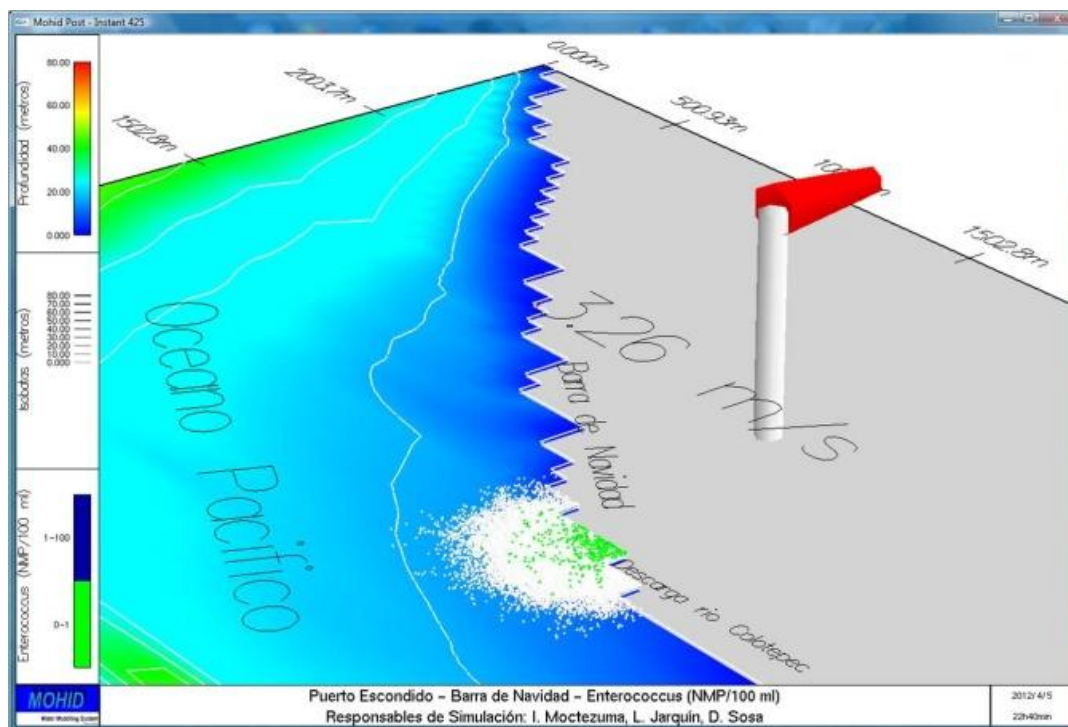


Figura G.5. Día tres, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, abril 2012.

ANEXO H. SIMULACIONES *E. coli* AGOSTO 2012 PLAYA COLOTEPEC

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario agosto 2012 en la zona de estudio: Playa Colotepec, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *E. coli*.

En las figuras H.1 y H.2 se muestran los resultados obtenidos para los días dos y tres de la simulación para el escenario agosto 2012. La captura correspondiente al día uno de esta simulación se muestra en la figura 4.22.

Las figuras H.3, H.4 y H.5 presentan los seguimientos de historial para cada bacteria *E. coli* modelada, según los días uno, dos y tres de la simulación, respectivamente.

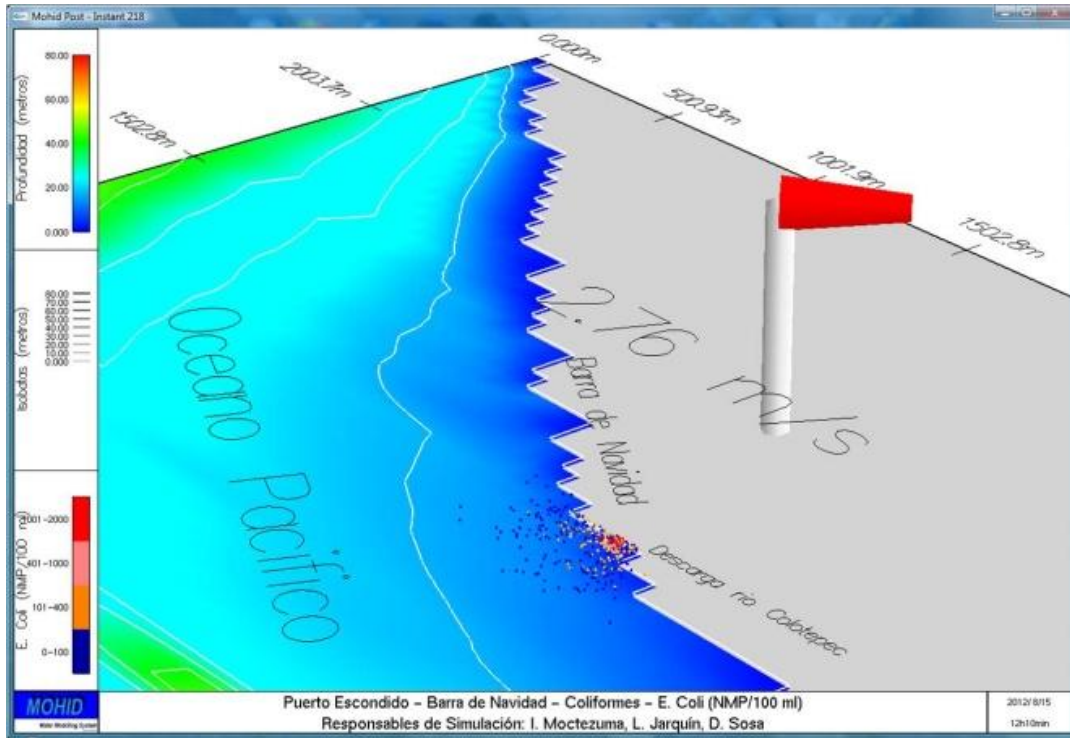


Figura H.1. Día dos, escenario agosto de 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

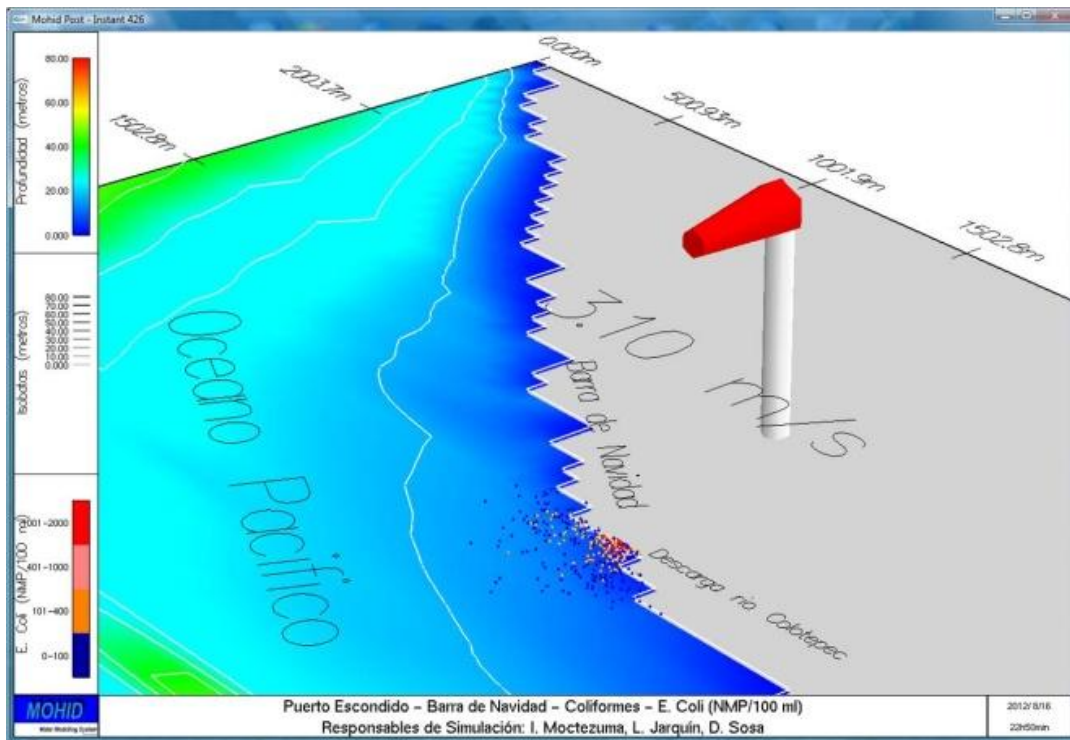


Figura H.2. Día tres, escenario agosto de 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

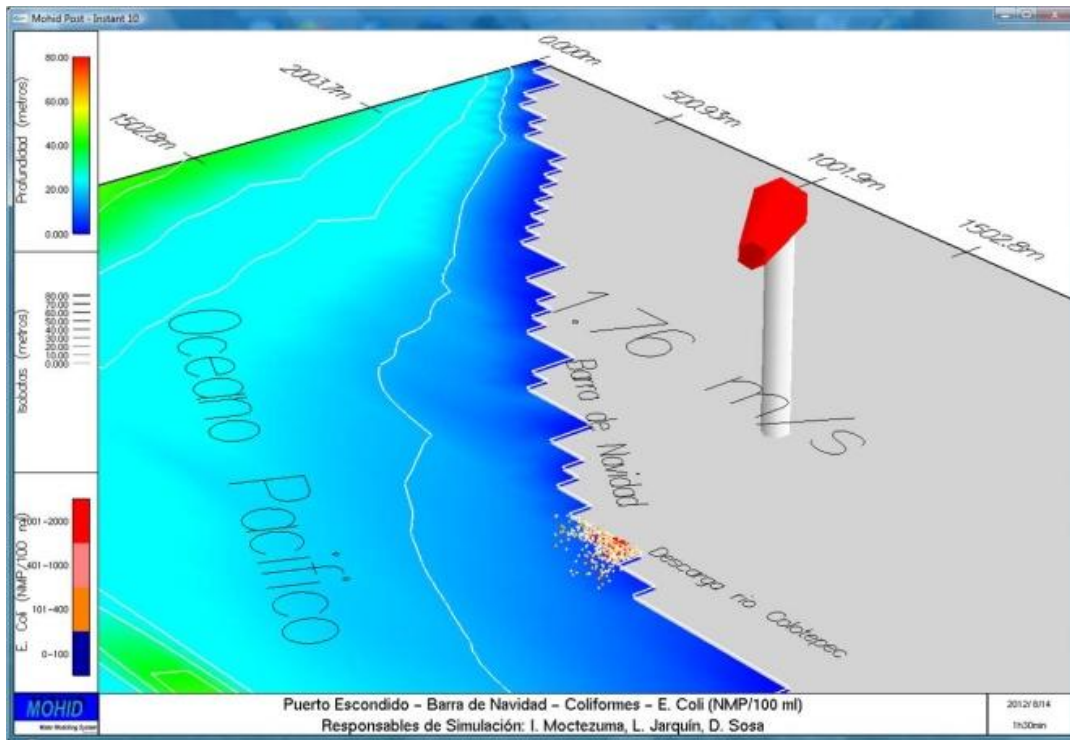


Figura H.3. Día uno, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, agosto 2012.

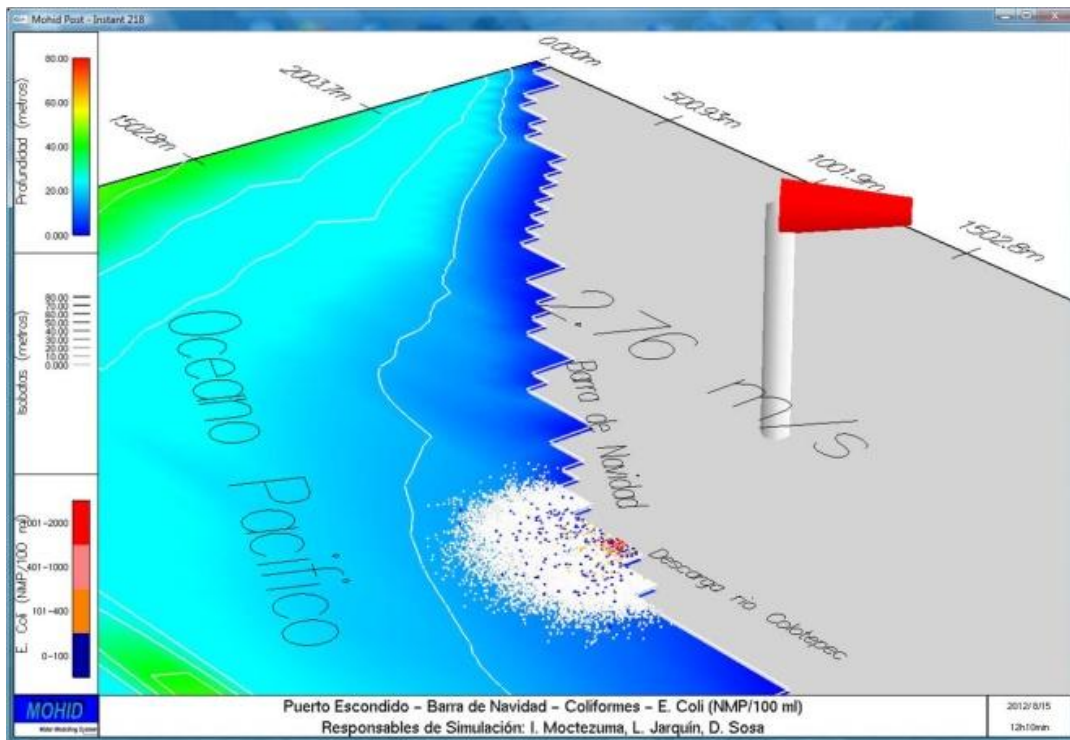


Figura H.4. Día dos, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, agosto 2012.

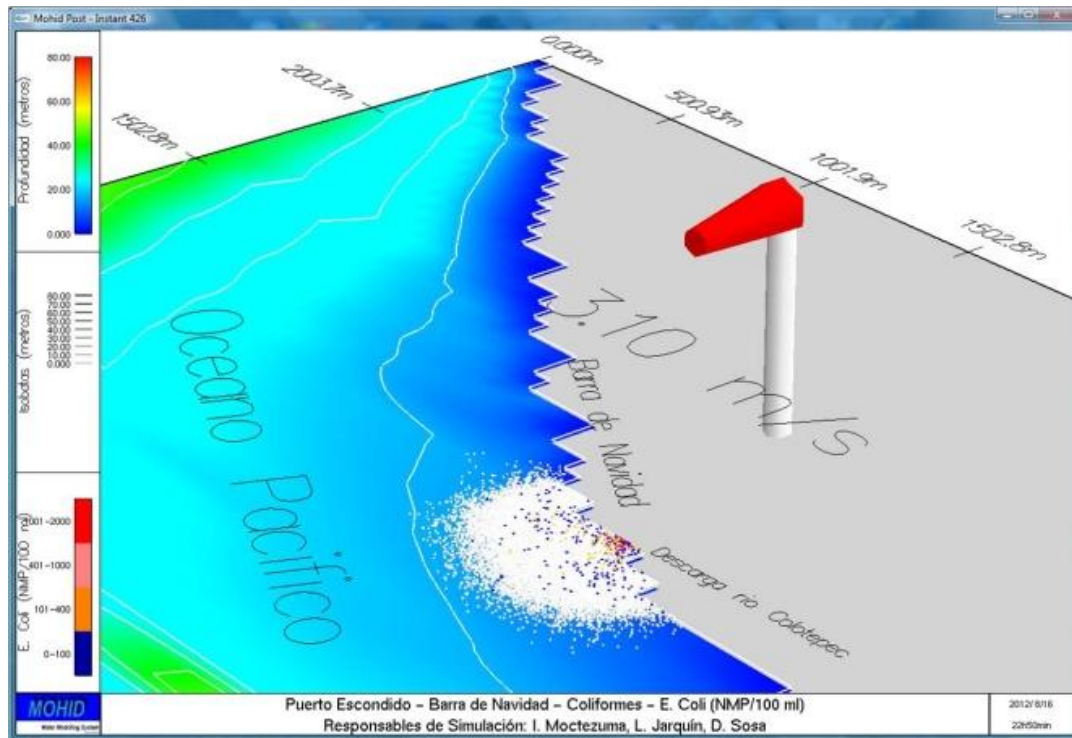


Figura H.5. Día tres, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, agosto 2012.

ANEXO I. SIMULACIONES *Enterococcus faecalis* AGOSTO 2012 PLAYA COLOTEPEC

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario agosto 2012 en la zona de estudio: Playa Colotepec, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*.

En las figuras I.1 e I.2 se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación realizada para el escenario agosto 2012, en los días dos y tres respectivamente. El día uno de esta simulación se puede observar en la figura 4.23.

Las figuras I.3, I.4 e I.5 muestran los seguimientos de historial para cada bacteria *Enterococcus faecalis* modelada en los días uno, dos y tres de la simulación correspondiente a este escenario.

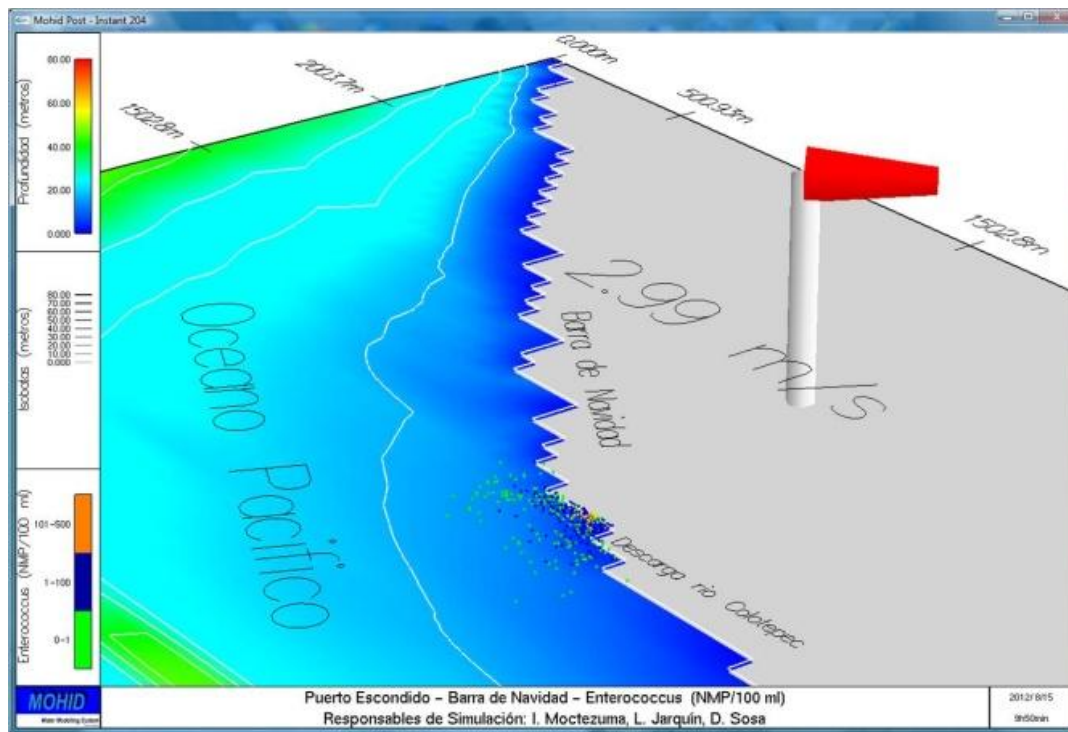


Figura I.1. Día dos, escenario agosto de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

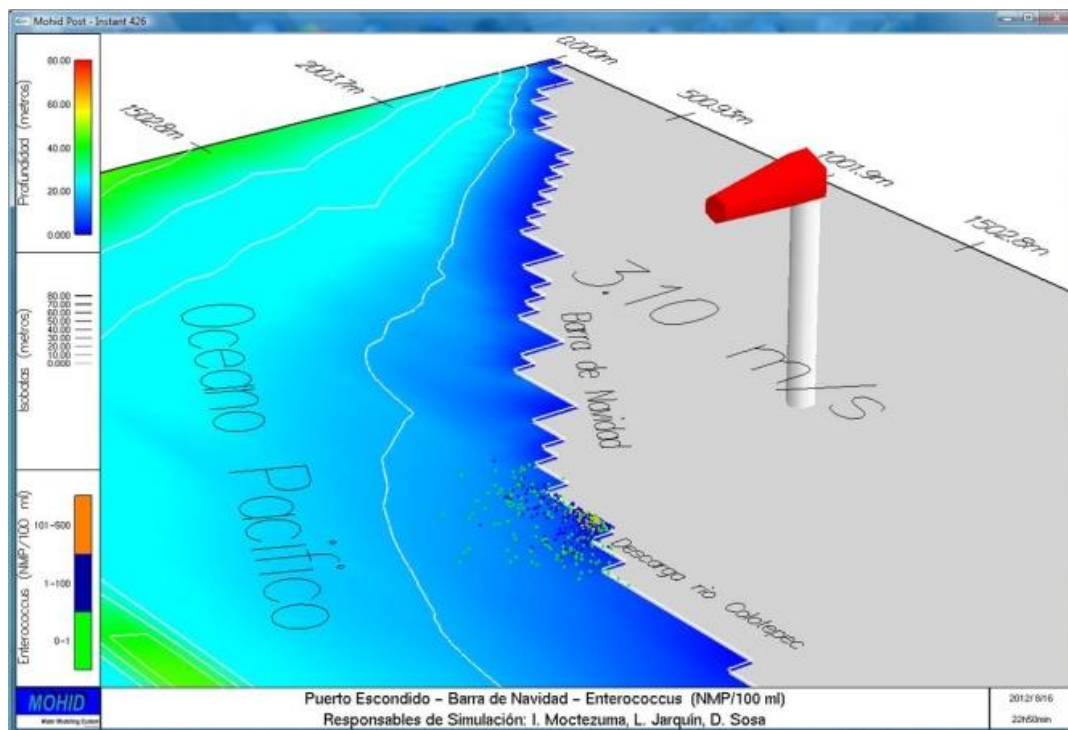


Figura I.2. Día tres, escenario agosto de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

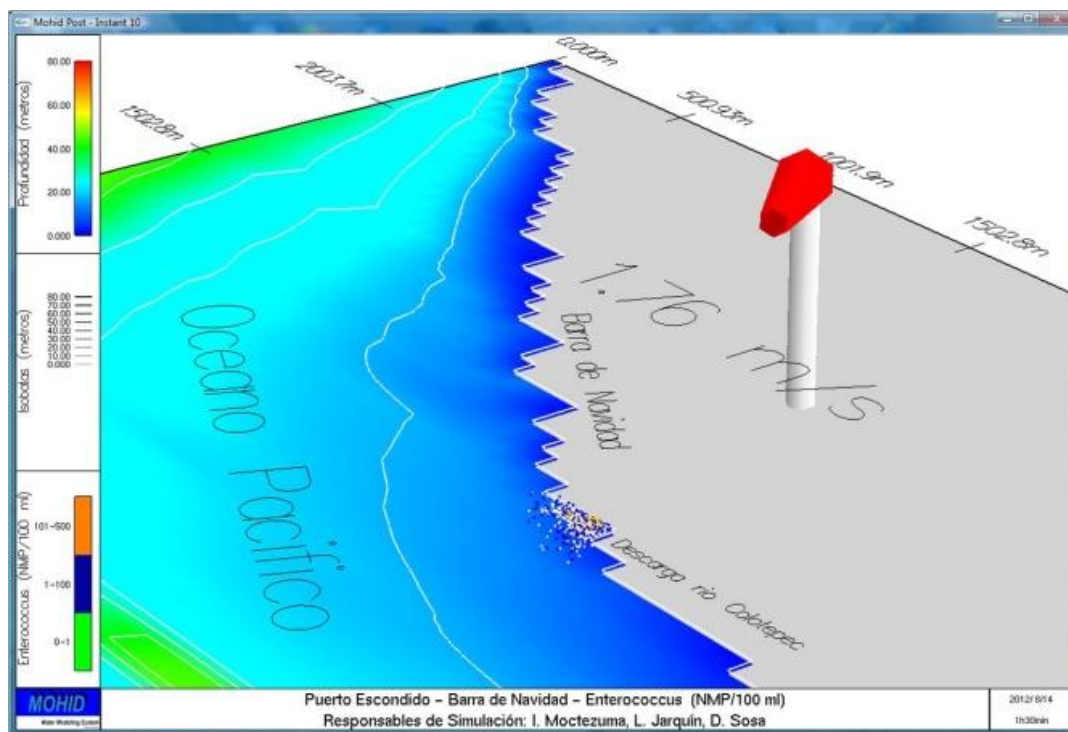


Figura I.3. Día uno, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, agosto 2012.

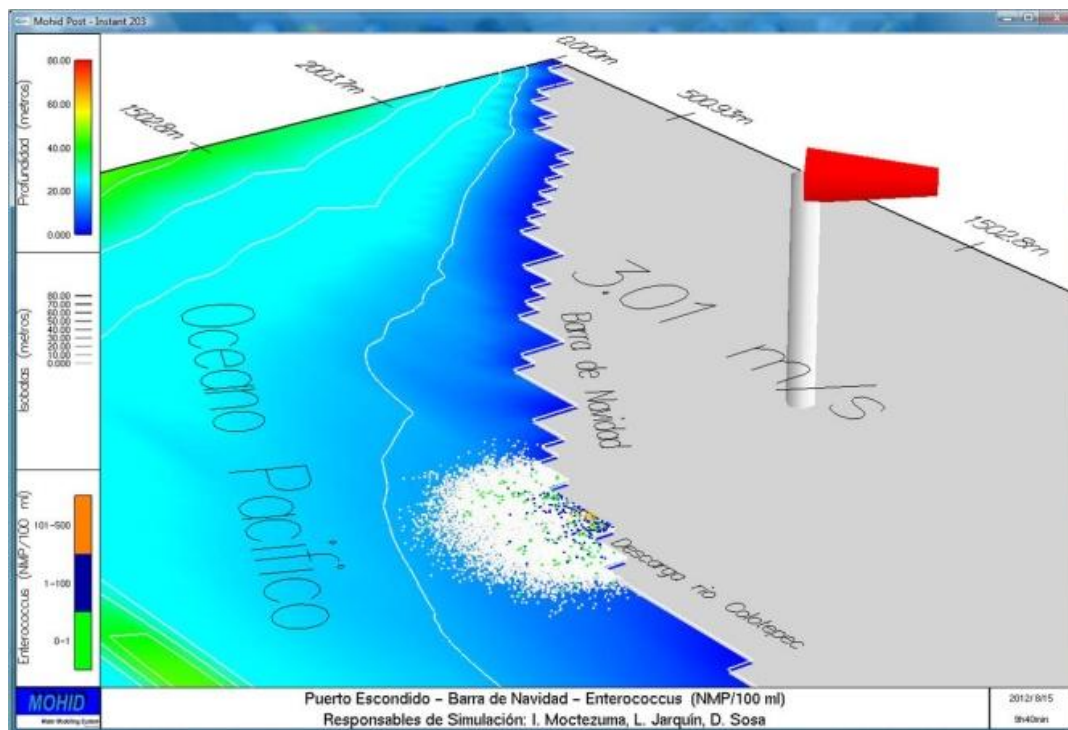


Figura I.4. Día dos, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, agosto 2012.

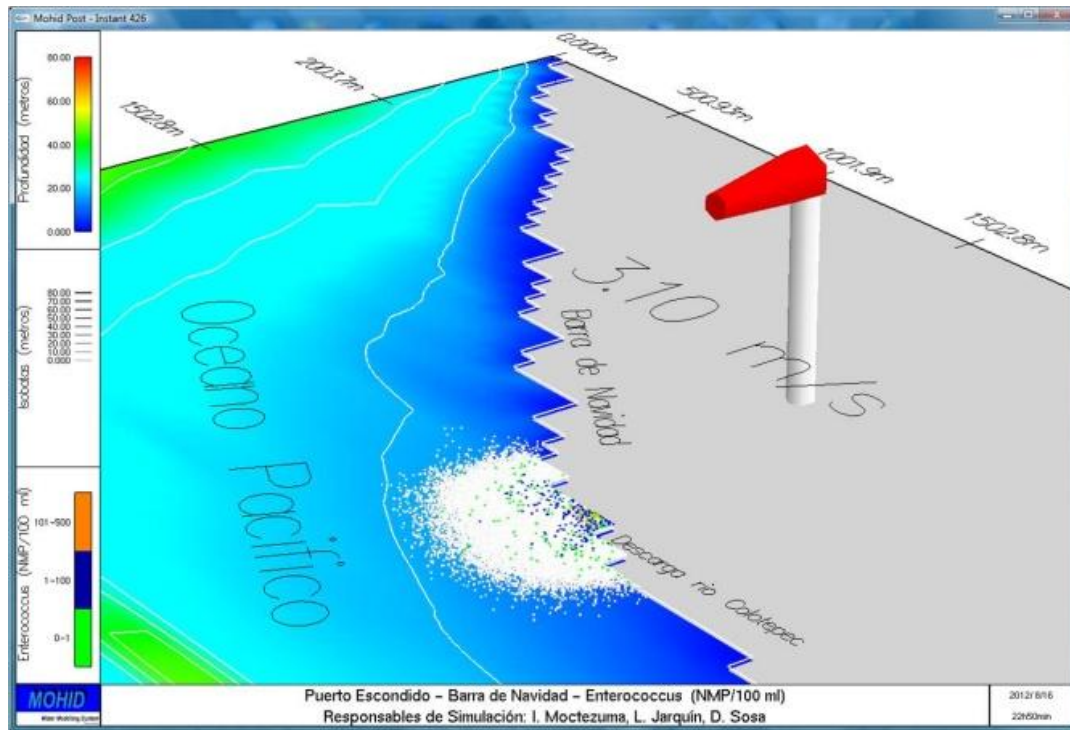


Figura I.5. Día tres, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, agosto 2012.

ANEXO J. SIMULACIONES *E. coli* OCTUBRE 2012 PLAYA COLOTEPEC

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario octubre 2012 en la zona de estudio: Playa Colotepec, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *E. coli*.

Las figuras J.1 y J.2 muestran los resultados obtenidos de la simulación hecha para el escenario octubre 2012, en los días dos y tres de la simulación, respectivamente. El día uno de la ejecución de esta simulación se puede observar en la figura 4.24.

En las figuras J.3, J.4 y J.5 se puede observar el seguimiento de historial para cada bacteria *E. coli* modelada en los días uno, dos y tres de la simulación correspondiente a este escenario.

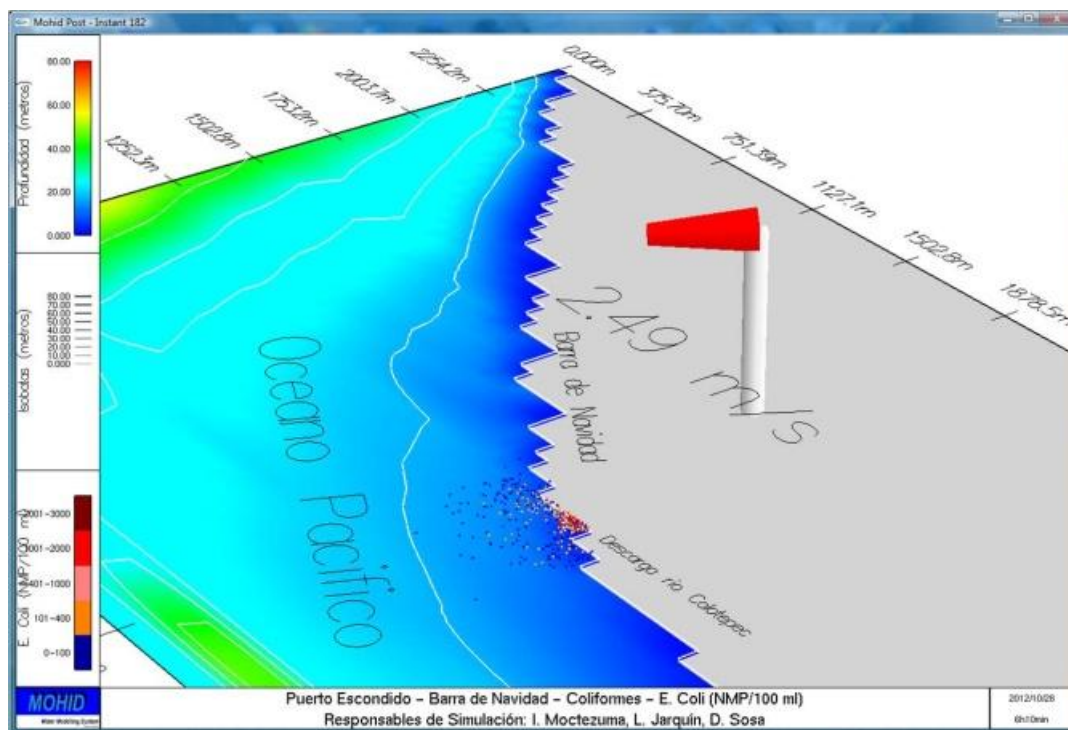


Figura J.1. Día dos, escenario octubre de 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

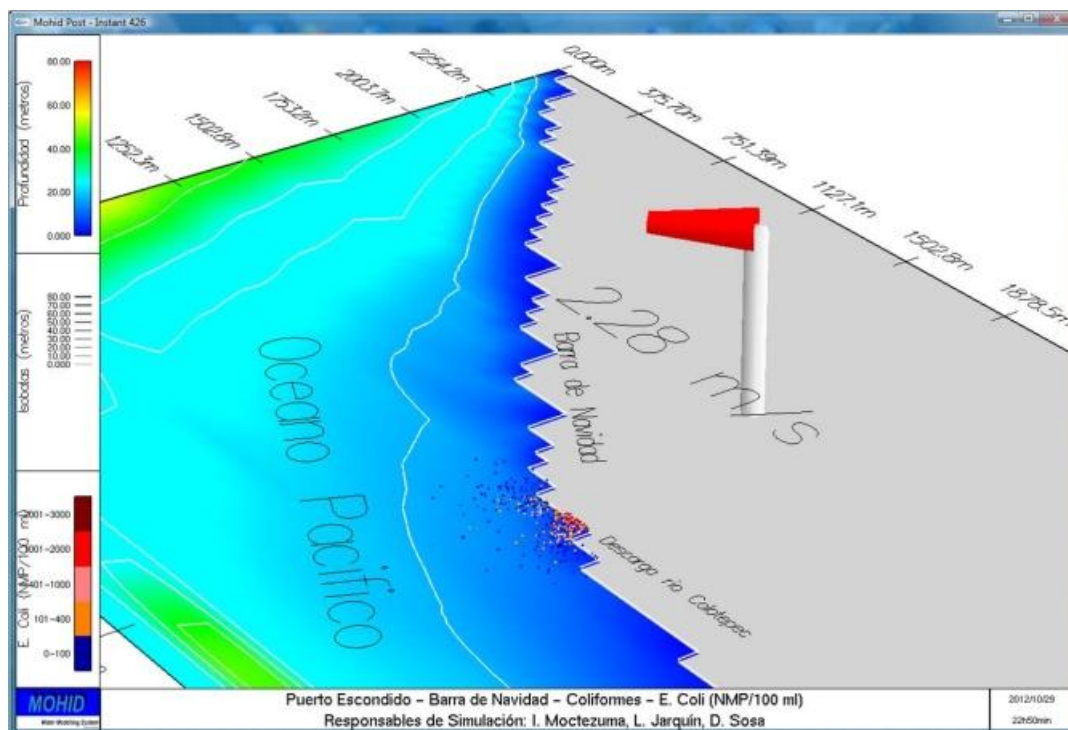


Figura J.2. Día tres, escenario octubre de 2012 *E. coli* en la Playa Colotepec.

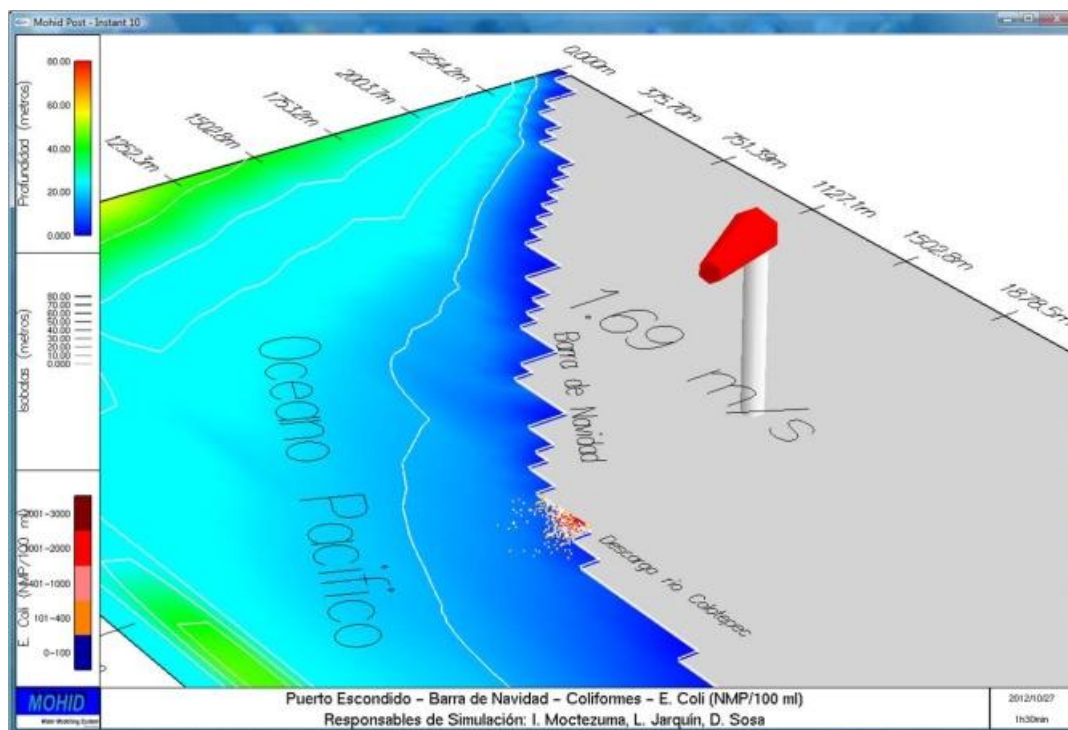


Figura J.3. Día uno, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, octubre 2012.

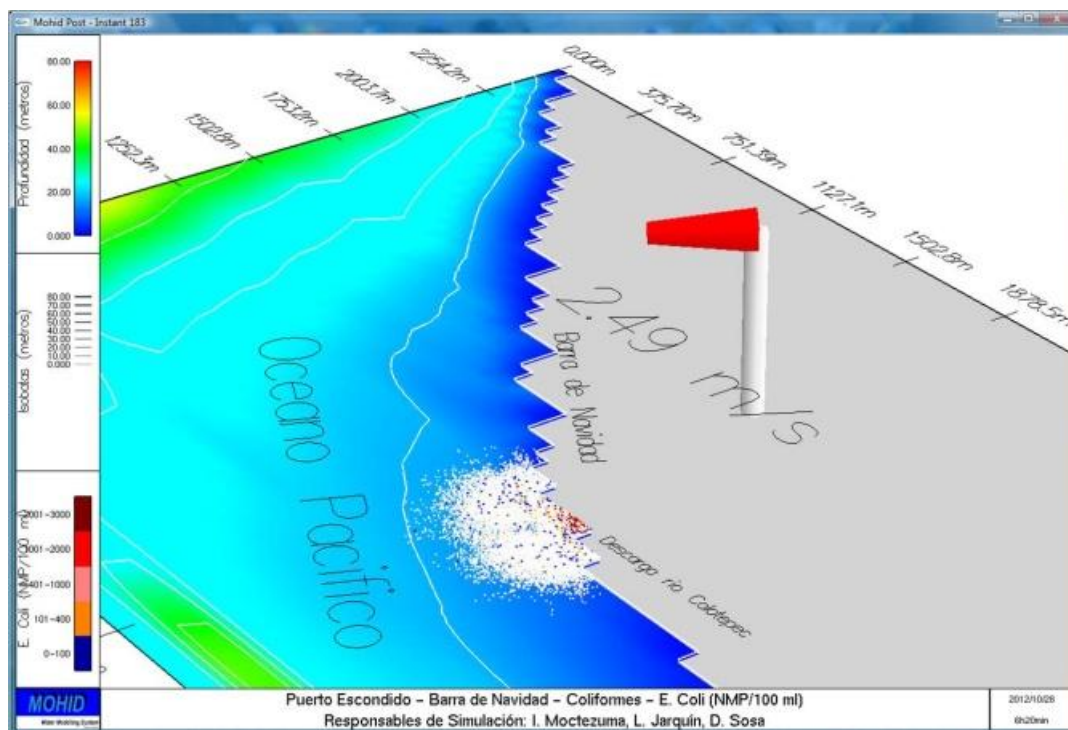


Figura J.4. Día dos, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, octubre 2012.

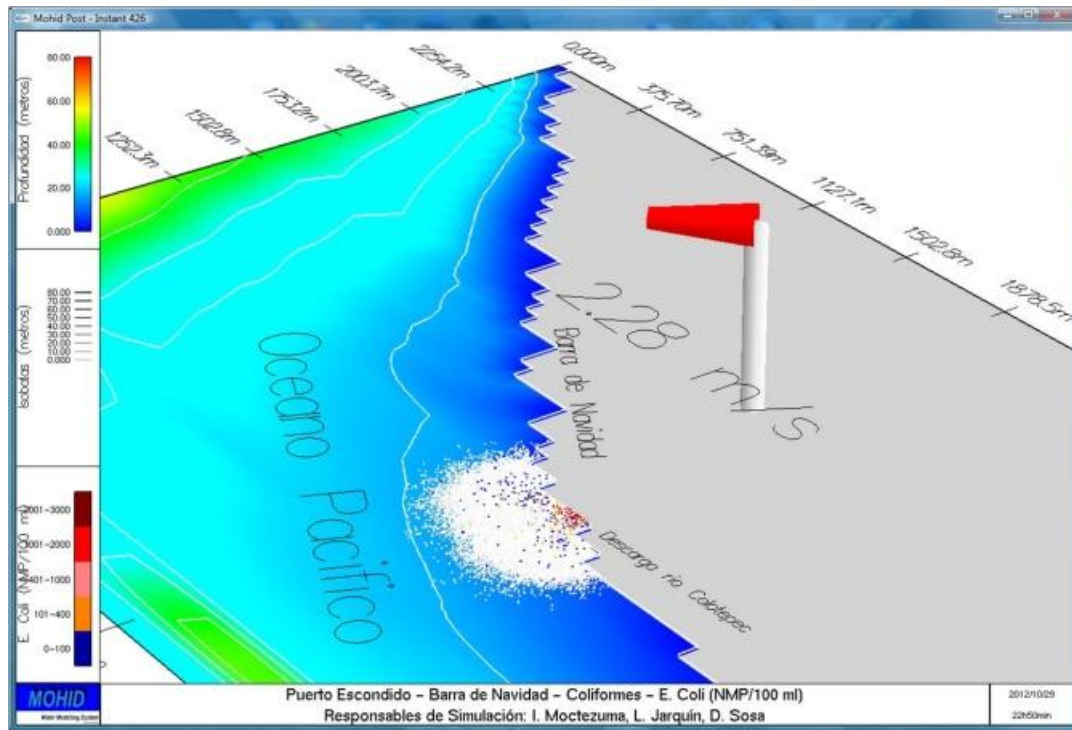


Figura J.5. Día tres, historial de seguimiento de *E. coli* en la Playa Colotepec, octubre 2012.

ANEXO K. SIMULACIONES *Enterococcus faecalis* OCTUBRE 2012 PLAYA COLOTEPEC

A continuación se muestra el seguimiento de la simulación creada para el escenario octubre 2012 en la zona de estudio: Playa Colotepec, Puerto Escondido. Simulando la bacteria *Enterococcus faecalis*.

Las figuras K.1 y K.2 muestran los resultados obtenidos de la simulación realizada para el escenario octubre 2012, en los días dos y tres respectivamente. El día uno de la ejecución de esta simulación se puede apreciar en la figura 4.25.

En las figuras K.3, K.4 y K.5 se pueden observar los seguimientos de historial para cada bacteria *Enterococcus faecalis* modelada, correspondiendo a los días uno, dos y tres de la simulación para este escenario, respectivamente.

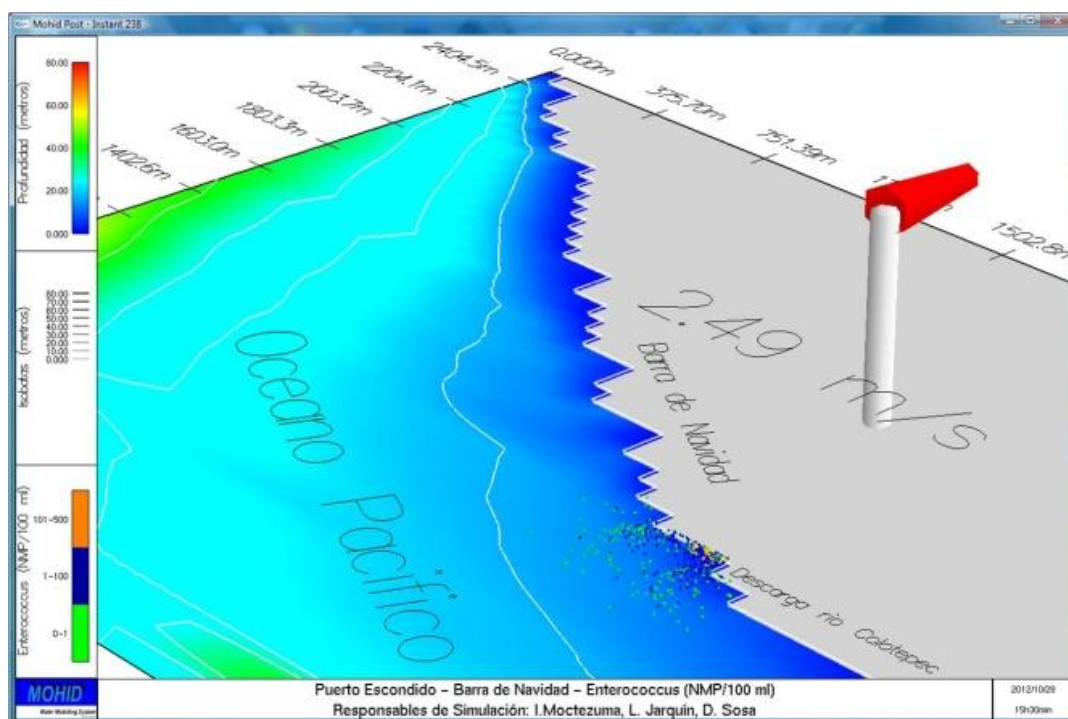


Figura K.1. Día dos, escenario octubre de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

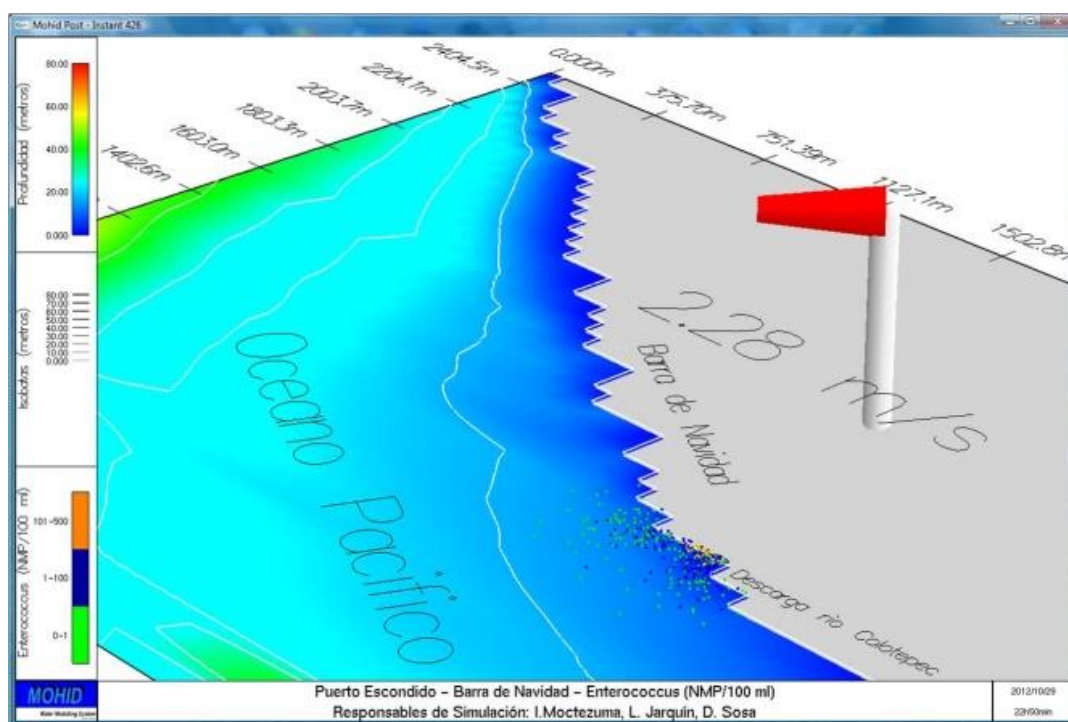


Figura K.2. Día tres, escenario octubre de 2012 *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec.

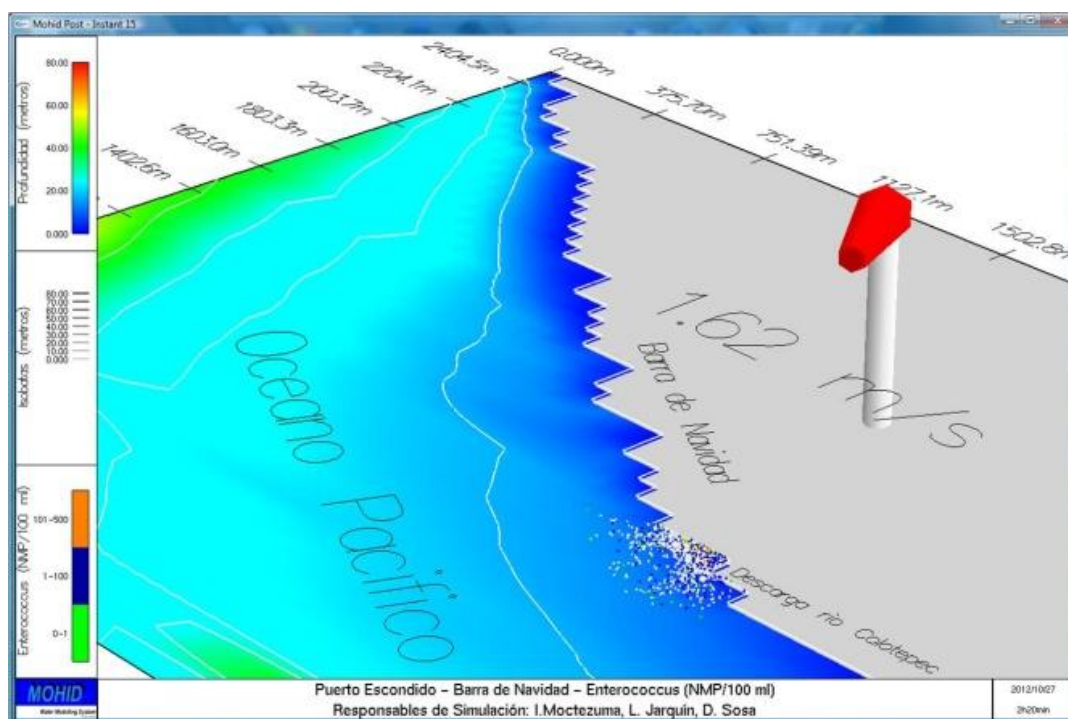


Figura K.3. Día uno, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, octubre 2012.

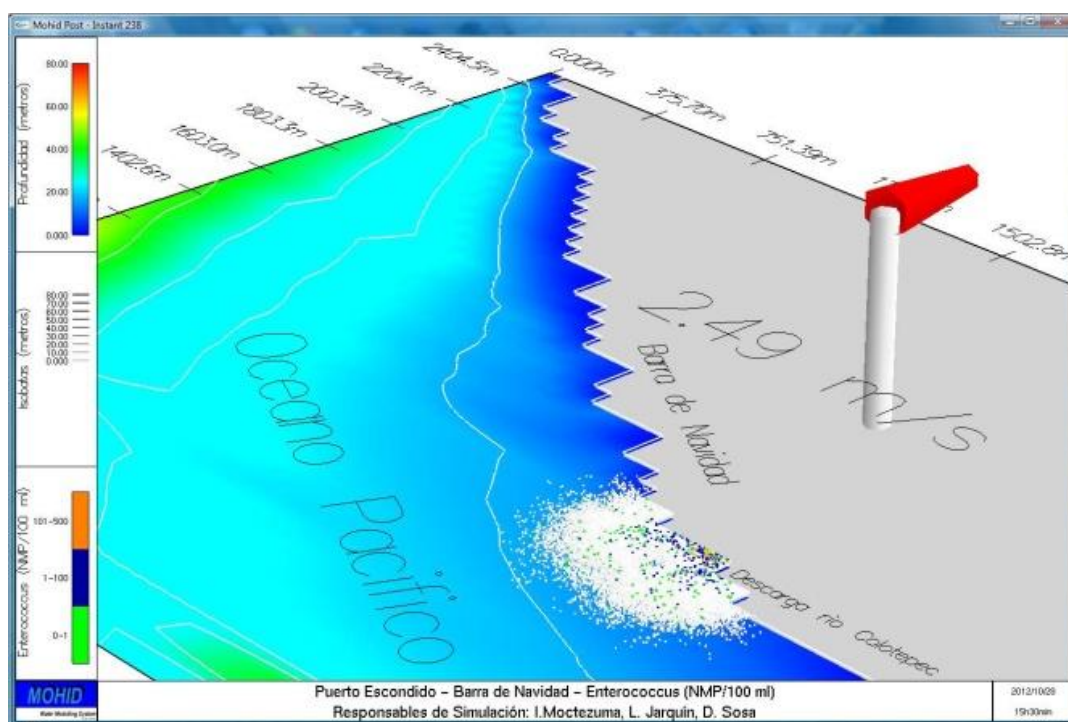


Figura K.4. Día dos, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, octubre 2012.

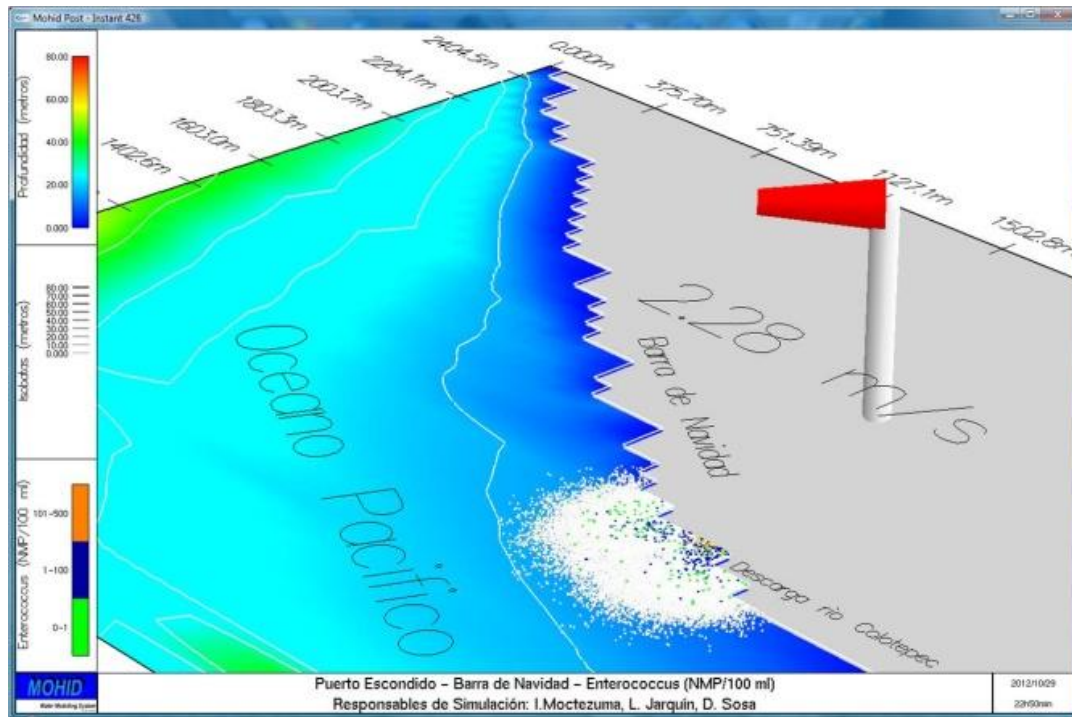


Figura K.5. Día tres, historial de seguimiento de *Enterococcus faecalis* en la Playa Colotepec, octubre 2012.

REFERENCIAS

Autodidáctica Océano Color 1995, Vol. 5, Océano, Barcelona.

Canham, DC, Ehrlich, RK & Cole JJ 2003, *Models in ecosystems science*, Princeton University Press, New Jersey.

Cardini J, Zabalett A, Oliver N & Mársico D 2003, 'Contaminación transfronteriza en el río Uruguay. Caso de estudio: Descargas cloacales de colón y Paysandú'. *13° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente*, Asociación Argentina de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Buenos Aires, pp. 27-31.

COFEPRIS 2007, *Lineamientos para determinar la calidad de agua de mar para uso recreativo con contacto primario*, manual pdf, Secretaría de Salud, consultado el 18 de noviembre de 2008,
<<http://www.salud.gob.mx/unidades/cofepris/playas/Lineamientos/Lineamientos2007.pdf>>

Coss-Bu, R 2003, *Simulación un enfoque práctico*, Limusa, México D.F.

Curtis, H, Sue-Barnes, N, Schnek, A & Flores, G 2000, *Biología*, Sexta edición en español, Ed. Médica Panamericana, Buenos Aires.

Diccionario enciclopédico Espasa ilustrado 2000 1999, ESPASA, Madrid.

Diccionario esencial de la lengua española 2006, Real Academia Española, Madrid.

Domínguez-Hernández, F, García-Alavez, R, Galicia-Jiménez, MM & Moctezuma-Cantorán, I 2006, *Estudio de clasificación de las playas de Puerto Escondido, Oaxaca (caracterización y análisis)*, Propuesta de proyecto, Universidad del Mar, Puerto Escondido.

Domínguez-Hernández, F, García-Alavez, R, Galicia-Jiménez, MM & Moctezuma-Cantorán, I 2008a, *Primer informe técnico*, avance uno de tres, Universidad del Mar, Puerto Escondido.

Domínguez-Hernández, F, García-Alavez, R, Galicia-Jiménez, MM & Moctezuma-Cantorán, I 2008b, *Segunda campaña de muestreo Análisis Microbiológicos (Determinación y análisis)*, Segundo informe técnico del proyecto no. 00048769, aprobado por el fondo de investigación (CONACyT-CNA) y desarrollo sobre el agua, denominado: estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido, Oaxaca (caracterización y análisis), Universidad del Mar, Puerto Escondido.

González-Mantiega, MT 2003, *Modelo matemáticos discretos en las ciencias de la naturaleza: teoría y problemas*, Díaz de Santos, Madrid.

Google 2009, *Google Earth*, Google, Inc., consultado el 10 de octubre de 2009, <<http://earth.google.es/>>.

Hillman G, Rodriguez A, Pagot M, Tyrrell D, Corral M, Oroná C & Möller O 2004, 'Simulación hidrodinámica bidimensional en la laguna de los patos, Brasil', *Mecánica Computacional Vol. XXIII*, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Bariloche, consultado el 17 de septiembre de 2009, <http://www.cab.cnea.gov.ar/enief/dirjobs/S01/GHillman2_final.pdf>.

INEGI 2006, *II conteo de población y vivienda 2005*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, consultado el 26 de enero de 2009, <<http://www.inegi.org.mx>>.

Jarquín-Pérez, L. 2010, 'Simulaciones bajo diferentes escenarios para determinar la calidad de agua de las playas de Puerto Escondido', tesis de licenciatura en proceso, Universidad del Mar Campus Puerto Escondido, Puerto Escondido.

Larson, RE & Hostetler, RP 2005. *Cálculo Vol. 1*. 8ª Edición, McGraw Hill, Madrid.

MARETEC 2002a, *Hydrodynamic Module user Guide*, manual pdf, Marine and Environmental Tecnology Center, consultado el 10 de septiembre de 2009, <<http://maretec.mohid.com/PublicData/products/Manuals/HydrodynamicsUserManual.pdf>>

MARETEC 2002b, *MARETEC - Home Page*, Marine and Environmental Tecnology Center, consultado el 4 de septiembre de 2009, <<http://www.maretec.mohid.com>>.

MARETEC 2002c, *Modelling Water Resources*, Marine and Environmental Tecnology Center, consultado el 10 de septiembre de 2009, <<http://www.mohid.com/>>.

Martins F, Pina P, Calado S, Delgado S & Neves R 2003, 'A coupled hydrodynamic and ecological model to manage quality in Ria Formosa coastal lagoon', *Advances in Ecological Sciences*, Vol. 18, pp. 93-100.

MedicineNet 2002, *Enterococcus definition - Medical Dictionary definitions of popular medical terms easily define*, MedicineNet, Inc., consultado el 10 de octubre de 2009, <<http://www.medterms.com/script/main/art.asp?articlekey=20162>>.

Microsoft 2009, *Enciclopedia Microsoft Encarta Online*, Microsoft Corporation, consultado el 11 de octubre de 2009, <<http://es.encarta.msn.com>>.

Moctezuma-Cantorán, I, Jarquín-Pérez, L & Sosa-Gómez, D 2010, *Simulaciones de dispersión de Coliformes (E.Coli) y Enterococos en las playas de Puerto Escondido, Oaxaca*, tercer informe técnico del proyecto no. 00048769, aprobado por el fondo de investigación (CONACyT-CNA) y desarrollo sobre el agua, denominado: estudio de la clasificación de las playas de Puerto Escondido, Oaxaca (caracterización y análisis), Universidad del Mar, Puerto Escondido.

OMS 2003, *Guidelines for safe recreational water Volume 1- Coastal and fresh waters*, Organización Mundial de la Salud, consultado el 20 de octubre de 2009, <http://www.who.int/water_sanitation_health/bathing/srwe1/en/>.

RAM 2003, 'Los modelos de predicción de vertidos de crudos, seguimiento de las primeras manchas del Prestige', *Revista del Aficionado a la Meteorología*, No. 7, consultado el 12 de septiembre de 2009, <<http://www.meteored.com/ram/>>.

Ramírez TJ 2006, 'Corrientes Oceánicas'. *Revista de investigación 360 en Ciencias y Matemáticas*, segunda edición, consultado el 11 de noviembre de 2009, <<http://cremc.ponce.inter.edu/2edicion/articulo2.htm>>.

Ríos-Insua, D, Ríos-Insua, S & Martín-Jiménez, J 2000, *Simulación: Métodos y Aplicaciones*, RA-MA, Madrid.

Santiago-Romero, H, García-Alavez, R, Galicia-Jiménez, MM, Moctezuma-Cantorán, I & Domínguez-Hernández, F 2007, 'Estudio preliminar de la problemática ambiental de las playas de Puerto Escondido', *VI Congreso Internacional y XII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales*, Universidad Autónoma del Estado de México, Chihuahua, pp. 317-321.