



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTUDIO DE LA BIFURCACIÓN DEL RÍO MEZCALAPA–SAMARIA–CARRIZAL
EN UN MICROMODELO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
J. JESÚS GÓMEZ LÁZARO

TUTOR PRINCIPAL
M.I. JOSÉ ALFREDO GONZÁLEZ VERDUGO
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

JIUTEPEC, MORELOS, OCTUBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Espinoza Ayala Joselina Clemencia

Secretario: Dr. Arroyo Correa Víctor Manuel

Vocal: M. I. González Verdugo José Alfredo

1^{er}. Suplente: M. en C. Salgado Maldonado Gilberto

2^{do}. Suplente: M. en I. Cervantes Jaimes Claudia Elizabeth

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Jiutepec, Morelos.

TUTOR DE TESIS:

M. I. José Alfredo González Verdugo

FIRMA

Romance del río Perenne

En las cumbres maternas
en constante alumbramiento, hace
 milenarios que el río,
nace y prosigue naciendo.

Manantiales de la tierra
 y cataratas del cielo,
hacen que por su camino,
crezca y prosiga creciendo.

Y cumpliendo su destino
 al final de su sendero,
 en el Golfo mexicano
muere y prosigue muriendo.

El río como la Vida,
vence espacios, vence tiempos;
 las aguas pueden pasar;
pero el Grijalva es eterno.

José María Gurria Urgell

DEDICATORIAS

A mi padre:

Porque con tu sacrificio, trabajo y constancia me demostraste tu amor sin necesidad de palabras. Fuiste un gran ingeniero, pero fuiste aún mejor en tu ejercicio de padre. Te mando un beso y un fuerte abrazo hasta el cielo.

A mi madre:

Porque has soportado grandes batallas y aun así te sigues manteniendo de pie. Por ser un ejemplo de lucha que me ha enseñado a nunca rendirme.

A Linda Andrea:

Por creer en mí, por tu apoyo, por tus palabras de aliento, por enseñarme a ser optimista, por mostrarme tantas cosas bonitas de la vida, pero sobre todo por el amor que me brindas.

A mis hermanos:

Por haber estado a mi lado en los momentos más tristes, pero también en los mejores de mi existencia; por ser mis dos más grandes ejemplos de inteligencia y virtud, y sobre todo por ser mis mejores amigos.

A mis abuelos:

Luis y Esperanza, por hacerme sentir su cariño a pesar del corto tiempo que los tuve a mi lado; José y Dominga, por ser para mi otro padre y otra madre, por darme su confianza, y por seguir guiando mi camino con amor y paciencia.

A mis tíos y primos:

A los primeros, por ser ejemplo de trabajo, responsabilidad y superación; porque nunca han dejado de respaldarme y por haberme brindado siempre sabios consejos. A los segundos, por todas las experiencias compartidas y por demostrarme que no solo nos une la sangre sino también la amistad.

A mis entrañables amigos:

Brenda López, Edgar Ortiz, Juan De Dios Vázquez, Esaú Villanueva, Josué Delgado, Gabino Barrera y Víctor Flores.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, ingeniero y arquitecto del universo, por concebirme en su diseño y permitirme lograr un paso más en mi proyecto de vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de su comunidad.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por haberme albergado en sus aulas.

Al CONACYT, por haberme proporcionado una beca de manutención para el desarrollo y conclusión de mis estudios de maestría.

A mi tutor de tesis, el M. I. José Alfredo González Verdugo, por haber dirigido este trabajo de investigación, así como por haberme aportado sus valiosos conocimientos y su gran experiencia que hicieron posible concluir el presente proyecto; y a la Dra. Joselina Espinoza Ayala que, junto a mi tutor de tesis, fueron los primeros en proponer e introducir el estudio de micromodelos fluviales de fondo móvil en México, así como por su importante contribución para el desarrollo de la presente investigación.

A mis sinodales M. I. Claudia Elizabeth Cervantes Jaimes, M. C. Gilberto Salgado Maldonado y Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa, por sus importantes contribuciones y comentarios para la mejora del presente trabajo.

A mis profesores Dr. Carlos Fuentes, Dr. Heber Saucedo, Dr. Nahún Villanueva, M. I. Jaqueline Lafragua, Dr. Ronald Ontiveros, Dr. Edmundo Pedroza, Dr. Javier Canto, Dr. Felipe Arreguin y Dr. Héctor Ballinas, por sus conocimientos transmitidos en los salones de clase.

Al Dr. Moisés Berezowsky Verduzco y al Dr. Abel Amado Jiménez Castañeda, así como al Geóg. Jorge Brena Zepeda, por la valiosa información proporcionada acerca de la zona de estudio.

Al personal de laboratorio de hidráulica Antonio Moyaho y Alberto Castro, por los trabajos de mejora que realizaron al micromodelo, siempre con un alto grado de responsabilidad y profesionalismo.

Al Maestro Omar Fonseca Moreno, por recolectar el material audiovisual durante la realización de las pruebas y por enseñarme la importancia que ha adquirido la fotografía en la investigación experimental.

Al M. I. Mauricio Escalante y al Dr. Carlos Mariano, al primero por abrirme las puertas del IMTA en mi época de estudiante y al segundo por otorgarme mi primera oportunidad laboral dentro de dicho instituto, pero sobre todo gracias a ambos por su amistad.

Al M. I. Juan Antonio López Orozco y al Dr. Juan Gabriel García Maldonado, por haber compartido juntos buenos momentos en el campo de juego y por estos años que me han brindado su amistad.

A Irene González, Yadira Reynoso, Eduardo Ocampo y Jomaelah Morales, que me acompañaron en esta travesía desde el glorioso Instituto Tecnológico de Zacatepec; así como a Hugo Adrián Martínez, Issaías Delgado, Marco Jiménez y Mayra Reyes, que tuve la fortuna de conocer en las aulas del posgrado.



RESUMEN

El presente trabajo está orientado a evaluar una tecnología relativamente nueva de modelación física de fondo móvil desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés) en 1994, denominada *Modelación de Respuesta Hidráulica de Sedimento (HSR, por sus siglas en inglés)* y anteriormente llamada *micromodelación*. La zona de estudio elegida es la bifurcación del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal ubicada en el estado mexicano de Tabasco, debido a trabajos de modelación física y numérica de los que ya ha sido objeto este sistema por parte de entidades como el Instituto de Ingeniería de la UNAM, lo cual implica disposición de material bibliográfico y datos para desarrollar la investigación.

El micromodelo fue diseñado y construido a partir de una imagen satelital de la zona de estudio con una escala de longitud horizontal de 1:5,400, con base en las consideraciones y recomendaciones emitidas por el USACE para este tipo de modelos. Se calculó el gasto formativo asociado a periodos de retorno de 1.4, 2, 4 y 7 años; y se obtuvo la pendiente del cauce a partir de un levantamiento topobatimétrico que data del año 1997. Se programaron cuatro series de pruebas, en una de estas se cambió el valor de escala de longitud vertical y en otras dos se modificó la configuración en planta del modelo. Durante la experimentación, los valores del gasto y de la pendiente se escalaron para ser proporcionados al micromodelo.

Al finalizar cada una de las pruebas llevadas a cabo en el micromodelo, se levantó la topobatimetría obtenida empleando un escáner láser tridimensional de última tecnología, se procesaron los puntos recolectados utilizando un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) y se dibujó para cada levantamiento un mapa topobatimétrico del que se obtuvieron sus secciones transversales. De las secciones transversales resultantes de cada ensayo se extrajeron sus parámetros morfológicos de profundidad máxima y área, para ser evaluados por el Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE, por sus siglas en inglés) con respecto a sus valores correspondientes de las secciones transversales de prototipo y así determinar cuál de las pruebas realizadas es la que mejor reproduce las tendencias topobatimétricas del río. La evaluación se llevó a cabo por segmento de río, así como para toda la bifurcación, obteniéndose mejores resultados en el análisis del tramo correspondiente al río Samaria, logrando reducir el valor del MAPE al evaluar el área de las secciones transversales hasta el 18.03%, manejando una escala de longitud vertical de 1:225 y una distorsión igual a 24.



Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Planteamiento del problema.....	2
1.2	Justificación.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivos específicos.....	4
1.4	Hipótesis.....	4
1.5	Antecedentes.....	4
2	Estado del arte.....	9
2.1	Definición.....	9
2.2	Clasificación o tipo de modelo.....	11
2.2.1	Clasificación de modelos hidráulicos según el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).....	11
2.2.2	Clasificación de modelos de fondo móvil según Graf.....	12
2.2.3	Clasificación de los escurrimientos de acuerdo con sus grados de libertad..	15
2.3	Componentes de un micromodelo.....	16
2.3.1	En el inicio.....	17
2.3.2	En la etapa de consolidación.....	18
2.3.3	Con las nuevas tecnologías.....	21
2.3.4	Configuración reciente.....	22
2.4	Operación y funcionamiento de un micromodelo.....	23
2.4.1	Introducción del sedimento.....	23
2.4.2	Aplicación de las variables y los parámetros operativos.....	24
2.4.3	Comparación de la configuración de fondo medida en el modelo con la de prototipo	26
2.4.4	Ajuste de las variables y los parámetros operativos.....	27



2.4.5	Desarrollo de la configuración base del fondo	28
2.4.6	Pruebas para la evaluación de estructuras de protección fluvial	29
2.5	Principales características de los micromodelos	30
2.5.1	Teoría de la micromodelación	30
2.5.2	Similitud o semejanza	31
2.5.3	Escalas usuales y distorsión	32
2.5.4	Efectos de escala	34
2.5.5	Dimensiones de parámetros y variables	35
2.5.6	Materiales comunes	36
2.5.7	Propiedades del sedimento	39
2.5.8	Configuración del fondo.....	40
2.6	Aplicaciones de los micromodelos.....	41
2.6.1	Ventajas	42
2.6.2	Desventajas.....	43
3	Diseño y construcción del micromodelo	45
3.1	Elección del escenario	45
3.1.1	Escenario espacial	45
3.1.2	Escenario temporal	47
3.2	Descripción de la zona de estudio.....	50
3.3	Diseño del micromodelo	51
3.3.1	Selección de la escala de longitud horizontal.....	52
3.3.2	Escala de longitud vertical.....	52
3.3.3	Generación del mapa	53
3.4	Construcción del micromodelo	54
3.5	Cálculo de las variables y los parámetros del tramo de estudio.....	57



3.5.1	Pendiente media	57
3.5.2	Gasto formativo	61
4	Experimentación	65
4.1	Instalación experimental	65
4.1.1	Material y equipo.....	65
4.1.2	Sistemas de medición	68
4.2	Relaciones de escala.....	70
4.2.1	Pendientes.....	72
4.2.2	Gastos	74
4.3	Pruebas	75
4.3.1	Serie	76
4.3.2	Metodología.....	79
5	Resultados.....	82
5.1	Serie 1.....	82
5.1.1	Características de las pruebas	82
5.2	Serie 2.....	83
5.2.1	Características de las pruebas	83
5.2.2	MAPE en la bifurcación	84
5.2.3	MAPE en cada río	84
5.3	Serie 3.....	85
5.3.1	Características de las pruebas	85
5.3.2	MAPE en la bifurcación	85
5.3.3	MAPE en cada río	86
5.4	Serie 4.....	86
5.4.1	Características de las pruebas	86



5.4.2	MAPE en la bifurcación	87
5.4.3	MAPE en cada río	87
5.5	Discusión de resultados	88
5.5.1	MAPE en la bifurcación	88
5.5.2	MAPE en cada río	88
5.5.3	Pruebas de mejor ajuste	89
5.5.4	Análisis de los resultados obtenidos.....	94
6	Conclusiones y recomendaciones	97
6.1	Conclusiones	97
6.2	Recomendaciones.....	99
7	Bibliografía.....	101
8	Anexos	104
8.1	Anexo A. Gastos máximos anuales.....	104
8.2	Anexo B. Levantamientos topobatimétricos	105
8.3	Anexo C. Tablas de cálculo del MAPE.....	118
8.3.1	C.1 Serie 2	118
8.3.2	C.2 Serie 3	120
8.3.3	C.3 Serie 4.....	122
8.4	Anexo D. Comparativa entre las secciones transversales de la topobatimetría de 1997 y de los resultados de la prueba S2_Q0.14_P1 para el río Samaria.....	124

Índice de figuras

Figura 1.1	Piedra Sayhuite o Saywite. Fuente: https://hidraulicainca.com/	5
Figura 1.2	a) William Froude y b) Osborne Reynolds, dos de los principales desarrolladores de la modelación hidráulica. Fuente: Echávez, 1996	6



Figura 2.1 Micromodelo de un tramo del río Misisipi. Fuente: Davinroy R. D., 1994	10
Figura 2.2 a) Modelo convencional de fondo móvil Dogtooth Bend, escala horizontal 1:400, escala vertical 1:100; y b) Micromodelo Atchafalaya River, escala horizontal 1:7200, escala vertical 1:1200. Fuente: Davinroy et al., 2011.....	10
Figura 2.3 Grados de libertad en una corriente. Fuente: Maza y García, 1997	16
Figura 2.4 Vista en planta de un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997	18
Figura 2.5 Vista de una sección transversal típica en un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997.....	19
Figura 2.6 Vista en perspectiva de un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997	20
Figura 2.7 Vista lateral de un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997	21
Figura 2.8 Configuración general del micromodelo: a) Placa inserta, b) Canal hidráulico sobre la mesa, c) Bomba y depósito de agua, d) Equipo computacional, f) Interfaz del usuario y g) Modelo inserto y su sedimento. Fuente: Davinroy et al., 2011.....	23
Figura 2.9 Hidrograma anual de promedios mensuales, aplicado al micromodelo estudiado en la tesis de Davinroy. Fuente: Davinroy R. D., 1994.....	24
Figura 2.10 Curva de relación de descarga modelo-prototipo, aplicada al micromodelo estudiado en la tesis de Davinroy. Fuente: Davinroy R. D., 1994	25
Figura 2.11 Sistema deslizante del micrómetro digital para medición de profundidades. Fuente: Davinroy R. D., 1994.....	27
Figura 2.12 Prueba base o de replicación comparada con una alternativa de diseño, del micromodelo Vancill Towhead. Fuente: USACE, 2012	30
Figura 2.13 Micromodelos de mayores longitudes. Fuente: Visita técnica de González-Verdugo y Espinoza-Ayala en el 2014 a las instalaciones del USACE en el Distrito de San Luis.....	35
Figura 2.14 Canal hidráulico de un micromodelo. Fuente: Gaines y Maynard, 2001.....	37
Figura 2.15 Materiales empleados comúnmente para representar las fronteras del micromodelo. Fuente: Davinroy et al., 2011.....	37



Figura 2.16 Estructura de protección en modelos de ríos: a) Diques de lámina metálica en el modelo de fondo móvil convencional St. Louis Harbor y b) Espigones de malla de alambre galvanizado en un micromodelo. Fuente: Davinroy et al., 2011	39
Figura 2.17 Números de malla para algunos tamaños comerciales de Urea tipo II. Fuente: https://compomat.com/	40
Figura 2.18 Varillas para configurar el fondo de manera predeterminada en un modelo hidráulico convencional del río Carrizal. Fuente: Ortiz, 2005.....	40
Figura 3.1 Zona de estudio analizada en el proyecto: “Estudio de la evolución del comportamiento morfológico de las bifurcaciones en ríos”. Fuente: IMTA, 2016	46
Figura 3.2 Gráfica de variación y tendencia de superficie de agua e islas dentro del cauce. Fuente: IMTA, 2016	49
Figura 3.3 Mapa de ubicación de la zona de estudio	51
Figura 3.4 Mapa del micromodelo de la bifurcación del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal.....	54
Figura 3.5 Mapa impreso de la zona de estudio.....	54
Figura 3.6 a) Trazo de las fronteras del río en la placa de poliestireno y b) Corte de la placa de poliestireno para dar forma a la cubeta del río.....	55
Figura 3.7 a) Placa de poliestireno cortada a lo ancho para ajustarla a la caja de poliestireno y b) Placa de poliestireno sobrepuesta en la mesa de modelación	55
Figura 3.8 a) Recipiente de acrílico para una de las salidas del modelo, b) Colocación de recipiente de acrílico a la entrada del modelo, c) Instalación de reducción excéntrica de PVC, d) Salida del modelo concluida en la parte del río Carrizal, e) Entrada de flujo al modelo y f) Trampa de sedimento para una de las salidas del modelo	56
Figura 3.9 Gráfica del perfil longitudinal y las pendientes medias del cauce Mezcalapa-Carrizal	60
Figura 3.10 Gráfica del perfil longitudinal y las pendientes medias del cauce Mezcalapa-Samaria	61
Figura 4.1 Mesa de micromodelación.....	66
Figura 4.2 a) Tanque o depósito de alimentación hidráulica y b) Bomba sumergible	66
Figura 4.3 a) Gatos eléctricos y b) Controladores de los gatos eléctricos	67
Figura 4.4 Urea granular tipo II: a) A granel y b) Dentro del modelo.....	67



Figura 4.5 Sistema de medición de flujo: a) Sensor de flujo electromagnético EX800-Series, b) Indicador de flujo FT430, c) <i>Data logger</i> DL76 y d) Pantalla principal de FlowInspector®. Fuente: https://www.seametrics.com/	69
Figura 4.6 Sistema de medición láser tridimensional: a) Escáner láser 3D con brazo de medición portátil y b) Pantalla principal de Polyworks®. Fuente: https://www.hexagonmi.com/es-ES.....	70
Figura 4.7 Cambio de configuración en planta para la Serie 3: a) Isla removida; b) Margen e islas resultantes	77
Figura 4.8 Cambio de configuración en planta para la Serie 4: a) Modificaciones al margen; b) Margen e islas resultantes	78
Figura 4.9 Trabajos experimentales: a) Introducción de sedimento, b) Montaje del brazo láser, c) Levantamiento topobatimétrico con el escáner láser y d) Proceso de datos recabados. Fuente: Maestro Omar Fonseca Moreno.....	80
Figura 4.10 Secciones transversales a evaluar	81
Figura 5.1 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en la bifurcación.....	90
Figura 5.2 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en la bifurcación	91
Figura 5.3 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en el río Mezcalapa	91
Figura 5.4 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en el río Mezcalapa.....	92
Figura 5.5 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.12_P1, en el río Carrizal.....	92
Figura 5.6 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.12_P1, en el río Carrizal	93
Figura 5.7 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.14_P1, en el río Samaria	93
Figura 5.8 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.14_P1, en el río Samaria	94



Figura 5.9 a) Sección transversal con menor correspondencia en el tramo del río Samaria de la prueba S2_Q0.14_P1 y b) Sección transversal con mayor correspondencia en el tramo del río Samaria de la prueba S2_Q0.14_P1.....	95
---	----

Índice de tablas

Tabla 3.1 Cuantificación del área del espejo de agua y de las islas dentro del cauce de la zona de estudio entre el periodo de 1975 y 2016. Fuente: IMTA, 2016.....	48
Tabla 3.2 Rango en que se encuentra la escala de longitud vertical del micromodelo y su respectiva distorsión.....	53
Tabla 3.3 Valores para el cálculo de la pendiente media por el método a)	58
Tabla 3.4 Valores para el cálculo de H_I	59
Tabla 3.5 Valores para el cálculo de la pendiente media por el método b)	59
Tabla 3.6 Selección de la Función de Distribución de Probabilidad Teórica que mejor se ajusta a los gastos máximos anuales registrados.....	63
Tabla 3.7 Gasto formativo del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal para distintos periodos de retorno	64
Tabla 4.1 Distribución del tamaño de partículas 12-16. Fuente: Elaborado a partir de la especificación militar estadounidense MIL-P-858981A	68
Tabla 4.2 Escalas para modelos fluviales. Fuente: CFE, 1983.....	72
Tabla 4.3 Pendientes en el micromodelo	74
Tabla 4.4 Gastos en el micromodelo de acuerdo con distintos valores de gasto formativo y con sus respectivas escalas de gasto	75
Tabla 4.5 Series de pruebas experimentales en el micromodelo	78
Tabla 5.1 Código identificador de las pruebas.....	82
Tabla 5.2 MAPE en la bifurcación para la Serie 2	84
Tabla 5.3 MAPE en cada río para la Serie 2.....	84
Tabla 5.4 MAPE en la bifurcación para la Serie 3	85
Tabla 5.5 MAPE en cada río para la Serie 3.....	86
Tabla 5.6 MAPE en la bifurcación para la Serie 4	87
Tabla 5.7 MAPE en cada río para la Serie 4.....	88



Tabla 5.8 MAPE máximo y mínimo de la profundidad máxima de las secciones transversales en cada río..... 89

Tabla 5.9 MAPE máximo y mínimo del área de las secciones transversales en cada río 89

Tabla 5.10 Cuadro comparativo del MAPE del área de las secciones transversales entre algunos casos de estudio del USACE y el mejor resultado obtenido en el presente trabajo de tesis para el tramo del río Samaria..... 96



1 INTRODUCCIÓN

La modelación física en la hidráulica fluvial es una herramienta que permite observar de manera sencilla en un modelo de laboratorio para un determinado caso de estudio, diferentes características hidráulicas que también se manifiestan en su respectivo prototipo tales como gastos, velocidades, patrones de flujo; así también permite apreciar el transporte de sedimentos y cambios en la morfología de un cauce, si es que se trata de un modelo de fondo móvil. Este tipo de modelo generalmente es distorsionado (es decir que su escala de longitud horizontal es distinta a su escala de longitud vertical), debido a que los ríos por lo regular cuentan con grandes longitudes horizontales respecto a el valor que tienen sus tirantes. Los modelos fluviales de fondo móvil facilitan la comprensión de fenómenos relacionados al transporte de sedimentos, permitiendo la óptima solución ingenieril de problemas que, a raíz de la erosión o la deposición del material transportado por el flujo, pudieran presentarse en los ríos, sin embargo, consumen una gran cantidad de recursos humanos, materiales y económicos, lo que puede provocar que se prescindiera de su utilización.

Como una alternativa para el análisis de la erosión y la deposición de sedimentos en ríos, Robert D. Davinroy desarrolló en 1994 una tecnología a la que denominó “micromodelo”, y a la que posteriormente se le rebautizaría como modelación de Respuesta Hidráulica de Sedimento (HSR). El micromodelo fluvial de fondo móvil surgió dentro de las oficinas del USACE en el distrito de San Luis, Missouri, debido a la necesidad de optimizar recursos, puesto que esta institución había recibido un recorte presupuestal por parte de su gobierno que le impedía seguir solventando los gastos que implica la modelación de fondo móvil convencional (Espinoza-Ayala & González-Verdugo, 2014).

La utilidad principal que el USACE ha dado a los estudios de micromodelos, es para detectar zonas de erosión y sedimentación dentro de los cauces de ríos utilizados para la navegación en Estados Unidos, y con ello implementar medidas que permitan mantener en óptimas condiciones a sus vías fluviales de comunicación. El estudio en micromodelo consiste en replicar una topobatimetría conocida del prototipo en este, para posteriormente predecir las tendencias topobatimétricas que pudieran resultar de probar diversas obras de protección fluvial y posteriormente evaluar cuál de las alternativas ensayadas en el micromodelo es la que contribuye



a mejorar las condiciones de navegación para las embarcaciones. Cabe mencionar que en el presente trabajo de tesis, solo se realizó la actividad de replicar una tendencia topobatimétrica de prototipo conocida.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los modelos físicos de ríos o modelos fluviales, en sus procesos de diseño, construcción y operación demandan una gran cantidad de recursos económicos, humanos, tecnológicos y logísticos, debido a las grandes dimensiones que comúnmente los caracterizan. La cantidad de insumos que se requieren para llevar a cabo actividades de modelación física hidráulica puede provocar que se prescindiera de su utilización, sobre todo en trabajos que involucran la implementación de obras de protección marginal en cauces, en los que generalmente no se contempla un estudio de transporte de sedimentos en modelo de fondo móvil, debido a la pequeña o mediana magnitud de los proyectos de este tipo que se realizan en nuestro país; contrario a lo que sucede en el proyecto de estructuras hidráulicas de presas, para las que si se efectúan estudios en modelos físicos a escala reducida por las altas inversiones que en estos se hacen.

Actualmente, el desarrollo de la computación ha permitido contar con equipos que permiten efectuar simulaciones en modelos numéricos que pueden proporcionar resultados con un alto grado de confiabilidad, incluso se han desarrollado softwares de uso libre que hacen posible renunciar al pago de costosas licencias de otros programas existentes en el mercado. Sin embargo, las altas especificaciones que necesitan los softwares de modelación implican la adquisición de equipos computacionales de precios considerables, además de que el grado de confianza de sus resultados depende fuertemente de la calidad de los datos disponibles de campo que se introducen en el modelo, agregando que los modelos numéricos plantean soluciones casi siempre idealizadas que propician simplificaciones importantes (Vergara Sánchez, 1993). Aun y con esos inconvenientes que presentan los modelos numéricos, bajo condiciones simplificadas de un problema complejo como la erosión y sedimentación en ríos, resulta más económico buscar soluciones por medio de este tipo de modelación, que realizar y/o complementar el mismo caso de estudio con un modelo físico de fondo móvil convencional.



1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente no existe en México, una metodología experimental que represente un modelo físico de fondo móvil que sea capaz de economizar recursos en el estudio de la sedimentación y erosión provocada por la hidrodinámica del flujo dentro de un cauce. Por lo anterior, se hace preciso implementar el uso de micromodelos físicos de fondo móvil para el análisis del transporte de sedimentos en ríos mexicanos y evaluar su efectividad, observando si se obtienen buenos resultados como en el caso de los estudios efectuados por el USACE. De obtenerse resultados aceptables, podría contarse con una herramienta que en complemento con un modelo numérico, permita reducir la incertidumbre en los resultados de casos de estudio que se aborden con ambos tipos de modelo. Si es que la evaluación de la aplicación del micromodelo al caso de una bifurcación resulta desfavorable, deberán dejarse muy en claro las razones por las que este tipo de metodología puede no ser muy conveniente en su empleo para este caso de estudio, aportando con ello un nuevo conocimiento al área de la modelación hidráulica a escala reducida.

Otro aspecto que justifica la presente investigación se refiere a la importancia que tienen los ríos para satisfacer las necesidades de la sociedad en cuestiones agropecuarias, comerciales, de consumo humano, como vías de comunicación y hasta para generación de energía, solo por mencionar algunas. Por lo que se hace indispensable contar con herramientas para el estudio de estos cuerpos de agua, que faciliten el proyecto de obras ingenieriles para la conservación de los cauces, pensando en beneficio de la población, así como del medio ambiente.

La elección de la zona de estudio se basó en la importancia que el sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal tiene en su entorno, pues es un tramo que en el pasado ha sido objeto de diversos proyectos para la construcción de obras de protección que mantengan un funcionamiento hidráulico que evite problemas a la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco, ubicada aguas abajo de la bifurcación.

1.3 OBJETIVOS

Evaluar la capacidad de un micromodelo físico de fondo móvil para reproducir las tendencias topobatimétricas que el río Mezcalapa-Samaria-Carrizal presentaba en el año de 1997.



1.3.1 Objetivos específicos

Del objetivo principal de esta investigación, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Investigar los criterios para el diseño de un micromodelo fluvial de fondo móvil empleados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.
- Diseñar el micromodelo que represente al río Mezcalapa-Samaria-Carrizal.
- Dirigir la construcción del micromodelo.
- Calcular las variables y parámetros de prototipo que serán introducidos en el micromodelo durante la experimentación.
- Realizar una metodología para llevar a cabo las pruebas.
- Programar las series de pruebas experimentales.
- Llevar a cabo los ensayos que componen a las series experimentales.
- Realizar los levantamientos topobatimétricos de cada una de las pruebas.
- Evaluar y mostrar los resultados de las pruebas experimentales, e indicar cual de dichos ensayos tuvo una mejor correspondencia con la topobatimetría observada en prototipo.

1.4 HIPÓTESIS

El micromodelo fluvial de fondo móvil puede reproducir satisfactoriamente las tendencias topobatimétricas conocidas en la bifurcación del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal y transformarse en una herramienta eficaz, rápida y economizadora de recursos para el estudio de erosión y deposición de sedimentos en cauces.

1.5 ANTECEDENTES

La modelación física a escala reducida en el área de la hidráulica es una herramienta utilizada y difundida alrededor del mundo para la solución de diversos problemas en donde interesa estudiar las propiedades del flujo para el diseño y/o la corrección de obras hidráulicas que puedan traer consigo beneficios a la población. En cuanto a la historia de dichos modelos, Echávez (1996) señala que, aunque en la antigüedad se hayan realizado reproducciones a escala de distintas estructuras, éstas no pasaban de ser maquetas debido a la falta de leyes de similitud.

Saber exactamente quien fue el primero en darse cuenta de la utilidad de un modelo hidráulico no está claro, aunque se dice que en la América Precolombina se han encontrado



vestigios arqueológicos de canales tallados en roca que pudieron haber funcionado como pequeños modelos a escala de complejas redes de canales de irrigación, tal como la Piedra Sayhuite en Perú (Ver Figura 1.1), la cual al tener una posición inclinada y debido a sus pequeñas dimensiones podría ser uno de los primeros modelos en la historia distorsionados en su pendiente, o sea distorsionado geoméricamente (ASCE, 2000).



Figura 1.1 Piedra Sayhuite o Saywite. Fuente: <https://hidraulicainca.com/>

Davinroy (1994) indica, que la idea de utilizar modelos para analizar problemas en la hidráulica data del siglo XVII cuando en 1686 Sir Isaac Newton, quien hizo la observación de que las partículas de sistemas similares continuaban su movimiento entre sí de forma parecida y en tiempos proporcionales. Mientras Rouse (1983) señala que fue el ingeniero inglés John Smeaton el primero en conducir pruebas en modelos hidráulicos a escala, el cual describió dichos experimentos en su premiado artículo "An experimental Inquiry concerning the Natural Powers of Water and Wind to turn Mills, and other Machines, depending on a Circular Motion" en el año de 1759. También Novak, Guinot, Jeffrey, & Reeve (2010) hacen referencia a los primeros modelos hidráulicos y mencionan que uno de los primeros en utilizarlos fue Osborne Reynolds, que en 1885 diseñó y operó un modelo de mareas del Alto Mersey en la Universidad de Manchester.

Un ingeniero notable anterior a Reynolds fue Du Buat, quien confiaba en los experimentos a modelo reducido, siempre y cuando existiera semejanza geométrica. Este notable ingeniero francés realizó pruebas de modelos a escala para analizar la presión que ejerce el agua sobre cuerpos sumergidos, patrocinado por el entonces ministro de la guerra del rey Luis XVI, debido a que el problema de la resistencia al flujo de dichos cuerpos va estrechamente ligado a la velocidad de los barcos (Levi, 2001). Du Buat también llevo a cabo experimentos para investigar los patrones de flujo alrededor de las pilas de los muelles, así como para determinar las velocidades de flujo necesarias para el transporte de sedimentos en lechos aluviales (ASCE, 2000). Tiempo más tarde,



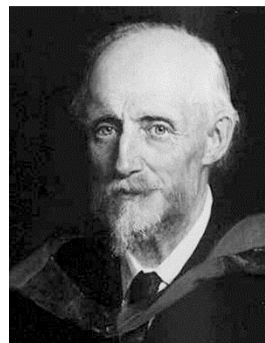
en la segunda mitad del siglo XIX, el destacado ingeniero William Froude junto a su hijo Robert Edmund, también realizaron experimentos para encontrar la resistencia del agua al avance de las embarcaciones (Echávez, 1996).

En cuanto a los problemas relacionados con los ríos aluviales, estos fueron unos de los primeros en ser investigados por medio de modelos hidráulicos. Se menciona que fue Louis Fargue en el año de 1875, quien llevo a cabo uno de los primeros estudios de flujo relacionado con el comportamiento del lecho aluvial del río Garonne en la ciudad francesa de Burdeos, realizando un modelo de fondo móvil para obtener información acerca del transporte de sedimentos (ASCE, 2000).

Una vez asentados los principios de la modelación en hidráulica, alcanzados gracias al desarrollo de los parámetros adimensionales (por ejemplo, los números de Froude y de Reynolds, respectivamente), al análisis dimensional y al establecimiento de las condiciones de semejanza (geométrica, dinámica y cinemática); fue posible que se establecieran formalmente los primeros laboratorios hidráulicos en el mundo, principalmente en Europa y después en los Estados Unidos de América. Los laboratorios hidráulicos como se conocen actualmente aparecieron rápidamente en Europa y Estados Unidos entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX, es así que, en el año de 1898, Hurbert Engels estableció el primer Laboratorio de Hidráulica de Ríos en Dresden, Alemania (Novak et al., 2010). Aunque en el libro *Hydraulic Modeling-Concepts and Practice* de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 2000) se indica que el primer laboratorio formal de hidráulica apareció en los Estados Unidos en Lowell, Massachusetts en 1841, con el propósito de desarrollar turbinas y vertedores para presas.



a)



b)

Figura 1.2 a) William Froude y b) Osborne Reynolds, dos de los principales desarrolladores de la modelación hidráulica.
Fuente: Echávez, 1996



A principios del siglo XX, el número de laboratorios hidráulicos fue aumentando de forma gradual y no fue hasta después de la década de 1920 que la cantidad de estos creció de forma acelerada. Fue a partir del año 1900 que surge el llamado auge del laboratorio hidráulico alemán, donde se establecieron diez laboratorios importantes hasta antes de iniciarse la Primera Guerra Mundial, entre los cuales destacaron el Laboratorio Hidráulico Fluvial de la Universidad Técnica de Brunswick y el Laboratorio Hidráulico de la Universidad de Dresden. En estos dos laboratorios se llevaron a cabo bastantes experimentos relacionados al estudio de los ríos, y tales establecieron un precedente para la modelación física de ríos en el mundo. Cabe mencionar que los primeros modelos alemanes tenían un rango de escala de longitud horizontal comprendido entre 1:10 y 1:200, donde los medios de prueba eran el agua y arena pómez con una gravedad específica de 1.7 (Davinroy R. D., 1994).

Excepto por Benjamín Franklin que experimentó con modelos de barcos a escala reducida en la década de los sesenta del siglo XVII, los grandes avances realizados en la hidráulica hasta aproximadamente finales del siglo XIX habían sido hechos en Europa. Los hidráulicos estadounidenses por su parte, gradualmente se daban cuenta de los descubrimientos realizados por ingleses, franceses y alemanes, por lo que llegaron a emplear las fórmulas y coeficientes de los europeos para reproducir y extender los experimentos de estos, y no fue sino hasta principios del siglo pasado cuando en Estados Unidos se comenzaron a efectuar contribuciones importantes en el área de la hidráulica (Rouse, 1983).

El crecimiento de los norteamericanos en el campo de la hidráulica se debió principalmente al ingeniero estadounidense John R. Freeman, quien a raíz de su visita a los laboratorios hidráulicos en Europa estimuló becas para que jóvenes ingenieros estadounidenses realizaran largas estancias en los laboratorios europeos y entre los últimos años de la década de 1920 y 1960, académicos de Freeman fueron constantemente a Alemania para conocer los aspectos de la práctica de laboratorio y de modelado (ASCE, 2000). Freeman también estimuló la fundación de dos laboratorios hidráulicos federales (Rouse, 1983), entre los que se encuentra la Waterways Experiment Station, cuya construcción inicio en Vicksburg, Misisipi en 1930 (Davinroy R. D., 1994). Durante la década de 1930 el número de laboratorios hidráulicos en Estados Unidos creció sustancialmente.

Los ingenieros estadounidenses se dieron cuenta de que no todos los criterios implementados por los laboratorios europeos aplicaban siempre para resolver los problemas



norteamericanos, por lo que estos tuvieron la necesidad de abordar sus casos de estudio de una manera diferente a la convencional. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es un modelo que representaba más o menos 100 millas del río Misisipi, utilizado para determinar perfiles de inundación, cuya escala de longitud horizontal era igual a 1:2,400 y poseía una distorsión de 20; pese a que en Europa se recomendaba que las escalas de longitud no fueran mayores de 1:300 ni que hubiera distorsiones exageradamente grandes pues en caso de no atender estas sugerencias los resultados de un modelo serían poco fiables, sin embargo los ingenieros hidráulicos en Estados Unidos creían que las profundidades podían determinarse de manera más precisa utilizando escalas de distorsión más grandes, por lo que continuaron con la construcción de dicho modelo, terminándolo en el año de 1935 (Davinroy R. D., 1994).

Uno de los aportes realizados por la ingeniería hidráulica norteamericana fue la sistematización y el orden en la experimentación, así como el aventurarse al apoyo y al desarrollo de proyectos de modelos hidráulicos a escala reducida poco convencionales. Un ejemplo de ello es un modelo hidráulico al que los mismos estadounidenses denominaron como “Mega-modelo” construido en 1946, el cual reprodujo los 20,833,300 km² de la cuenca del río Misisipi en un área de aproximadamente 3.3 km², con escala de longitud horizontal 1:2,000 y escala de longitud vertical 1:100, cuyo objetivo fue coordinar la operación de embalses y estructuras de control de inundaciones en el cauce principal del Misisipi así como en sus afluentes (ASCE, 2000).

Una de las más recientes contribuciones hechas por los hidráulicos en Estados Unidos es el desarrollo de micromodelos para el análisis de ríos, implementada por Robert D. Davinroy en 1994, dentro de las instalaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés) en el Distrito de San Luis, Missouri. Esta tecnología surge debido a las restricciones de fondos impuestas al USACE por parte de su gobierno (Espinoza-Ayala & González-Verdugo, 2014), lo cual obligó a los ingenieros de esta entidad a prescindir del uso de modelos hidráulicos de fondo móvil convencionales y a realizar experimentos en modelos de menores dimensiones, por la mayor cantidad de recursos que los modelos convencionales requieren. Es acerca de esta tecnología relativamente nueva, sobre la que se expondrá más ampliamente en los próximos capítulos del presente trabajo de tesis.



2 ESTADO DEL ARTE

2.1 DEFINICIÓN

Fue a inicios de la década de 1990 cuando el Dr. Gabriel Echávez propuso la utilización de modelos hidráulicos a escalas extremadamente reducidas para realizar estudios de socavación en vertedores, nombrando y clasificando como minimodelos a aquellos modelos cuya escala de longitud horizontal se encuentra entre 1:500 y 1:1,000, mientras que designó como micromodelos a aquellos cuya escala de longitud horizontal fuera entre 1:1,000 y 1:20,000 (Avila-Galindo, 2011). Según Echavéz y Ruiz (2013) el primer tipo se puede utilizar para modelar problemas locales o semilocales y el segundo para reproducir largos tramos de ríos. La utilidad que indica el doctor Gabriel Echávez refiriéndose a los micromodelos, la hace basado en el seguimiento que dió a las investigaciones que realizan los ingenieros del USACE desde 1994 sobre la tecnología desarrollada por Robert D. Davinroy. Por su parte Mustafa, Cox, Davinroy, Krischel, y Nguyen (2017) mencionan que la tecnología de micromodelación desarrollada en Estados Unidos se refiere a modelos con escalas de longitud horizontal mayores que 1:3,600 y que dicha definición solo aplica a los pequeños modelos fluviales de fondo móvil.

Algunos ingenieros estadounidenses que han investigado, trabajado y/o criticado la tecnología de micromodelación sobre la que se ha estado haciendo referencia, también han aportado definiciones sobre el micromodelo con base en sus experiencias, incluido el mismo Davinroy. El impulsor de esta tecnología afirma que el micromodelado es una nueva herramienta y metodología de ingeniería aplicada que utiliza un modelo físico a pequeña escala para simular las condiciones del sedimento en ríos y arroyos (Davinroy R. D., 1999). En su definición Gaines y Maynord (2001) indican que los micromodelos son modelos hidráulicos extremadamente pequeños que se han utilizado para abordar cuestiones de formaciones fluviales. Gordon y Davinroy en 2001 escribieron que el micromodelo es un modelo físico hidráulico de transporte de sedimentos a escala extremadamente pequeña de un río o arroyo, agregando que es una tecnología hidráulica de ingeniería fluvial rentable, utilizada con el fin de resolver algunos de los principales problemas de sedimentación que asedian a ríos y arroyos. Por su parte, Ettema y Muste (2002) proporcionan una definición más orientada a la aplicación práctica de la micromodelación, la cual dice que los micromodelos son modelos hidráulicos de mesa que están siendo ampliamente usados



(por el USACE en su Distrito de San Luis) para determinar probables ajustes en canales aluviales y estabilizarlos con el propósito de facilitar su uso para la navegación. Maynard (2006) define al micromodelo como un modelo físico de río extremadamente pequeño que tiene un lecho móvil y una descarga variable.



Figura 2.1 Micromodelo de un tramo del río Misisipi. Fuente: Davinroy R. D., 1994

La micromodelación se desarrolló con base en años de observación y análisis de información del río Misisipi, incluidos: estudios hidrográficos, datos de velocidad, fotos de hielo, dragado de canales y batimetría; así como gracias al meticuloso estudio de los grandes modelos físicos de fondo móvil utilizados en Europa, Canadá y Estados Unidos (Davinroy R. D., 1999). Los micromodelos resultan de años de experimentación y observación de los grandes modelos físicos de fondo móvil desarrollados por la Estación Experimental de Vías Fluviales (Waterways Experiment Station en inglés) del USACE, y actualmente el uso de los micromodelos ha reemplazado la utilización de los grandes modelos físicos de fondo móvil por parte del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (Davinroy et al., 2011).



a)



b)

Figura 2.2 a) Modelo convencional de fondo móvil Dogtooth Bend, escala horizontal 1:400, escala vertical 1:100; y b) Micromodelo Atchafalaya River, escala horizontal 1:7200, escala vertical 1:1200. Fuente: Davinroy et al., 2011

La tecnología del micromodelo concebida por Davinroy se patentaría con el número 5,653,592, ante el gobierno de los Estados Unidos de América en el año de 1997. Posteriormente



se rebautizaría al micromodelo con el nombre de modelo *Hydraulic Sediment Response* (HSR), que en español se traduce como Respuesta Hidráulica de Sedimentos (Davinroy et al., 2011), sin embargo, en el presente trabajo de tesis se le seguirá nombrando “micromodelo”. Hasta el año 2017, el distrito de San Luis del USACE ha realizado más de setenta proyectos de ingeniería utilizando al micromodelo como una herramienta para evaluar la sedimentación en ríos y la socavación en las estructuras de protección fluvial dentro de los cauces (Mustafa et al., 2017).

2.2 CLASIFICACIÓN O TIPO DE MODELO

Con el propósito de identificar al micromodelo dentro de algunas de las clasificaciones encontradas en la literatura acerca de la modelación hidráulica, se eligió exponer en el presente documento la descrita en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (1983) y la de Graf (1984). La primera clasificación abarca de manera general a los modelos hidráulicos a escala reducida, mientras que la segunda puntualiza sobre los modelos hidráulicos de fondo móvil. Otra clasificación que se explicará, independientemente del tipo de modelo hidráulico, es la que agrupa a las corrientes de acuerdo con el número de grados de libertad de los parámetros que pueden ajustarse libremente en estas. A continuación, se presentan dichas clasificaciones, así como se hace mención de acuerdo con sus respectivos criterios, dentro de la cual se encuentra el micromodelo.

2.2.1 Clasificación de modelos hidráulicos según el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE)

Según la Comisión Federal de Electricidad (1983) en la sección denominada *Hidrotecnia* de su manual, los modelos hidraulicos se pueden clasificar tomando en cuenta:

- a) El fluido utilizado: Donde los más empleados son el agua y el aire, por lo que los modelos se pueden clasificar como modelos *hidráulicos* y *eólicos*, respectivamente. Para el estudio de obras y maquinaria hidráulica, así como de procesos fluviales y marítimos se utilizan principalmente los modelos *hidráulicos*.
- b) La condición de similitud escogida para seleccionar las escalas: Se pueden clasificar como de *Froude* o de *Reynolds*, a aquellos modelos donde se estudian los fluidos en movimiento. En los modelos de *Froude* se estudian fenómenos en los que la acción de la fuerza de gravedad juega el papel más importante, mientras que en los modelos de *Reynolds* se abordan aquellos en que la fuerza de viscosidad produce los únicos efectos de interés.



- c) Los valores de escalas de longitud según tres ejes coordenados: Pueden ser modelos *distorsionados* o *no distorsionados*. Los modelos son *no distorsionados* cuando la escala de longitud es igual en cualquier dirección, existiendo solo una escala de longitud entre el modelo y el prototipo. Un modelo es *distorsionado* si la escala de longitud en una dirección es diferente a las otras dos, o cuando las tres escalas de longitud difieren entre sí. Los modelos *distorsionados* más comunes se diseñan con una escala de líneas para longitudes verticales L_{ev} y otra escala de líneas para longitudes horizontales L_{eh} .
- d) El comportamiento del material de que están hechas las fronteras: Dependiendo de cómo reacciona el material de las fronteras cuando actúa la corriente sobre ellas, los modelos se clasifican como de *fondo fijo* o *fondo móvil*. Existen modelos de *fondo fijo* en donde las partículas móviles sirven como trazadores. También hay modelos en donde una parte se representa de *fondo fijo* y otra de *fondo móvil*, tal como puede suceder en obras de excedencia.

Siguiendo las indicaciones del Manual de Diseño Civiles de CFE, para especificar un tipo de modelo tendrán que utilizarse las cuatro clasificaciones indicadas anteriormente. En el caso del micromodelo, de acuerdo con dichas clasificaciones y sus respectivos criterios, se trata de un *Modelo hidráulico de Froude distorsionado con fondo móvil*.

2.2.2 Clasificación de modelos de fondo móvil según Graf

Un modelo hidráulico puede ser científicamente válido, solo si las cantidades medidas en el modelo están relacionadas con sus homólogas en el prototipo, mediante las relaciones de escala que satisfacen los criterios de similitud (Yalin, 1971). Maynard (2006) señala que Graf (1984) se basa en la afirmación de Yalin, para clasificar a los modelos de fondo móvil como *racionales* cuando sus resultados son semicuantitativos y como *empíricos* cuando su producto obtenido es cualitativo. La clasificación de Graf corresponde al grado en que son igualados los parámetros tanto de modelo como de prototipo, para la ecuación que Ettema presenta en 2001, la cual se muestra a continuación:

$$\Pi_A = f_A \left[D \left(\frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho v^2} \right)^{1/3}, \frac{\rho R i}{D(\rho_s - \rho)}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{D}{R}, \frac{B}{R}, \frac{\sigma}{\rho g i R^2} \right] \quad (2.1)$$

Donde



Π_A : La variable dependiente en A puede ser la resistencia al flujo, sinuosidad del thalweg, el transporte de sedimentos o alguna otra variable de los canales aluviales;

D : Tamaño de partícula;

g : Gravedad;

ρ_s : Densidad de partículas;

ρ : Densidad del agua;

ν : Viscosidad cinemática del agua;

R : Radio hidráulico;

i : Pendiente;

B : Ancho del canal;

σ : Tensión superficial.

La ecuación (2.1) presenta los parámetros adimensionales asociados con el flujo de agua y sedimentos en canales que poseen un fondo de partículas no cohesivas, incluidos los modelos de fondo móvil. Las distorsiones de escala surgen cuando los parámetros adimensionales en el lado derecho de la ecuación (2.1) son diferentes entre el modelo y el prototipo. Sin embargo, algunas de esas relaciones adimensionales, bajo ciertas condiciones, no causan efectos significativos si los valores en el modelo y el prototipo no son los mismos, por ejemplo, el término $\frac{\sigma}{\rho g i R^2}$, como se explicará en el siguiente párrafo.

En cuanto a los términos que componen a la ecuación (2.1) en el lado derecho, el primero es un término de densidad de partículas, el cual muestra que, si se utiliza un material de lecho ligero, el tamaño de partícula en el modelo será mayor que en el prototipo. El segundo término es el parámetro de Shields, presente en casi todos los criterios de diseño de fondo móvil y define la cantidad de movimiento del sedimento. El tercer término con frecuencia se ignora porque los efectos de densidad se abordan en el primer y segundo término de la ecuación (2.1). El cuarto término es la rugosidad relativa, que rara vez se iguala en modelos con sus respectivos prototipos cuando estos últimos son de corrientes con fondo arenoso, por lo que a menudo se supone que tiene efectos insignificantes en los resultados del modelo; sin embargo, Maynard (2006) menciona



que Ettema et al. encontraron en una investigación en 1998, que el ignorar la rugosidad relativa ha impactado con efectos de escala significativos en el estudio de la socavación en pilas de puentes. El quinto término es llamado relación de aspecto, que pocas veces puede mantenerse igual en modelos de fondo móvil y prototipos de ríos con fondo arenoso. El último término no será el mismo en el modelo y el prototipo, más las diferencias de los efectos de la tensión superficial entre ambos, cuando el tamaño del modelo es lo suficientemente grande serán insignificantes.

Una vez descritos los términos adimensionales de la ecuación (2.1) sobre los cuales se basa la clasificación de Graf, a continuación se da una explicación de ésta:

- a) Modelos de fondo móvil *racionales*: Según Graf, el desarrollo del método de modelación de fondo móvil *racional* se debe a Einstein y Chien en 1955. Por su parte Yalin en 1965, De Bries y Van Der Zwaard en 1975, también desarrollaron métodos de modelación de fondo móvil *racionales* (Maynard, 2006). El método de modelación *racional* se fundamenta en una adhesión rigurosa a los criterios de semejanza de la ecuación (2.1) y comúnmente requiere de modelos hidráulicos relativamente grandes para su aplicación. Las características de los modelos hidráulicos de tipo *racionales* son: una baja distorsión entre las escalas horizontal y vertical, baja exageración del número de Froude, y la igualdad del parámetro de Shields en modelo y prototipo.
- b) Modelos de fondo móvil *empíricos*: Este tipo de modelos confía menos en los requisitos de similitud, permitiendo una mayor relajación de los parámetros adimensionales de la ecuación (2.1). Pese a que este tipo de modelo es menos riguroso que los modelos de fondo móvil *racionales*, los modelos de fondo móvil *empíricos* limitan la cantidad máxima de distorsión, así como la exageración del número de Froude, lo que implica que en estos modelos se tenga un valor para el parámetro de Shields generalmente menor que el del prototipo, lo cual también da pie a delimitar el tamaño del modelo. Dada la importancia de igualar el parámetro de Shields en el modelo y el prototipo, los modelos de fondo móvil *empíricos* normalmente se limitan a evaluar la respuesta batimétrica del lecho.
- c) *Otros* modelos de fondo móvil: Existen algunos modelos de fondo móvil que no se ajustan a los dos tipos definidos por Graf. Sobre ello Maynard (2006) escribe que Freeman en 1929 discute que los primeros estudios en modelos hidráulicos de Reynolds y Vernon-Harcourt, eran similares a modelos de tipo *empírico*, pero que las velocidades escaladas de acuerdo con la condición de Froude y los niveles del agua simulados en el modelo arrojaron grandes distorsiones en la escala vertical.

Maynard (2006) indica que de las categorías de Graf, el micromodelo se apega más al de tipo *empírico* debido a que no se siguen de cerca las leyes de similitud, aunque el micromodelo se



diferencia significativamente de la mayoría de los modelos de fondo móvil *empíricos*, principalmente en aspectos como: tamaño pequeño, gran distorsión entre escala horizontal y vertical, exagerado número de Froude, falta de correspondencia al escalar los niveles del agua entre modelo y prototipo, forma de calibrar, el material de fondo empleado, entre otros. Debido a tales diferencias descritas, al micromodelo se le ubica en la categoría de *otros*, como resultado de las mayores desviaciones de los criterios de similitud que involucra su operación, al ser comparado con los modelos *empíricos*.

2.2.3 Clasificación de los escurrimientos de acuerdo con sus grados de libertad

Maza y García (1997) indican que las corrientes pueden clasificarse de acuerdo con sus grados de libertad, es decir por el número de parámetros que pueden ajustarse libremente, a través del tiempo, al pasar gastos líquidos y sólidos preestablecidos. En los siguientes párrafos se describe dicha clasificación y en la Figura 2.3 se pretende ilustrarla.

- a) Un grado de libertad: Se presenta en cauces o canales donde al variar el gasto solo se modifica el tirante; mientras el fondo, las paredes y la pendiente no cambian si se cambia el gasto, por ejemplo, un canal revestido. En este escurrimiento se tiene la incógnita del tirante, y solo se requiere una ecuación de resistencia al flujo para obtenerla. En corrientes con un grado de libertad no existe transporte de sedimentos.
- b) Dos grados de libertad: Se manifiesta cuando solo se pueden variar el tirante y la pendiente, por ejemplo, en un canal con paredes rígidas donde el fondo pueda ser arrastrado por el flujo. Por este tipo de corrientes se puede hacer pasar un gasto líquido y un gasto de sedimentos constantes, hasta establecer una pendiente y un tirante que garanticen la continuidad en el transporte de sedimentos a lo largo del tramo. Se requieren dos ecuaciones para obtener las dos variables mencionadas, una para cálculo de resistencia al flujo en canales con fondo móvil y otra de transporte de sedimentos en el fondo.
- c) Tres grados de libertad: Se visualiza en donde además del tirante y la pendiente, también se pueden alterar las márgenes, es decir, cuando se varía el ancho del canal o cauce, debido a que tanto fondo como márgenes se encuentran formados por material susceptible de ser transportado por el flujo. Ya que pueden ajustarse tres variables, se necesitan tres ecuaciones para obtenerlas. El criterio para seleccionar dichas ecuaciones ha sido abordado por diversos autores y puede consultarse en el capítulo 12 del *Manual de Ingeniería de Ríos*, titulado como *Estabilidad de cauces*.
- d) Cuatro grados de libertad: Maza y García (1997) indican que para algunos autores existe un cuarto grado de libertad, cuando los cauces con tres grados de libertad llegan a desarrollar meandros. Los autores que proponen el cuarto grado de libertad no presentan



cuatro ecuaciones que deban resolverse de forma simultánea, sino más bien tratan a la corriente como si tuviera tres grados de libertad y calculan el grado de curvatura del meandro por separado.

De acuerdo con la clasificación anterior, el micromodelo posee dos grados de libertad, ya que con sus márgenes rígidas fabricadas en la placa de poliestireno y el fondo móvil hecho de plástico granular, las dos variables que se pueden modificar al realizar las simulaciones son el tirante y la pendiente.

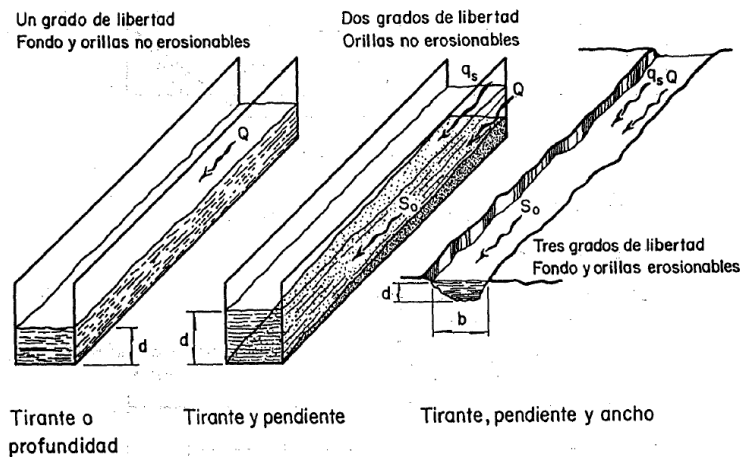


Figura 2.3 Grados de libertad en una corriente. Fuente: Maza y García, 1997

2.3 COMPONENTES DE UN MICROMODELO

La tecnología de micromodelación a pesar de ser relativamente nueva, ha experimentado a través de su corto periodo de años algunos cambios en su configuración y los elementos que le conforman. Dicha evolución parece motivada por el refinamiento de la tecnología de micromodelado, así como por la aparición de nuevos dispositivos de medición y los avances en el campo de la computación.

Con relación a los cambios en los componentes del micromodelo, se identifican tres etapas en su desarrollo que son:

1. Inicio, relatado en el trabajo de tesis de Davinroy (1994) que realizó un estudio en micromodelo sobre un tramo del río Misisipi, en los que destaca la ausencia de dispositivos electrónicos de medición y de control, pues el modelo operaba en su totalidad de forma manual.
2. Consolidación, evidenciada en la patente lograda por Davinroy en 1997 ante el gobierno norteamericano, donde ya se aprecia una configuración formal establecida del



modelo y en la que sobresale el uso de un generador de funciones electrónico por medio del cual se controla el caudal.

3. Nuevas tecnologías, señaladas por diversos autores en estudios de micromodelos más recientes, añadidas al modelo conforme aparecieron equipos computacionales de mayores capacidades, así como cuando les fue posible la adquisición de modernos dispositivos de medición digital.

En las siguientes líneas, se presentan con mayor detalle las partes del sistema que compone al micromodelo, de acuerdo con las etapas de desarrollo señaladas anteriormente, así como la configuración del micromodelo más reciente encontrada en la literatura.

2.3.1 En el inicio

En los inicios de la micromodelación Davinroy (1994) describe a grandes rasgos, que el micromodelo estudiado en su trabajo de tesis constaba de los siguientes accesorios:

- a) Canal artificial: Es una superficie elevada a 4 pies del suelo mediante unos soportes que en conjunto conforman a la mesa de micromodelación. La función del canal es contener a la placa inserta del modelo de río. En la parte inferior de sus soportes tiene unos tornillos para ajustar la pendiente del micromodelo.
- b) Bomba: Centrifuga y sumergible, de 12 voltios con capacidad nominal de 300 gph, alimentada por una fuente de corriente directa.
- c) Control de entrada del flujo: Compuesto por una serie de válvulas de bola a la entrada del micromodelo.
- d) Representación de la sección del río en estudio: Preparada a partir de una placa de geometría rectangular, que contiene una vista en planta a escala del río a modelar, sobre la que se forman las secciones del canal a una profundidad de 3 pulgadas y la cual se inserta sobre la parte superior de la mesa de micromodelación.
- e) Recipiente para la entrada de sedimento: Que se encuentra al extremo superior del canal, para la introducción y almacenamiento de los sedimentos.
- f) Tanque de salida: Recipiente construido de paneles, situado al extremo final de la placa que representa al modelo de río, utilizado para desalojar el flujo y para ajustar la pendiente durante el funcionamiento del micromodelo al elevar o bajar su nivel de referencia.
- g) Depósito de agua y carcasa de la bomba: Que consiste en un recipiente para recoger el sedimento y una carcasa donde se resguarda la bomba, ubicado en el extremo inferior y debajo de la mesa de micromodelación.



2.3.2 En la etapa de consolidación

Es en la patente (United States of America Patente n° 5 653 592, 1997) donde ya afianzada la micromodelación, se profundiza y se esquematizan con mayor detalle los componentes del micromodelo, que a continuación se enlistan y se aprecian con el auxilio de las imágenes a las que se hace referencia en los siguientes párrafos. En esta etapa destaca la implementación de un generador de funciones electrónico para controlar el flujo de manera automática, sobre el que se hablara más adelante en el siguiente punto de este subcapítulo. Cabe señalar que se puede repetir la mención de algún elemento que conforma al micromodelo en dos o más figuras, sin embargo, esto se realiza con el fin de poder mostrar sus componentes en diferentes vistas.

La Figura 2.4 es una vista en planta de un micromodelo, que muestra las siguientes partes:

1. Sección de pruebas.
2. Tanque de llegada.
3. Bomba.
4. Deflectores.
5. Sección de transición de entrada fija.
6. Fondo móvil.
7. Margen u hombro fijo.
8. Sección de transición de salida fija.
9. Trampa de sedimentos.
10. Tanque de salida
11. Conducto de retorno.
12. Depósito de agua drenada.

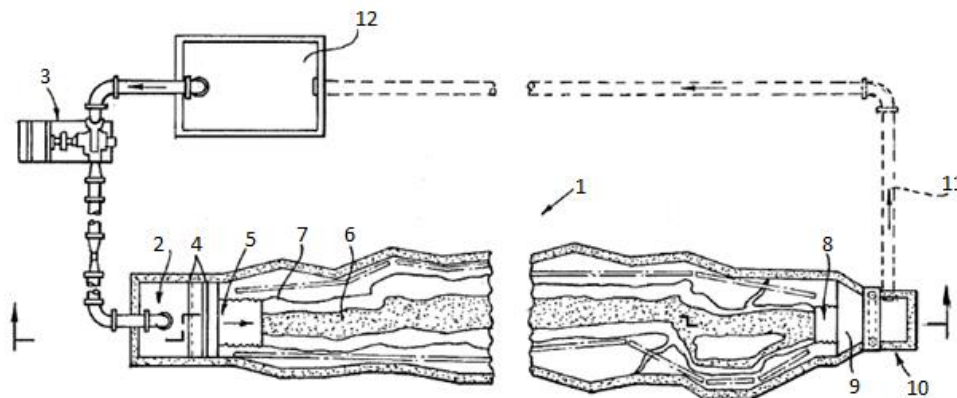


Figura 2.4 Vista en planta de un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997



La vista de una sección transversal típica en un micromodelo se representa en el siguiente esquema, donde se observan los siguientes componentes:

13. Canal artificial.
14. Plantilla hembra.
15. Material de relleno.
16. Canal que simula al río modelado.
17. Material de fondo.
18. Plantillas macho para formar el fondo (No se utilizan en micromodelos más recientes).

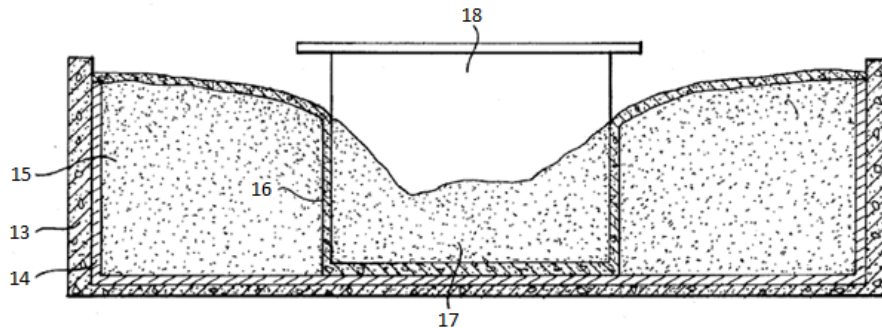


Figura 2.5 Vista de una sección transversal típica en un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997

La Figura 2.6 es una vista en perspectiva, y la Figura 2.7 muestra una vista de sección lateral, las dos imágenes en conjunto permiten apreciar los siguientes elementos:

19. Canal artificial.
20. Par de patas de soporte.
21. Paredes laterales.
22. Pared inferior.
23. Paredes extremas.
24. Placa inserta del modelo.
25. Deflector delantero.
26. Tanque de almacenamiento de sedimentos.
27. Salpicadera.
28. Deflector aguas abajo.
29. Tanque de salida.
30. Depósito de captura de sedimento extraíble.
31. Medidores de nivel.
32. Tubo de agua drenada.
33. Depósito de agua drenada.
34. Bomba sumergible.



- 35. Conducto de retorno.
- 36. Patas de soporte.
- 37. Caudalímetro.
- 38. Válvula de bola.
- 39. Generador de funciones electrónico para controlar el flujo.
- 40. Tornillos o gatos para ajustar la pendiente.
- 41. Representación de la sección del río en estudio.
- 42. Micrómetro digital electrónico.
- 43. Regla deslizante.
- 44. Punta de la sonda del micrómetro.

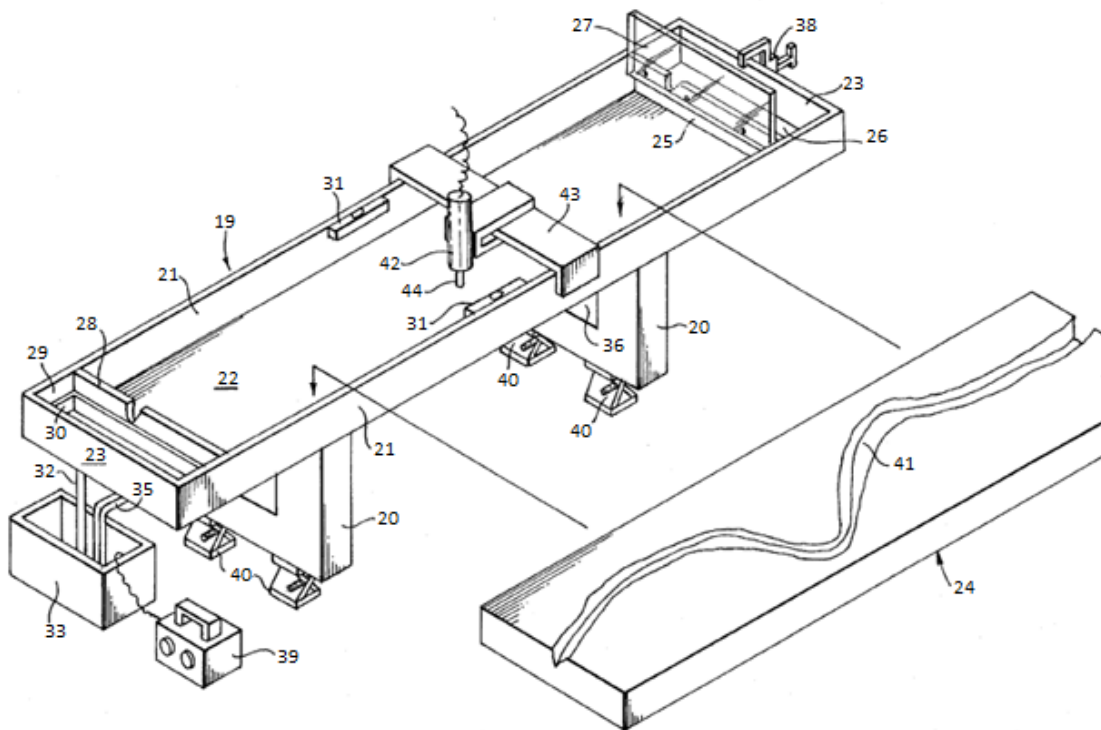


Figura 2.6 Vista en perspectiva de un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997

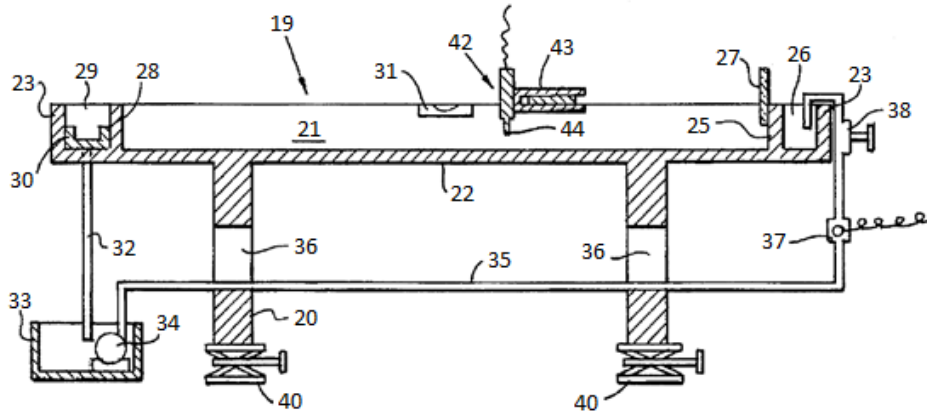


Figura 2.7 Vista lateral de un micromodelo. Fuente: Elaborado a partir de la patente estadounidense # 5 653 592, 1997

2.3.3 Con las nuevas tecnologías

Los factores que favorecieron la evolución del sistema que conforma al micromodelo son principalmente: el refinamiento de su método de operación, el desarrollo de la computación y la aparición de nuevos dispositivos para la medición de los datos obtenidos del modelo.

Respecto a la recolección y procesamiento de datos, otro de los motivos por los cuales el micromodelo empleaba métodos y equipos mecánicos, es porque los precios de los dispositivos de medición de última tecnología eran prohibitivamente altos en ese momento. Desde entonces, los costos bajaron y los desarrolladores del sistema de micromodelado empezaron a considerar la incorporación al modelo de estas nuevas tecnologías que finalmente fueron añadidas (Gordon D., 2000).

En el año 2001, Gordon y Davinroy indican que el micromodelo se integra de cuatro componentes *innovadores*, que son: la placa inserta que representa al río modelado, la mesa que contiene al canal hidráulico, el sistema operativo que controla el flujo de agua y de sedimentos, y el sistema de recolección de datos.

Por su parte Gaines y Maynord (2001) hablan de cinco elementos básicos que componen a un micromodelo: la placa inserta, la mesa-canal, el sistema operativo controlador de flujo, el fondo de sedimento sintético y la malla de acero permeable utilizada para representar espigones o diques; coincidiendo con Gordon y Davinroy en señalar como componentes fundamentales del micromodelo a los tres primeros elementos mencionados en este párrafo.

En lo escrito por Gaines y Maynord así como por Gordon y Davinroy, se observa que muchos componentes concebidos desde la aparición de la micromodelación aún se conservan en



diseños más recientes, que se ha prescindido de aquellos que durante la operación no han aportado resultados favorables, y que además se han añadido dispositivos de última tecnología que facilitan el trabajo del modelado.

En este apartado, solo se identifican el sistema operativo controlador de flujo y el sistema de recolección de datos, como elementos añadidos al micromodelo a raíz del desarrollo de nuevas tecnologías. Es acerca de dichos sistemas sobre los que se hablara a continuación:

- a) El sistema operativo consiste en un hardware y software computacionales de diseño personalizado, que en conjunto dan forma al generador de funciones electrónico. El sistema controla automáticamente el flujo de agua y sedimentos a través del micromodelo, manteniéndolo en equilibrio, es decir, que el aumento y la caída del nivel de agua y de la carga de sedimentos es igual en la entrada y en la salida del modelo en todo momento. Para regular el flujo, el sistema operativo emplea un software que manipula una válvula que controla dicho proceso y que monitorea un caudalímetro electromagnético. El propósito del generador de funciones electrónico es el de mantener el gasto permanente el tiempo que transcurra una prueba, y se configura para introducir los valores de los gastos que componen las pruebas subsecuentes. Cuando de una prueba se obtiene una tendencia topobatimétrica del modelo de río con mayor parecido a la de prototipo, se almacena en la memoria del generador de funciones electrónico el valor del gasto con el que se alcanzaron dichos resultados, para posteriormente introducir ese mismo gasto al micromodelo, ya sea repitiendo los experimentos bajo las mismas condiciones del cauce o probando dentro de este distintas estructuras de protección marginal.
- b) El sistema de recolección de datos incluye a un escáner láser tridimensional que se utiliza para recolectar las curvas de nivel de sedimentos que cambian en el fondo del micromodelo, un Velocímetro Láser *Doppler* (LDV por sus siglas en inglés) que se utiliza para determinar la distribución de la velocidad normalizada en el tramo de río modelado y una cámara de alta definición para visualizar los patrones de flujo en el modelo.

El resto de las partes que aun integran al micromodelo, ya fueron descritas y/o ilustradas en la sección donde se habla de los inicios y consolidación de este, por lo que ya no se agregaran más detalles sobre dichos componentes. En el subcapítulo que aborda la forma de operar del micromodelo, se profundiza sobre el funcionamiento de los dispositivos de medición láser.

2.3.4 Configuración reciente

La forma en planta del micromodelo consiste en un inserto de placa construido con espuma de poliuretano, cuyo cauce es fabricado a partir de fotografías aéreas georreferenciadas. Este



inserto se coloca encima de una mesa de micromodelación que básicamente contiene un depósito de agua, válvulas de control electrónico, bombas, una red de tuberías de carga constante y medidores de flujo, todos interconectados a través de un sistema de control computarizado (Davinroy et al., 2011).

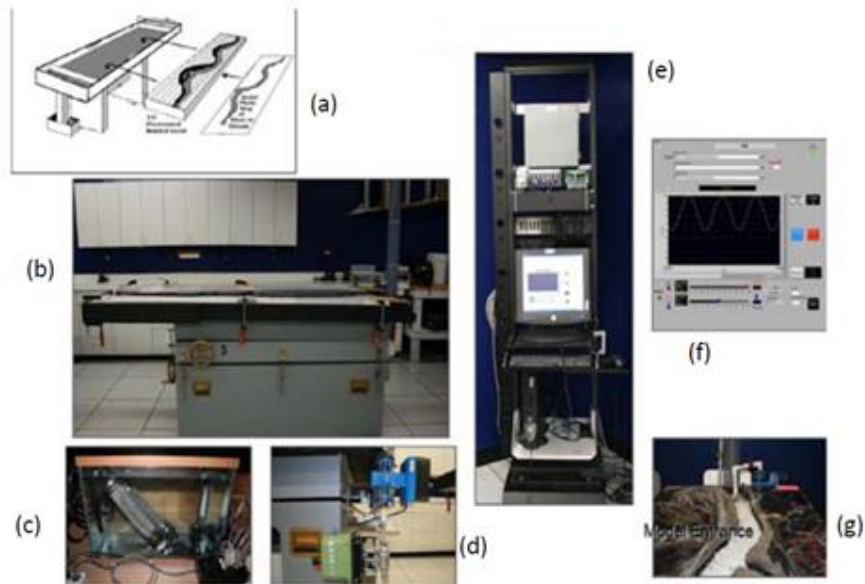


Figura 2.8 Configuración general del micromodelo: a) Placa inserta, b) Canal hidráulico sobre la mesa, c) Bomba y depósito de agua, d) Equipo computacional, f) Interfaz del usuario y g) Modelo inserto y su sedimento. Fuente: Davinroy et al., 2011

2.4 OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN MICROMODELO

El procedimiento de operar un micromodelo ha variado a través de los años, debido principalmente, al perfeccionamiento de la técnica de modelado y a la incorporación de las nuevas tecnologías de medición que han facilitado la recolección de datos. A continuación, se enumeran y se describen los pasos en que se opera un micromodelo con base en la lista descrita en la patente del año 1997, más si hubo algún cambio en la forma de realizar el método de operación se incluyen algunos comentarios de cómo han evolucionado dichas actividades y de cómo se realizan en su forma actual.

2.4.1 Introducción del sedimento

En la patente estadounidense del micromodelo del año 1997 y en la tesis de Davinroy del año 1994, se indica que el sedimento se coloca homogéneamente dentro del tramo modelado de río ubicado en la placa inserta, aproximadamente al 50% de la profundidad total. En micromodelos



más recientes, no se indica claramente a que profundidad se introduce el material sintético que conforma el fondo, solo se menciona que se coloca en una cantidad arbitraria a un plano de nivel aproximado (Davinroy et al., 2011).

2.4.2 Aplicación de las variables y los parámetros operativos

Tales variables y parámetros operativos incluyen la descarga de flujo, el tiempo que dura dicha descarga, la pendiente o inclinación del modelo y la dosificación del sedimento a la entrada del tramo de río modelado (United States of America Patente n° 5 653 592, 1997).

Se relata en la tesis de Davinroy (1994), que la descarga de flujo se simulaba al controlar manualmente la válvula de bola antes de la entrada del modelo. Ya en la patente del micromodelo lograda en 1997, se indica la introducción de un generador electrónico de funciones para controlar las válvulas que determinan la cantidad de descarga de flujo. En un principio, el gasto se dosificaba en el micromodelo ejecutando un hidrograma (Ver Figura 2.9) relacionado a una curva de relación de descarga que varía exponencialmente entre el modelo y el prototipo (Ver Figura 2.10), pero los ingenieros descubrieron que este procedimiento no produjo una respuesta de energía realista o un movimiento de lecho adecuado en el fondo, por lo que ahora el gasto aplicado a los micromodelos se administra de manera constante o permanente (Davinroy et al., 2011).

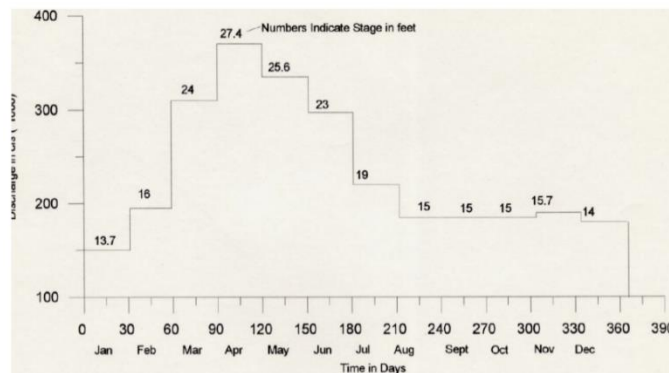


Figura 2.9 Hidrograma anual de promedios mensuales, aplicado al micromodelo estudiado en la tesis de Davinroy.
Fuente: Davinroy R. D., 1994

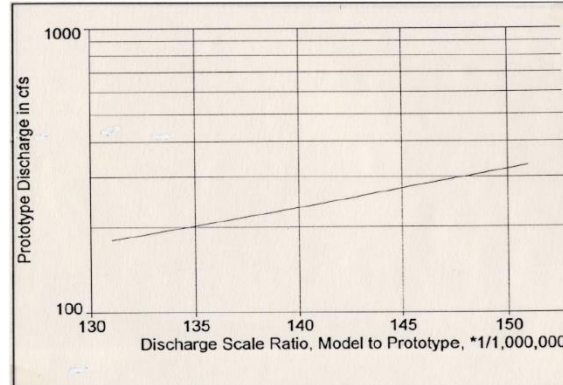


Figura 2.10 Curva de relación de descarga modelo-prototipo, aplicada al micromodelo estudiado en la tesis de Davinroy.
Fuente: Davinroy R. D., 1994

El cronómetro para administrar el tiempo que dura la simulación, fue sustituido por un software que controla el tiempo mediante el ya mencionado generador electrónico de funciones, que también regula el volumen de flujo y de sedimento en el micromodelo.

La pendiente se ajusta al manipular los tornillos ubicados en la base del modelo, así como al elevar o bajar el nivel de referencia del deflector aguas abajo que compone al tanque de salida (Davinroy R. D., 1994). Los tornillos o gatos giratorios para ajustar la pendiente también pueden ubicarse dentro de la cavidad del canal artificial que conforma la parte superior de la mesa de micromodelación, como en uno de los modelos estudiado por Gordon y Davinroy (2001). En los micromodelos observados y/o estudiados por Gaines & Maynard (2001), la pendiente puede ajustarse tanto en dirección longitudinal como transversal.

El sedimento se recircula por medio de una bomba sumergible que se encuentra colocada en una cámara de filtro bajo la mesa de modelación, con el propósito de garantizar que la cantidad de sedimento que ingresa al micromodelo sea igual a la cantidad que sale de este (Gaines & Maynard, 2001). La cantidad de sedimento que se suministra al modelo se realiza mediante el control de un software computacional (Davinroy R. D., 1999). En los primeros micromodelos, se introducía manualmente el sedimento en el extremo superior del tramo de río modelado antes de cada simulación utilizando un vaso medidor calibrado, determinando el volumen de material a prueba y error de manera experimental; tal como se puede leer en el micromodelo del río Misisipi estudiado por Davinroy (1994), que requirió la adición de 10 onzas de sedimento antes de cada prueba.

En el micromodelo, en lugar de seleccionar la escala vertical antes de su construcción, ésta se determina de acuerdo con una escala horizontal preestablecida, de acuerdo con un valor que



genere un movimiento satisfactorio del fondo y que al mismo tiempo permita mediciones que faciliten una conversión directa a los valores del prototipo. El procedimiento para establecer la magnitud de la escala vertical en el micromodelo del Misisipi estudiado por Davinroy (1994), consistió en simular varias descargas en flujo permanente con una duración de diez minutos cada una, y en comparar el fondo del modelo con el del prototipo después de cada ejecución, en cinco secciones de control ubicadas estratégicamente a lo largo del tramo en estudio.

2.4.3 Comparación de la configuración de fondo medida en el modelo con la de prototipo

Para medir la respuesta de fondo en el micromodelo, se utiliza un escáner láser 3-D que recolecta miles de puntos sobre el lecho después de cada simulación. Los datos recabados se procesan, se convierten sus coordenadas a las utilizadas en el prototipo y se utilizan para crear mapas batimétricos de alta resolución. Por último, los mapas batimétricos generados con los datos del modelo se comparan con los levantamientos topo-batimétricos de campo del río en estudio (Davinroy R. D., 1999).

El sistema de recolección de datos batimétricos está compuesto principalmente por un sensor láser, un digitalizador mecánico que se conecta al sensor, una computadora personal y un software mediante el que se extrae, se muestra y se manipula la información (Gordon D. , 2000).

Gordon (2000) indica que la operación del escáner consiste en sostenerlo para disparar un haz de luz láser sobre el fondo del lecho modelado, mientras una pequeña cámara equipada con un CCD (siglas que en español significan Dispositivo de Carga Acoplada) proyecta la superficie tocada por la línea de luz láser. El sensor láser va conectado a un brazo mecánico que puede moverse libremente sobre el fondo del modelo de río, permitiendo al operador ubicar el sensor fácilmente en algún punto, y capturar datos rápidamente con un alto grado de resolución. La información obtenida se combina con la información cartesiana y angular generada en cada posición del digitalizador, y el resultado es una nube densa de datos 3-D que describe la superficie del lecho.

Gordon también señala que cuando se utilizó el micromodelo por primera vez en 1994, las mediciones del fondo se tomaron con un micrómetro digital (Figura 2.11); y que en 1996 se introdujo un digitalizador mecánico para llevar a cabo la misma función. El primero solo permitía recopilar datos de profundidad, por lo que debían de establecerse las coordenadas x y y antes de efectuar las mediciones de profundidad, lo cual resultó ser un proceso bastante lento y algo



impreciso. El segundo redujo el tiempo de medición y aumento la precisión respecto al primer método, más sin embargo no dejó de presentar algunos inconvenientes, como la alta capacitación y habilidad que requerían los operadores, puesto que la manipulación del digitalizador implicaba tocar el fondo modelado y un error podía invalidar los experimentos.

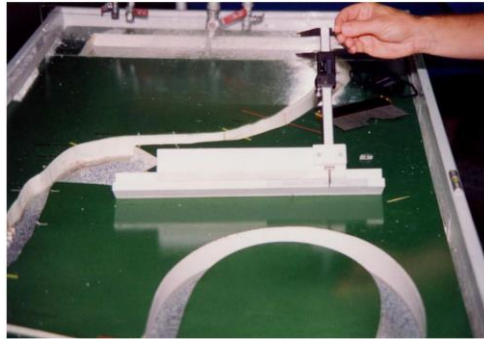


Figura 2.11 Sistema deslizante del micrómetro digital para medición de profundidades. Fuente: Davinroy R. D., 1994

2.4.4 Ajuste de las variables y los parámetros operativos

Davinroy (1994) indica que la calibración en el micromodelo combina procesos de modelación de fondo móvil convencional con nuevos métodos propuestos. Tal proceso implica ajustes en el flujo, la pendiente, las condiciones de entrada al modelo, la escala vertical, el volumen de sedimentos y las condiciones de frontera fijas (Davinroy et al., 2011).

Es importante hacer notar, que se utilizan varias escalas verticales para realizar la conversión de la batimetría del modelo en números del prototipo a lo largo del proceso de calibración, con el fin de lograr los mejores valores de correspondencia entre la batimetría del modelo y del prototipo (Maynard, 2006). Es decir, que antes de cada simulación se propone un valor de escala vertical asociado a una pendiente y a un gasto de modelo, se realiza la prueba y una vez terminada esta, la topobatimetría medida en el micromodelo se escala a prototipo para evaluar su congruencia, repitiendo dicha acción hasta encontrar una escala vertical que proporcione resultados satisfactorios.

En cuanto a los ajustes a las condiciones de entrada del modelo, se realizan para proporcionar la distribución necesaria del flujo mediante acciones como: la colocación de aletas de guía, el cambio de la rugosidad, así como la añadidura de material no erosionable en las fronteras del río y la agregación de deflectores (Gaines & Maynard, 2001). Davinroy et al. (2011) mencionan que los ajustes en los parámetros de calibración deben garantizar que la superficie libre del agua y el plano de referencia utilizado para recolectar la batimetría del fondo sean paralelos,



por lo que es preciso prestar atención cuando suceda este hecho, pues ayuda a establecer en el micromodelo una respuesta de fondo repetible.

Después de cada simulación de descarga de flujo, la configuración del lecho del modelo resultante es inspeccionada por el escáner láser y se compara con los levantamientos batimétricos del río (Davinroy et al., 2011).

Las variables y parámetros mencionados se refinaron hasta que la respuesta del fondo medida en el micromodelo fue similar a la del prototipo (Gordon & Davinroy, 2001).

Por ejemplo, Davinroy relata para su estudio realizado en 1994 que, una vez elegida la escala vertical, se volvió a llenar el fondo del tramo de río modelado al cincuenta por ciento de la profundidad, y se formó nuevamente la configuración del lecho ejecutando descargas de flujo consecutivas, obteniendo el desarrollo completo del fondo después de cinco corridas. Las secciones transversales resultantes del modelo se compararon con cinco secciones de control del río en estudio y se menciona que, cuando existieron desviaciones evidentes, se volvió a ajustar tanto la pendiente como el gasto, y se repitió este procedimiento.

2.4.5 Desarrollo de la configuración base del fondo

Una vez que la comparación entre el fondo del micromodelo y el del prototipo, produce una configuración satisfactoria, se establece lo que los desarrolladores del micromodelo denominan como “condición de base”. Dicha condición base en el modelo representa a la respuesta de fondo esperada en el prototipo sin modificaciones estructurales añadidas al río. La utilidad de la condición base es servir como parámetro de comparación respecto a futuras pruebas en el modelo (Davinroy R. D., 1994).

La condición de base se obtiene al promediar los resultados medidos en el fondo del micromodelo después de cada simulación, y se le define como una “respuesta promedio de sedimentos esperada” (United States of America Patente n° 5 653 592, 1997).

En el micromodelo estudiado por Davinroy en 1994, se menciona que para desarrollar la condición de base se realizaron siete simulaciones y que con los valores promedio de cada punto medido se creó un mapa de curvas de nivel.



2.4.6 Pruebas para la evaluación de estructuras de protección fluvial

Las pruebas en el micromodelo se realizan después de que se desarrolla la calibración de la “condición de base” (Gaines & Maynard, 2001). La batimetría producida por el micromodelo en la condición base, se utiliza para realizar evaluaciones cualitativas sobre el efecto de posibles alternativas de diseño en el río modelado, tales como la realineación del cauce y la instalación de estructuras adicionales como diques o vertedores submarinos (Davinroy R. D., 1999). Las variaciones observadas en los resultados de la condición base respecto a los resultados de las pruebas de diseño se presumen indicativos de los cambios que ocurrirán en el prototipo (Maynard, 2006).

Las pruebas de cada alternativa de diseño se repiten varias veces, se promedian en una sola respuesta esperada del fondo y después se comparan con la prueba de la condición de base para evaluar los cambios en el lecho (United States of America Patente nº 5 653 592, 1997). Por ejemplo, en el micromodelo de Berwick Bay estudiado por Gordon y Davinroy (2001) se indica, que se probaron once alternativas de diseño; mientras que en el micromodelo denominado Big Creek se señala, que para cada alternativa de diseño probada se realizaron cinco corridas las cuales se promediaron para obtener una sola respuesta del lecho.

Gordon y Davinroy (2001) mencionan que la efectividad de cada diseño probado en el micromodelo se evalúa al comparar la configuración del fondo y los patrones de flujo resultantes con los medidos en la condición de base (Ver Figura 2.12). Después de cada prueba, aparte de medir la batimetría del fondo del micromodelo con el escáner láser, se agregan la medición de la distribución de velocidades normalizadas con un velocímetro láser *Doppler* (LDV) y la observación de patrones de flujo por medio de cámaras de alta definición (Davinroy et al., 2011).

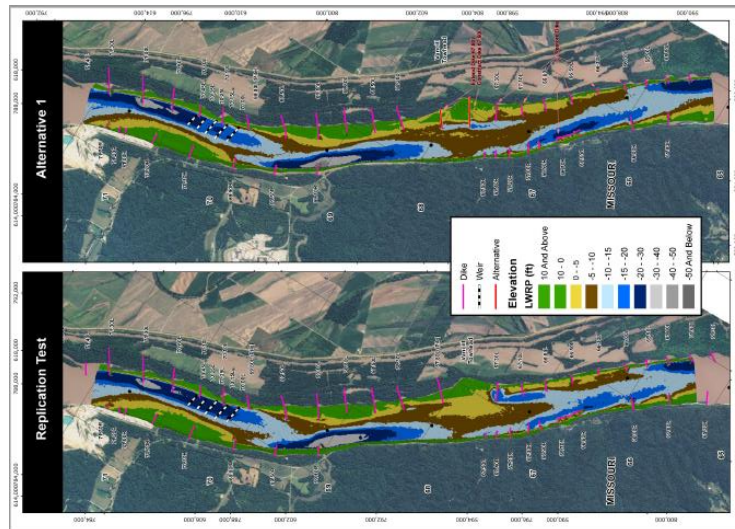


Figura 2.12 Prueba base o de replicación comparada con una alternativa de diseño, del micromodelo Vancill Towhead.
Fuente: USACE, 2012

2.5 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROMODELOS

2.5.1 Teoría de la micromodelación

Davinroy (1994) indica que la teoría del modelado de fondo móvil se basa en la afirmación, realizada por Franco en 1978 que dice: "... en arroyos naturales, el tamaño del lecho no varía en proporción directa al tamaño del río y tiende a ser más grande en los arroyos más pequeños", y que dicha afirmación explica la razón por la que se nota una gran similitud en las corrientes más pequeñas en comparación con el más grande de los ríos, independientemente del tamaño de los materiales de fondo. Con base en lo anterior, Davinroy define que la teoría de la micromodelación se basa en que las pequeñas corrientes muestran tendencias similares de transporte de sedimentos, al ser comparadas con ríos de mayor tamaño.

Gordon (2000) también afirma que las pequeñas corrientes se comportan de manera similar a los grandes ríos, es decir, que la mecánica del agua en movimiento y los sedimentos son similares, ya sea en un chorrillo de agua, un arroyo o en el río Misisipi, y por lo tanto, una pequeña corriente se puede describir como un modelo de río más grande.

En los antecedentes de la patente del micromodelo, se establece que si la configuración particular de una corriente se construye con precisión a microescala, y se manipulan correctamente ciertas variables en el micromodelo, tales como el gasto, la pendiente y la cantidad de sedimento,



se pueden producir tendencias de transporte de sedimento similares a aquellas observadas en el prototipo (United States of America Patente n° 5 653 592, 1997).

En su tesis de máster del año 1994, Davinroy menciona que su objetivo era comprobar la teoría propuesta para la micromodelación de ríos, mediante el diseño, la construcción y operación de un modelo pequeño pero lo suficientemente grande como para realizar mediciones topográficas y de velocidades de fondo, que pudieran ser útiles al proyectarse en el prototipo.

2.5.2 Similitud o semejanza

Gaines y Maynard (2001) señalan que todos los modelos hidráulicos de fondo móvil se desvían de los estrictos criterios de similitud establecidos, debido a que con mucha frecuencia se utiliza el mismo fluido tanto en el modelo como en el prototipo, así como también a la distorsión vertical que se necesita para lograr un movimiento de sedimentos adecuado en el modelo. Por lo tanto, los modelos hidráulicos de fondo móvil de ríos requieren una relajación cautelosa y juiciosa de los criterios de similitud.

Davinroy (2011) menciona que los micromodelos no siguen las proporciones rígidas de escala de similitud establecidas a partir de las leyes de Froude y Reynolds. La similitud en la micromodelación más bien se centra en la reproducción de la respuesta del fondo tridimensional del modelo al compararlo con los estudios hidrográficos del río. Dicha similitud se logra a través de un proceso empírico de calibración diseñado para finalmente producir una *replicación* del lecho del río en el micromodelo. Gaines y Maynard (2001) indican que a primera vista puede parecer que el micromodelado ignora las condiciones de similitud dinámica habituales por ejemplo, el parámetro de Shields para el movimiento de sedimentos, y que en cambio apunta a una forma de similitud morfológica de la configuración general del fondo incluyendo la ubicación del thalweg y tendencias de elevación del lecho.

Tal como sucede en muchos otros modelos físicos de fondo móvil, la necesidad de lograr el movimiento del sedimento del lecho arroja como resultado valores exageradamente grandes del número de Froude, en comparación con valores observados en el prototipo (Gaines & Maynard, 2001). Por ejemplo, Maynard (2006) reporta valores del número de Froude medidos en dos micromodelos hasta 2.7 y 3.7 veces más grandes que los de sus respectivos prototipos.



En cuanto al número de Reynolds, Maynard (2006) menciona que no existen requisitos para su valor mínimo en el micromodelo. Sin embargo, la escala tan reducida que posee el micromodelo despierta inquietudes sobre los efectos de la tensión superficial, y sobre si se está utilizando flujo laminar o de transición en el modelo para estudiar flujos turbulentos en prototipo (Gaines & Maynard, 2001).

La semejanza de rugosidad no existe en los micromodelos, pues la exageración de la rugosidad relativa debida al elevado número de distorsión que se presenta en este tipo de modelos provoca que la fricción sea demasiado suave (Maynard, 2006).

Según Maynard (2006), los modelos *racionales* se diseñan y operan de acuerdo con las condiciones de similitud permitiéndose solo pequeñas desviaciones; que a su vez, los modelos *empíricos* no siguen las condiciones de semejanza, más la manera en que operan da como resultado desviaciones significativas pero limitadas de dichas condiciones; mientras que la operación de los micromodelos da como producto desviaciones de las condiciones de similitud aún mayores que las de los modelos *empíricos*.

El micromodelado se aleja de las técnicas habituales de modelado de fondo móvil convencional, pues combina la consideración de las condiciones de semejanza con los ajustes de calibración en el micromodelo (Gaines & Maynard, 2001).

2.5.3 Escalas usuales y distorsión

Una particularidad de este tipo de modelos hidráulicos es la escala extremadamente pequeña que emplean, lo cual trae como consecuencia escalas de longitud horizontal y vertical en número bastante grandes. La escala horizontal proporcional de los micromodelos generalmente es del orden de 10^4 , y la escala vertical es de aproximadamente 10^3 ; variando los números de escala exactos con las dimensiones del río o canal simulado (Ettema & Muste, Scale effect trends in hydraulic models of flow at a dike in a flat-bed channel, 2002).

Las escalas geométricas típicas para los micromodelos han variado entre 1:600 y 1:15,000 para las de longitud horizontal, mientras que comprende un rango entre 1:100 y 1:1,200 para escalas de longitud vertical (Davinroy R. D., 1999). Gaines y Maynard (2001) indican que existen escalas horizontales tan pequeñas como 1:20,000 respecto a la longitud del prototipo. Por su parte, en los modelos convencionales de fondo móvil, las escalas de longitud horizontal comúnmente



utilizadas van de 1:100 a 1:500, y las escalas de longitud vertical se encuentran entre 1:50 y 1:100 (Vergara Sánchez, 1993).

La selección de las escalas de longitud en los micromodelos se realiza de manera distinta a los grandes modelos fluviales de fondo móvil, pues en estos últimos las escalas horizontales y verticales se determinan cumpliendo con las condiciones impuestas por la semejanza de velocidad de caída de las partículas, de rugosidades, de las fuerzas críticas de arrastre y de transporte de sedimentos (CFE, 1983).

En el micromodelo la escala horizontal se elige con base a la economía y practicidad de contener al tramo de río o canal en estudio dentro de los límites de la mesa de micromodelación (Davinroy R. D., 1999). Es decir, que la escala de longitud horizontal se determina por pruebas hasta que el tramo de río o canal requerido se ajuste a la mesa; y tomando en cuenta que el micromodelo tendrá un ancho mínimo del río, que se impone principalmente al considerar la dificultad para medir los cambios que durante las simulaciones pudieran producirse en la batimetría del modelo (Gaines & Maynard, 2001).

En cuanto a la escala de longitud vertical, de acuerdo con Gaines y Maynard (2001) se determina como parte de la calibración del micromodelo, mediante ajustes de la pendiente y de la descarga. El procedimiento de calibración permite al modelador establecer la escala vertical de acuerdo con una escala horizontal preestablecida, cuyos objetivos son generar un movimiento satisfactorio del fondo del modelo, así como permitir la realización de mediciones directas que faciliten la conversión de valores en el micromodelo a valores en el prototipo (Davinroy R. D., 1994). Es decir que, a diferencia de los modelos fluviales de fondo móvil convencionales, la escala vertical en el micromodelo se define después de que este se ha construido. Davinroy afirma en su trabajo de tesis del año de 1994 que: “Teóricamente, para una escala horizontal preestablecida, existe una escala vertical óptima que replicará de manera más efectiva las tendencias de transporte de sedimentos del prototipo”.

La distorsión geométrica Ω se define como la relación existente entre la escala de longitud horizontal y la escala de longitud vertical L_{eh}/L_{ev} , siendo siempre un número mayor a la unidad y que en los modelos fluviales de fondo móvil convencionales comúnmente alcanza un valor máximo de 5 (Vergara Sánchez, 1993). En el caso de la micromodelación el número de distorsión ha variado de un valor tan pequeño como 6 a uno tan grande como 22 (Davinroy et al., 2011).



Maynard (2006) señala que los micromodelos han utilizado distorsiones que comúnmente van de 8 a 15 y que dicha relación de distorsión vale al menos el doble que en la mayoría de los modelos *empíricos* de fondo móvil convencionales. Se seleccionan y construyen modelos distorsionados linealmente cuando se requiere representar y medir con precisión distancias verticales, cambiar el régimen de escurrimiento y para simular adecuadamente la rugosidad en el modelo (CFE, 1983), así como para generar las fuerzas necesarias para el movimiento del fondo (Davinroy et al., 2011).

2.5.4 Efectos de escala

La principal condición de similitud en la mayoría de los modelos hidráulicos de fondo móvil es la intensidad de movimiento del sedimento que conforma el lecho, sin embargo, como no se cumplen otras condiciones de similitud, surgen efectos de escala que se vuelven más severos a medida que aumenta la escala de longitud del modelo (Ettema & Muste, 2002).

Ettema y Maynard (2002) señalan que en los modelos hidráulicos, las causas habituales de los efectos de escala son: valores de escala de longitud numéricamente grandes, distorsión de la escala vertical con respecto a la escala horizontal, mayor tamaño de sedimento y excesiva pendiente del canal; y que todas estas se encuentran presentes en los micromodelos fluviales de fondo móvil.

Escala de longitud grandes provocan pequeñas dimensiones de flujo, por lo que los números de Reynolds y Weber en el modelo son lo suficientemente diferentes con respecto al prototipo como para influir en el comportamiento y la distribución del flujo (Ettema, 2001). Gaines y Maynard (2001) mencionan que el pequeño tamaño del micromodelo despierta inquietudes sobre si se está utilizando flujo laminar o de transición para estudiar flujo turbulento.

La distorsión provoca que los efectos de las fronteras laterales se extiendan sobre un área mayor en el modelo que en el prototipo, generando inquietud sobre la capacidad de los micromodelos para reproducir la distribución del flujo (Gaines & Maynard, 2001).

Otros efectos de escala mencionados por Maynard (2006) son números de Froude hasta 3.7 veces más grandes en el micromodelo que en el prototipo y la falta de correspondencia entre los tirantes hidráulicos entre el modelo y el tramo de río en estudio. Por último, Maynard (2006) indica que debido a las interacciones desconocidas entre todas las causas de los efectos de escala



presentes en un micromodelo, no es posible definir las causas específicas responsables para cada una de las diferencias entre modelo y prototipo.

2.5.5 Dimensiones de parámetros y variables

La mesa de micromodelación puede dimensionarse para cumplir una variedad de requisitos; sin embargo, el tamaño se limita al área que puede alcanzar físicamente el modelador que, por lo general, ha sido de 0.90 m de ancho por 1.90 m de largo (Gaines & Maynard, 2001). En el tamaño estándar de una mesa de micromodelación se han podido reproducir típicamente hasta 20 km del río Misisipi, siendo el micromodelo uno o dos órdenes de magnitud más pequeño que los modelos fluviales de fondo móvil *empíricos* convencionales (Maynard, 2006). En material audiovisual grabado por González-Verdugo y Espinoza-Ayala especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, durante una visita técnica en el año 2014 a las instalaciones del USACE en el Distrito de San Luis, se muestran mesas con mayores longitudes.



Figura 2.13 Micromodelos de mayores longitudes. Fuente: Visita técnica de González-Verdugo y Espinoza-Ayala en el 2014 a las instalaciones del USACE en el Distrito de San Luis

El ancho mínimo típicamente utilizado para la representación de la corriente principal micromodelada es de aproximadamente 38 mm, como resultado de proporciones de escalas horizontales tan pequeñas como 1:20,000 (Gaines & Maynard, 2001). En canales laterales y afluentes micromodelados se han aceptado anchos un tanto menores a la cantidad mencionada para las corrientes principales (Maynard, 2006).



En cuanto a los gastos, al igual que los niveles de flujo, no son directamente escalables al relacionarlos entre el micromodelo y el prototipo (Davinroy et al., 2011).

Los tirantes en los micromodelos varían de aproximadamente 1.27 cm a 5.08 cm (Ettema & Muste, Scale effect trends in hydraulic models of flow at a dike in a flat-bed channel, 2002). Echávez (1996) señala que en modelos con flujo a superficie libre los tirantes deben ser mayores a 3.00 cm si el régimen es subcrítico y mayores a 1.00 cm cuando es supercrítico, pues con tirantes menores a los mencionados, el efecto de la tensión superficial es importante. Es importante mencionar, que los niveles máximos del flujo observados en el micromodelo son aproximadamente a dos tercios de profundidad del río modelado (Maynord, 2006) y que los niveles de flujo en las simulaciones no se encuentran directamente relacionados con los del prototipo (Gaines & Maynord, 2001).

El tiempo de modelado ha oscilado entre 1.8 y 6 minutos, siendo un rango típico el que va de 3 a 5 minutos (Maynord, 2006). En el micromodelo estudiado en la tesis de Davinroy (1994), las simulaciones anuales representativas en el modelo variaron de 1 a 20 minutos, y estas revelaron que un movimiento adecuado de sedimentos podría ocurrir en una duración mínima de 2 minutos, por lo que un día en prototipo equivaldría aproximadamente a 10 segundos en el modelo. Davinroy también indica en su trabajo de tesis, que debido a que la magnitud del tiempo en la micromodelación se determina de forma empírica, no se puede escalar respecto al tiempo real que transcurre en el prototipo para medir los cambios en el fondo del río.

La pendiente representa un solo valor para todo el tramo de río modelado, puesto que en el micromodelo no se utilizan tarrajas ni ajustes de pendiente locales (Davinroy et al., 2011). Maynord (2006) señala que el pequeño tamaño del micromodelo en conjunto con las características del material empleado como sedimento, da como resultado pendientes pronunciadas, e indica que la pendiente de la superficie libre del agua que se ha medido en algunos micromodelos es de aproximadamente el 1%. En el estudio realizado para la tesis de Davinroy (1994), se indica que el valor de la pendiente en el micromodelo fue de 0.02067, que al ser escalada, representa un valor diecisiete veces mayor que la de prototipo.

2.5.6 Materiales comunes

La parte superior de la mesa de micromodelación se encuentra fabricada de triplay, provista de una capa impermeable de fibra de vidrio (United States of America Patent n° 5 653 592, 1997).



Se indica que el triplay es de grado marino, para poder soportar el peso del agua y de los sedimentos, así como de los operadores del modelo durante la experimentación (Gordon & Davinroy, 2001). En el micromodelo de la tesis de Davinroy (1994) en lugar de triplay, la parte superior de la mesa de micromodelación se fabricó de madera ligera.



Figura 2.14 Canal hidráulico de un micromodelo. Fuente: Gaines y Maynard, 2001

En los micromodelos se emplean diversos materiales para representar a la rugosidad y las condiciones de frontera fijas, como: márgenes, islas, estructuras de diques, rocas y formaciones de arcilla consolidada. Se utiliza malla de alambre galvanizado para representar estructuras de protección fluvial, mientras se usa arcilla y malla de poliéster para definir las márgenes, y se emplea grava fina de óxido de aluminio para simular materiales no erosionables tales como roca y arcilla consolidada que se encuentran dentro del canal (Davinroy et al., 2011).



Figura 2.15 Materiales empleados comúnmente para representar las fronteras del micromodelo. Fuente: Davinroy et al., 2011

Las fronteras del micromodelo se construyen de acuerdo con mapas fotográficos aéreos de alta resolución del tramo de río en estudio (Gordon D. , 2000), la fotografía es georreferenciada y se traza de acuerdo a la escala horizontal elegida para el modelo, para ser colocado sobre la lámina rectangular de poliestireno que representara al río y que se inserta en la mesa de micromodelación (Gaines & Maynard, 2001).



El inserto que contiene al plano de corte del río o arroyo en estudio está fabricado con una lámina rectangular de poliestireno de 75 mm de espesor (Gaines & Maynard, 2001). Sin embargo, el poliestireno no siempre se utilizó desde que la idea del micromodelado fue concebida, pues en el micromodelo desarrollado por Davinroy en 1994 para su trabajo de tesis, se indica que la placa inserta fue fabricada a partir de tiras laminadas de paneles de corcho. Con la placa de inserto se simulan las márgenes del río y las islas dentro del cauce, que se trazan mediante cortes verticales en la placa de poliestireno, actuando este como una frontera sólida y fija (Maynard, 2006). Se han realizado mejoras en la reducción de la rugosidad del modelo en los límites de las márgenes y las islas, que incluye el uso de malla de poliéster y otros materiales permeables (Davinroy et al., 2011).

Davinroy et al. (2011) señalan que en los primeros años de desarrollo del micromodelado, las estructuras sólidas de protección fluvial (espigones, revestimientos marginales, diques marginales, etc.) se representaron en el modelo mediante el uso de láminas metálicas delgadas e impermeables, así como plástico. Sin embargo, después de tener problemas de socavación exagerada, las estructuras de protección fluvial en el micromodelo tuvieron que ser representadas posteriormente por láminas de malla de acero permeable con aberturas de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ (Maynard, 2006). El uso de estructuras de malla de acero fue desarrollado empíricamente por el USACE en el Distrito de San Luis, a través de una serie de estudios y experimentos en los canales de los micromodelos (Gaines & Maynard, 2001). Las estructuras simuladas con malla de acero galvanizado han demostrado ser extremadamente efectivas en la reproducción de las respuestas del fondo de las estructuras de protección sólidas observadas en los ríos, por lo que ahora este material se usa ampliamente en la micromodelación. La porosidad de estas estructuras de malla permite una disminución relativa de la rugosidad hidráulica y, como consecuencia, una reducción de la turbulencia, la fuerza y el esfuerzo cortante aplicado al lecho móvil del modelo (Davinroy et al., 2011).



Figura 2.16 Estructura de protección en modelos de ríos: a) Diques de lámina metálica en el modelo de fondo móvil convencional St. Louis Harbor y b) Espigones de malla de alambre galvanizado en un micromodelo. Fuente: Davinroy et al., 2011

2.5.7 Propiedades del sedimento

Los micromodelos utilizan como sedimento un material sintético para simular la respuesta del fondo, el cual es un plástico llamado Urea Tipo II cuyo peso específico comúnmente vale 1.48 (Davinroy et al, 2011). En micromodelos anteriores se llegó a utilizar el mismo plástico de Urea Tipo II solo que con un peso específico de 1.23 (Davinroy R. D., 1994). La gradación del fondo para cada micromodelo está compuesta por cuatro grupos de tamaños de partículas de Urea disponibles en el mercado (en los primeros micromodelos se utilizaron cinco), que abarcan los siguientes diámetros: 0.25-0.42 mm, 0.42-0.58 mm, 0.48-0.84 mm y 0.84-1.19 mm. El material del fondo para los micromodelos es típicamente preparado en modo de lotes, al combinar las cuatro agrupaciones de tamaños de partículas que en un principio se encuentran separadas. El USACE en el Distrito de San Luis eligió el plástico Urea Tipo II debido a que el material es lo suficientemente ligero para ser transportado por el flujo, y a que después de cada prueba conserva la configuración del lecho modelado, lo cual facilita la recopilación de datos batimétricos en el micromodelo; además de ser lo suficientemente denso para no ser suspendido y con ello mantener el agua transparente, facilitando la observación del movimiento del sedimento. Ingenieros del Distrito de San Luis también experimentaron con una variedad de sedimentos diferentes, incluyendo cáscara de nuez triturada, arena y acrílico; notaron que cada uno de esos materiales tenía problemas que impedían su uso en la micromodelación (Gaines & Maynard, 2001). En la siguiente figura, se muestran distintos tamaños de partícula de Urea tipo II disponibles en el mercado.

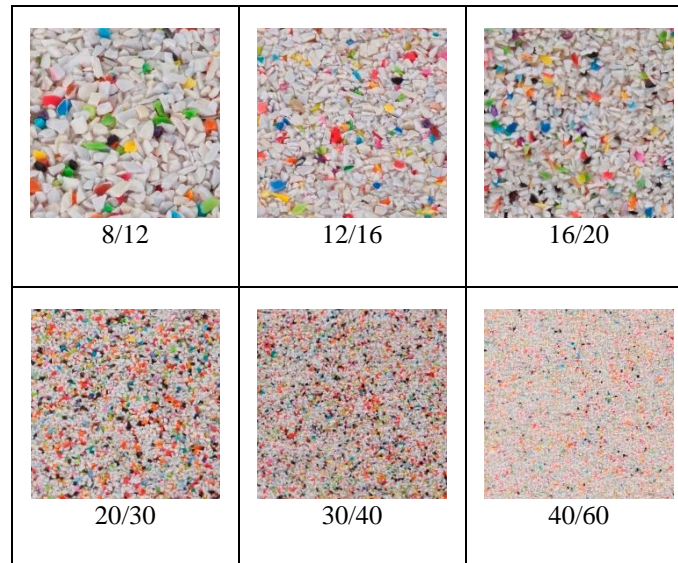


Figura 2.17 Números de malla para algunos tamaños comerciales de Urea tipo II. Fuente: <https://compomat.com/>

2.5.8 Configuración del fondo

La micromodelación se desvía de los procedimientos de modelación de fondo móvil convencional porque no obliga al modelo de río a comenzar en una configuración de lecho predeterminada (Davinroy R. D., 1994). Para replicar una condición inicial de las fronteras móviles del río a modelar, los micromodelos se basan en la hidrodinámica y en el transporte de sedimentos para configurar tridimensionalmente el fondo; a diferencia de los modelos numéricos o de fondo móvil convencionales que parten de una configuración inicial fabricada y definida antes de la experimentación (Davinroy et al., 2011). En la Figura 2.18 se aprecian varillas auxiliares para configurar el nivel de la batimetría de un modelo hidráulico convencional.



Figura 2.18 Varillas para configurar el fondo de manera predeterminada en un modelo hidráulico convencional del río Carrizal. Fuente: Ortiz, 2005

Davinroy et al. (2011) también señalan que los micromodelos no emplean molduras artificiales del fondo ni cambios de pendiente locales mediante tarrajas, pues los ingenieros del USACE se dieron cuenta durante la experimentación de que estos aditamentos limitaban la



formación del fondo del modelo. Ejemplo de que se probó darle una configuración de fondo inicial al micromodelo puede apreciarse en la patente que data de 1997, donde se señala que la topografía del fondo en el modelo se formaba colocando plantillas macho en incrementos seleccionados a lo largo del canal, para poder moldear el sedimento a una forma determinada con base al levantamiento de las secciones transversales del río modelado.

Davinroy (1994) indica en su tesis de maestría, que el plano de la alineación vista en planta del río a modelar es el factor más importante en el desarrollo de la formación del fondo, y que cuanto más preciso sea el plano de la vista en planta del micromodelo, más precisa será la simulación del transporte de sedimentos del modelo respecto al prototipo.

2.6 APLICACIONES DE LOS MICROMODELOS

El USACE ha empleado desde 1994 la modelación de Respuesta Hidráulica de Sedimentos (*Hydraulic Sediment Response* en inglés), anteriormente llamada *Micromodelación*, para abordar una variedad de problemas relacionados con la formación de bancos de arena y la erosión en vías de navegación fluvial de los Estados Unidos, que incluyen a los ríos Misisipi, Atchafalaya, White, Misuri, Ohio, Brazos y Kaskaskia (Davinroy et al., 2011). Davinroy (1999) señala que la tecnología de micromodelación se ha utilizado principalmente en estudios para el gobierno federal estadounidense.

Gaines y Maynard (2001) señalan que el USACE utiliza el micromodelo para dos tipos de estudios:

- a) Para predecir en términos cualitativos la respuesta del fondo del río simulado con el objetivo de reducir el dragado en tramos que padecen problemas de sedimentación, y así establecer una alineación, profundidad y ancho adecuados para los canales fluviales de navegación. Lo anteriormente mencionado, se logra evaluando distintas alternativas para el control de canales, tales como diques, espigones en curvas, o realineación de las márgenes, para determinar cuál de las distintas soluciones proporciona la configuración del río deseada.
- b) Para identificar patrones de flujo generales, especialmente las distribuciones de velocidad superficial y sus direcciones asociadas a los posibles ajustes de los canales fluviales. Esto con el propósito de encontrar los patrones de flujo ideales para la navegación al evaluar alguna alternativa de diseño. Asociado al estudio de patrones de flujo, Davinroy (1999) señala que los micromodelos también se han empleado en proyectos de restauración



ambiental en canales laterales del río Misisipi, con el fin de fomentar el desarrollo del hábitat de peces y vida silvestre sin afectar adversamente las profundidades de navegación en los canales fluviales adyacentes.

Es por medio de la experiencia en el uso de la tecnología de la micromodelación que se han identificado diversas limitaciones en su aplicación, las cuales deben ser atendidas para reducir la incertidumbre de los resultados que arroje algún caso de estudio realizado a través de algún micromodelo. A continuación, se enlistan las ventajas y desventajas detectadas por diversos investigadores durante el desarrollo de esta tecnología.

2.6.1 Ventajas

- Rapidez. Debido a características como el no moldeado del lecho y a la medición automatizada de la batimetría, el micromodelo puede evaluar una gran cantidad de condiciones en un corto periodo de tiempo (Maynard, 2006). En la patente estadounidense de 1997, se señala que un estudio completo puede realizarse en unas pocas semanas en un micromodelo, pues es posible realizar gran número de pruebas en unas pocas horas; mientras que un análisis en un modelo de fondo móvil convencional podría durar años, ya que las simulaciones normalmente duran entre doce y cuarenta horas.
- Educación y demostración. El micromodelo puede ser utilizado como herramienta educativa en aulas, pues permite observar fácilmente los complejos procesos dinámicos que suceden al interactuar el flujo y los sedimentos (United States of America Patente nº 5 653 592, 1997), por lo que se vuelve un medio conveniente para demostrar y explicar a audiencias no técnicas los aspectos generales del comportamiento de los canales aluviales (ASCE, 2000). Gordon (2000) afirma que uno de los beneficios del modelo es que permite a los ingenieros transmitir conceptos hidráulicos altamente complejos a personas que no tienen formación en ingeniería. Como ejemplo, Gordon y Davinroy (2001) mencionan que fue posible convencer a un grupo de agricultores del beneficio que les traía la instalación de unas estructuras dentro de un río que circula por sus tierras, solo después de observar el micromodelo de ese estudio en acción.
- Economía. Este tipo de modelo es relativamente barato de construir y operar debido a su pequeño tamaño (Gordon & Davinroy, 2001). Gordon menciona en el año 2000, que la construcción, el equipo y la operación para un modelo de fondo móvil convencional ascendía a varios millones de dólares; mientras que estos mismos conceptos se reducían aproximadamente a \$70,000.00 USD realizando los estudios en un micromodelo.
- Operación. El micromodelo puede ser operado por una sola persona debido a su pequeñez extrema (Davinroy R. D., 1994), además de que el ingeniero o técnico encargado de esta labor necesita capacitación mínima para manejar los dispositivos de medición (Gordon D.



, 2000). El sistema automatizado del micromodelo permite devolver el fondo a su condición inicial después de cada prueba, y también permite realizar ajustes en la descarga de flujo y de sedimentos en cualquier momento de la simulación con un simple clic del mouse (Davinroy R. D., 1999).

- **Multidisciplinario.** La tecnología de la micromodelación ha reunido a ingenieros, biólogos, pilotos de barcos fluviales y otros tantos especialistas que anteriormente habían trabajado por separado, facilitando la relación entre los ingenieros y otras partes interesadas en la calidad de arroyos y ríos estadounidenses (Davinroy R. D., 1999). Este tipo de modelo propicia que distintas agencias y grupos permanezcan íntimamente involucrados en un proyecto desde su inicio hasta su conclusión, dando la oportunidad de que los participantes propongan y prueben sus ideas para observar los impactos positivos y negativos que estas sugerencias causarían al tramo de río modelado (Gordon & Davinroy, 2001). Maynard (2006) menciona que el uso del micromodelo ha facilitado a diversos grupos llegar a un consenso sobre proyectos controvertidos.
- **Versatilidad.** El USACE desarrolló planes de investigación para la evaluación de los micromodelos y determinar cuáles son sus áreas de aplicación apropiadas (Gaines & Maynard, 2001); lo cual quiere decir que la tecnología se encuentra abierta en cuanto a posibilidad de cambios y modificaciones que permitan su mejora, sin perder de vista el concepto original de su invención, tal como se afirma en la patente estadounidense de 1997.

2.6.2 Desventajas

- **Necesidad de usuarios experimentados.** La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés) en el año 2000 indicaba que el micromodelo es una herramienta cuya aplicación necesita una experiencia considerable en la modelación hidráulica que permita interpretar sus resultados de manera adecuada y reconocer sus limitaciones. El ASCE también señaló que los micromodelos pueden ser útiles en investigaciones preliminares de situaciones de flujo bidimensionales, pero que sus resultados deben ser corroborados con modelos de fondo móvil convencionales más grandes, modelos numéricos o datos de mediciones de campo cuando sea posible.
- **Aplicación limitada.** El ASCE (2000) indica que los micromodelos no son para todas las situaciones de modelados de fondo móvil. Por ejemplo, Davinroy et al. (2011) mencionan que en los micromodelos no se simulan llanuras de inundación, sino que el flujo se hace circular solo por la cubeta del río modelado.
- **Proyectos sin grandes riesgos.** El USACE en 2004 concluyó que a pesar de que el micromodelo no es una herramienta de diseño detallada, puede utilizarse para la selección de alternativas de diseño de estructuras de protección fluvial, excepto para aquellos tipos



de estudio en donde la vida humana o el proyecto en sí se encuentren en riesgo (Maynord, 2006).

- Tecnología negativamente criticada. Maynord (2006) indica a Falvey y a Yalin como algunos de los importantes investigadores que critican el uso de la tecnología de micromodelación, debido al pequeño tamaño del modelo que implica una falta de adhesión hacia los principios de similitud empleados en el modelado de fondo móvil convencional.
- Falta de similitud. Gaines y Maynord (2001) mencionan que los micromodelos parecen burlar las condiciones de similitud, eludiendo a los criterios de semejanza dinámica habituales como por ejemplo el parámetro de Shields, puesto que la naturaleza aproximada del trabajo de diseño para el que se usan los micromodelos no busca replicar de manera detallada la mecánica del transporte de sedimentos. Gaines y Maynord más bien señalan que el uso de estos modelos apunta directamente a una forma de similitud morfológica entre el fondo del micromodelo y del río simulado.



3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MICROMODELO

3.1 ELECCIÓN DEL ESCENARIO

El primer paso para el diseño del micromodelo como uno de los objetivos de esta tesis de investigación fue determinar el escenario a modelar. Según la Real Academia Española, la palabra *escenario* se define como:

- Lugar en que ocurre o se desarrolla un suceso.
- Conjunto de circunstancias que rodean a una persona o un suceso.
- Posibilidades o perspectivas de un hecho o de una situación.

De acuerdo con las definiciones anteriores, dicha palabra hace referencia a espacio y tiempo en que se desarrolla o puede desarrollarse un suceso, por lo que, al establecer una relación entre este concepto con la actividad de modelado a realizarse en este proyecto de tesis, se puede entender que el escenario corresponde al tramo de río a simular y a las características morfológicas e hidráulicas de este en un momento determinado. A continuación, se presentan los criterios para elegir el escenario espacial y temporal a representar en el micromodelo.

3.1.1 Escenario espacial

La elección del tramo de río a simular en el micromodelo, dependió principalmente de la importancia que el sistema hidráulico representa para su entorno y de la información disponible del sitio. Atendiendo a los factores mencionados, la zona de estudio elegida para el trabajo de micromodelación fue el tramo donde se bifurca el río Mezcalapa y que da origen a los ríos Samaria y Carrizal (Ver Figura 3.1).

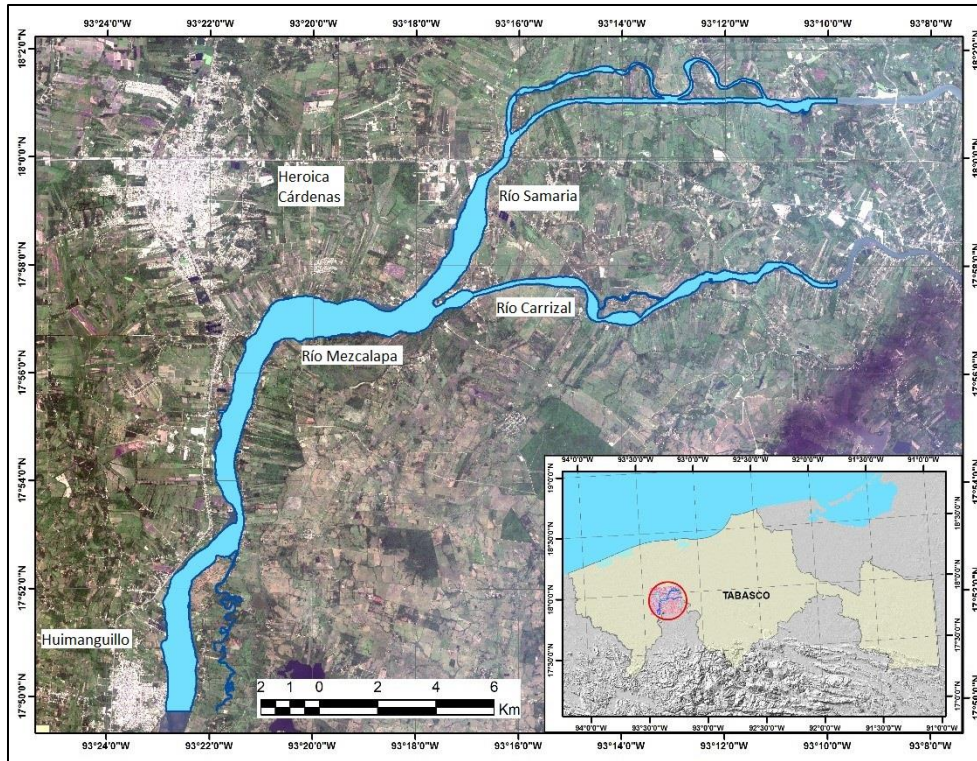


Figura 3.1 Zona de estudio analizada en el proyecto: “Estudio de la evolución del comportamiento morfológico de las bifurcaciones en ríos”. Fuente: IMTA, 2016

Rivera-Trejo, Vázquez-Rodríguez, Mendoza-Palacios y Estrada-Botello (2008) señalan que la importancia de esta bifurcación radica en la alteración hidráulico-morfológica de la que ha sido objeto en los últimos años y en su ubicación.

En cuanto a la alteración hidráulico-morfológica, Rivera-Trejo et. al (2008) señalan que la construcción de las grandes presas del sistema Grijalva entre los años 1964 y 1987, así como la construcción de diversas obras de defensa hidráulica y la extracción continua de material del lecho, han modificado los aportes de líquidos y sedimentos en la bifurcación del Mezcalapa, lo que resulta en problemas importantes de erosión y sedimentación. En el funcionamiento original de la bifurcación, la mayor parte del caudal circulaba por el río Samaria, más esta situación se fue invirtiendo al notarse a través de los años un aumento de gastos en el río Carrizal, y se agudizó a raíz de un conjunto de precipitaciones extraordinarias que originaron fuertes avenidas en el año de 1999. Al respecto, Jiménez-Castañeda, Gracia-Sánchez, Berezowsky-Verduzco y Martínez-Cuaxospa (2008) indican que en el año 1997 con un gasto del orden de los $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Mezcalapa, se tuvo en el río Carrizal un gasto de $380 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente al 38% del gasto total de



la bifurcación; mientras que en el año 1999, se presentó para la misma condición del río Mezcalapa, un gasto en el río Carrizal igual a $520 \text{ m}^3/\text{s}$ o sea del 52%.

En lo que respecta a la ubicación, la importancia de la bifurcación se debe a que el río Carrizal atraviesa la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco, que según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) contaba hasta el año 2015 con poco más de 823 mil habitantes.

El hecho de que el río Carrizal circule a través de la ciudad de Villahermosa, en combinación con la alteración hidráulico-morfológica que se ha manifestado en la bifurcación, ha dado como resultado severas inundaciones para la ciudad en el transcurso de los años, tal como la ocurrida en 1999 a raíz del conjunto de avenidas extraordinarias que ya ha sido mencionado en párrafos anteriores.

Debido a la importancia que representa el sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal, este ha sido objeto de diversos estudios y proyectos de obras hidráulicas por parte de entidades como el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), lo que implica la disponibilidad de información para llevar a cabo el trabajo de micromodelación. Entre la información recopilada se cuenta con levantamientos topo-batimétricos, imágenes satelitales y aforos de estaciones hidrométricas cercanas a la bifurcación.

3.1.2 Escenario temporal

A partir de la información disponible sobre la zona de estudio, fue posible delimitar un escenario temporal para proponer un diseño que permitiera realizar simulaciones congruentes en el micromodelo, es decir, un escenario en el que no hayan ocurrido cambios hidráulicos o morfológicos bruscos durante la etapa que busca ser reproducida mediante el modelado.

La delimitación del escenario temporal se realizó con fundamento en el informe técnico titulado “Estudio de la evolución del comportamiento morfológico de las bifurcaciones en ríos”, elaborado por el el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2016). En dicho documento, el IMTA analizó 32 fotografías satelitales de la bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal mediante un software SIG (Sistemas de Información Geográfica) para cuantificar el área del espejo de agua y de las islas situadas dentro del río, con el objetivo de observar su evolución morfológica entre



los años 1975 y 2016. En la Tabla 3.1 y en la Figura 3.2 se muestran algunos de los resultados obtenidos por el IMTA.

Tabla 3.1 Cuantificación del área del espejo de agua y de las islas dentro del cauce de la zona de estudio entre el periodo de 1975 y 2016. Fuente: IMTA, 2016

Número	Satélite	Sensor	Resolución (m)	Fecha	Agua (ha)	Islas (ha)	Total
1	LANDSAT	MSS	60	05/12/1975	2,487.07	244.84	2,731.91
2	LANDSAT	MSS	60	03/04/1979	2,629.48	158.19	2,787.67
3	LANDSAT	MSS	60	08/06/1980	2,560.51	193.04	2,753.55
4	LANDSAT	TM	28.5	11/03/1986	2,095.57	397.92	2,493.49
5	LANDSAT	TM	30	25/04/1988	2,361.48	269.04	2,630.52
6	LANDSAT	TM	30	30/03/1990	2,348.47	255.98	2,604.46
7	LANDSAT	TM	30	30/03/1993	2,473.20	230.11	2,703.31
8	LANDSAT	TM	30	01/03/1994	2,370.53	235.67	2,606.20
9	LANDSAT	TM	30	05/04/1995	2,520.13	193.06	2,713.19
10	LANDSAT	TM	30	06/03/1996	2,386.74	294.39	2,681.13
11	LANDSAT	TM	30	27/03/1997	2,442.01	264.83	2,706.84
12	LANDSAT	TM	30	28/03/1998	2,473.93	247.20	2,721.14
13	LANDSAT	TM	30	02/05/1999	2,543.33	235.38	2,778.72
14	LANDSAT	ETM	15	12/05/2000	2,612.94	282.11	2,895.05
15	LANDSAT	ETM	15	28/03/2001	2,642.94	281.59	2,924.53
16	LANDSAT	ETM	15	10/01/2001	2,620.93	273.82	2,894.75
17	LANDSAT	ETM	15	16/04/2002	2,752.38	231.97	2,984.35
18	LANDSAT	ETM	15	19/03/2003	2,575.42	311.41	2,886.82
19	SPOT	HRG	10	14/11/2004	1,754.97	1,021.80	2,776.77
20	SPOT	HRG	10	26/01/2005	2,228.83	557.31	2,786.14
21	SPOT	HRG	2.5	13/03/2006	2,452.39	412.82	2,865.21
22	SPOT	HRG	2.5	28/12/2007	2,032.52	907.37	2,939.89
23	SPOT	HRG	2.5	11/05/2008	2,674.02	302.90	2,976.91
24	SPOT	HRG	2.5	13/08/2008	2,729.02	283.29	3,012.31
25	SPOT	HRG	2.5	14/03/2010	2,177.35	720.91	2,898.26
26	SPOT	HRG	2.5	28/03/2011	2,307.30	678.66	2,985.96
27	SPOT	HRG	2.5	15/12/2012	2,344.83	658.90	3,003.73
28	LANDSAT	OLI	15	25/06/2013	2,477.66	601.70	3,079.36
29	SPOT	TELESCOPIO KORSCH	6	07/04/2014	2,438.37	494.74	2,933.11
30	SPOT	TELESCOPIO KORSCH	1.5	31/10/2015	2,409.46	643.71	3,053.16
31	SPOT	TELESCOPIO KORSCH	1.5	09/03/2016	2,274.45	763.38	3,037.82
32	LANDSAT	OLI	15	03/07/2016	2,678.63	580.33	3,258.96

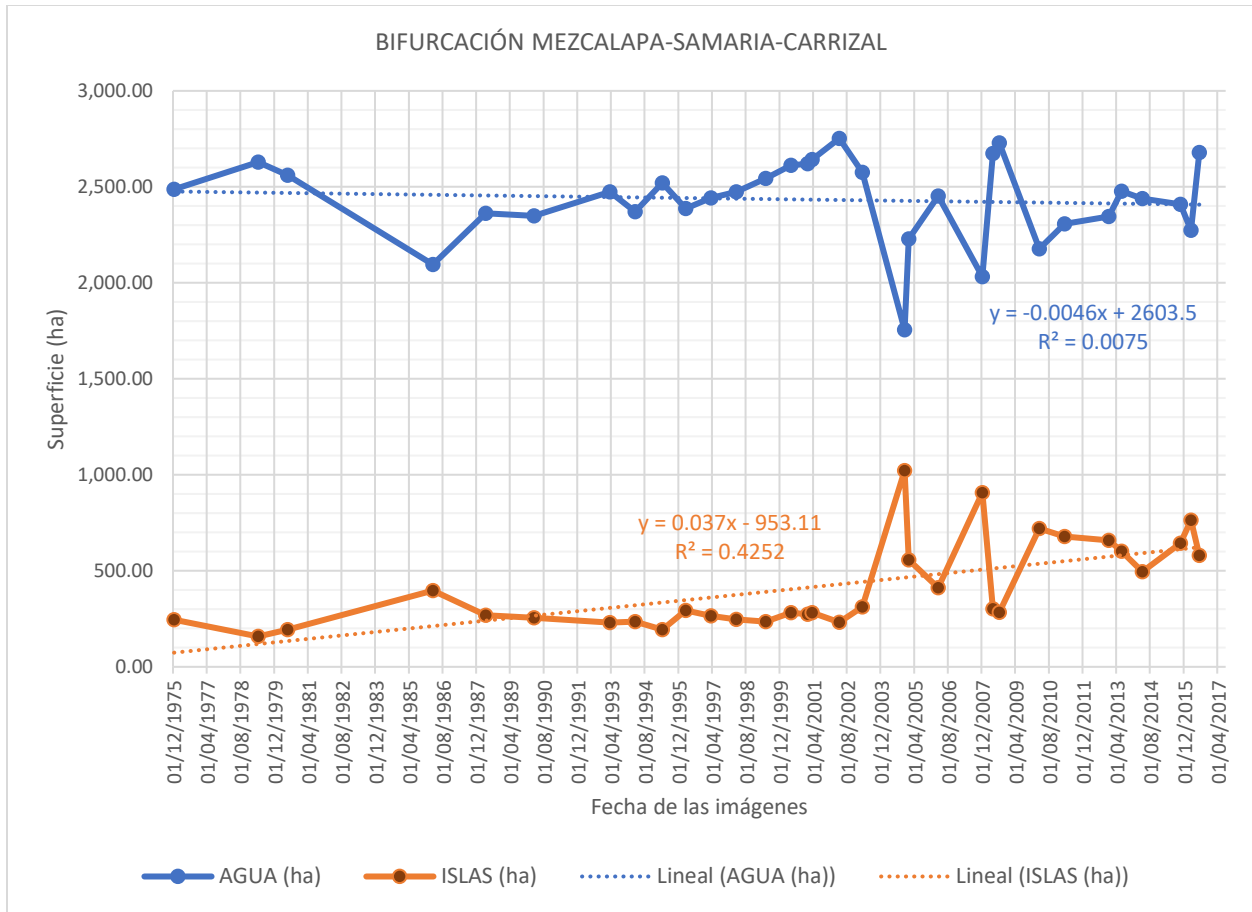


Figura 3.2 Gráfica de variación y tendencia de superficie de agua e islas dentro del cauce. Fuente: IMTA, 2016

Con base en los resultados del estudio realizado, los especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua indican que, no obstante, los cambios estacionales de flujo registrados en la zona de estudio, se observa una tendencia del río en ampliar la zona de escurrimiento.

Si bien se aprecian en las áreas cuantificadas una variación anual, estas se hacen notoriamente más oscilantes a partir del año 2004, tanto para la superficie del espejo de agua como para la islas y bancos de arena en el cauce. La variación gradual que cada año se presenta en la bifurcación, como ya se mencionó anteriormente, tiene su origen en la operación de las presas aguas arriba, en los fenómenos hidrometeorológicos y en el impacto causado por la construcción de diversas obras hidráulicas de protección en el cauce; mientras que la gran oscilación visualizada a partir del año 2004, seguramente es ocasionada por la construcción de la obra de control denominada El Macayo y otras medidas estructurales tomadas para disminuir el riesgo de inundaciones en Villahermosa.



La construcción de la obra de control El Macayo se plantea a raíz de las avenidas extraordinarias ocurridas en el río Mezcalapa en el año de 1999, con el propósito de restituir el porcentaje de repartición del caudal en la bifurcación (Arreguín-Cortés, Rubio-Gutiérrez, Domínguez-Mora, & Luna-Cruz, 2014).

Se determinó de manera preliminar que el escenario temporal de las simulaciones en el micromodelo quedará delimitado hasta antes de 1999 por dos razones: en primera, por los bruscos cambios hidráulico-morfológicos ocurridos en la bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal originados por las avenidas extraordinarias de ese año; en segunda, por el inicio de los trabajos para la construcción de la estructura de control El Macayo, debido a que esta acción y posteriormente la operación de sus vertedores, influyeron drásticamente en las variaciones del flujo y el transporte de sedimentos en el sistema. Por lo que se llegó a la conclusión de que modelar la bifurcación en un estado posterior al año de 1999, provocaría que la configuración de las condiciones de frontera en el micromodelo fuese más complicada.

Con base en lo escrito en el párrafo anterior, así como atendiendo a la disposición de una fotografía satelital y de un levantamiento topo-batimétrico, ambos del año 1997, se eligió dicho año como el escenario temporal para representar las condiciones de la bifurcación mediante el modelado. Cabe mencionar que la fotografía satelital fue obtenida del citado estudio que realizó el IMTA en 2016 y que el levantamiento topo-batimétrico fue proporcionado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El río Grijalva es una corriente regulada mediante cuatro grandes presas hidroeléctricas, que enlistadas partiendo desde aguas arriba se conocen como La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas. Aguas abajo de Peñitas, el río Grijalva es nombrado localmente como Mezcalapa y recibe las aportaciones de los ríos Camoapa y Platanar, posteriormente el Mezcalapa se bifurca para dar origen por su margen izquierda al río Samaria y por su margen derecha al río Carrizal. El río Samaria continua su recorrido hasta desembocar al Golfo de México en la Barra de Chiltepec; mientras el río Carrizal atraviesa la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco, donde recibe las aportaciones de los ríos de la sierra de los Altos de Chiapas, para después de esta



confluencia volver a ser llamado río Grijalva. Por último, después de cruzar la capital tabasqueña, el río Grijalva confluye con el río Usumacinta, para desembocar juntos al Golfo de México.

La bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal, se localiza en la frontera de los estados de Chiapas y Tabasco, aproximadamente 70 km aguas abajo de la presa Peñitas y en el orden de los 30 km aguas arriba de Villahermosa, Tabasco. En la Figura 3.3 se aprecia un mapa de ubicación de la zona de estudio.

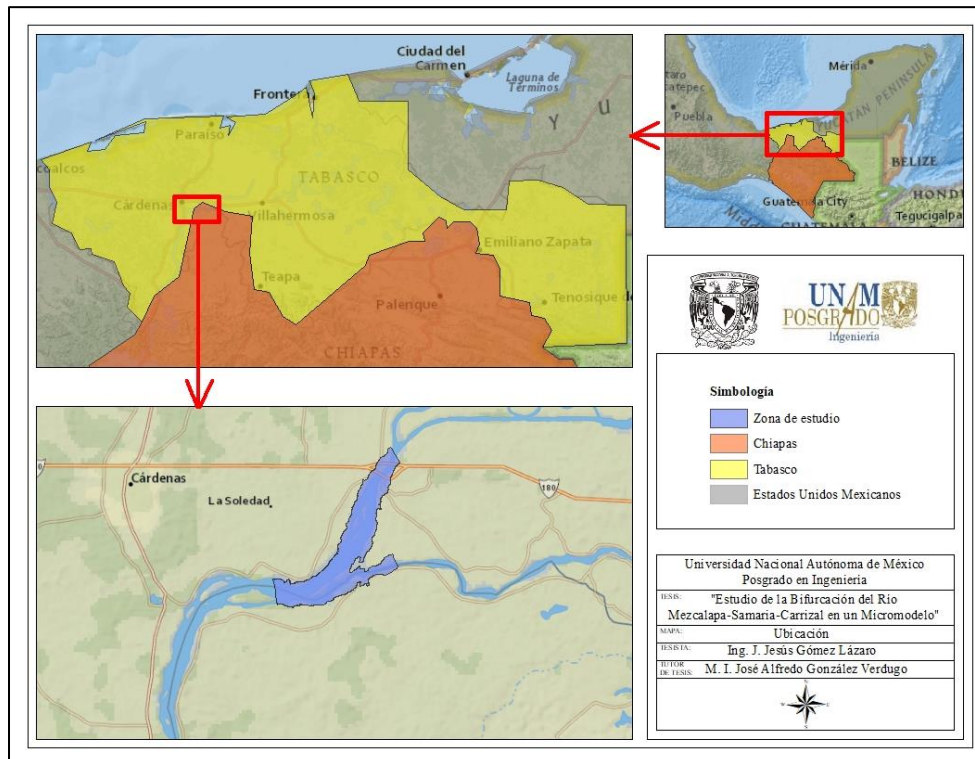


Figura 3.3 Mapa de ubicación de la zona de estudio

3.3 DISEÑO DEL MICROMODELO

Una vez que se ha determinado el escenario espacial y temporal a representar en el modelo, el siguiente paso para el desarrollo de la investigación es el proceso de diseño. El diseño se fundamenta en el cuidado de ciertos criterios para la selección de las escalas de longitudes en el micromodelo; dichos criterios sirven como guía para la generación de un mapa a partir del cual se construirá el tramo de río a simular, utilizando como insumo principal la fotografía satelital de la zona de estudio. En resumen, el trabajo de diseño en un micromodelo consta en seleccionar una escala de longitud horizontal, evaluar en que rangos se encontrara una probable escala de longitud vertical y en la generación del mapa.



3.3.1 Selección de la escala de longitud horizontal

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el criterio para la selección de las escalas de longitudes en el micromodelo se hace de manera distinta a como se realiza en los modelos de fondo móvil convencionales. Determinar las escalas de longitudes en el micromodelo consiste, en decidir primero la magnitud de la escala de longitud horizontal en función del espacio disponible en la mesa de modelación, mientras que la escala de longitud vertical se establece de manera experimental durante el procedimiento de calibración.

La elección de la escala de longitud horizontal en el micromodelo, se realizó ajustando la imagen satelital de la bifurcación, hasta que ésta pudo ser contenida dentro de la mesa de modelación y en una hoja de 240 cm de largo por 90 cm de ancho, empleando el software de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS®. Para seleccionar la escala de longitud horizontal, se cuidó que el ancho del tramo de río a ser modelado no fuera menor que 38 mm como en micromodelos típicos utilizados por el USACE (Gaines & Maynard, 2001) y también se procuró que el número de escala de longitud horizontal se encontrara entre el rango de usual que va de 1:600 a 1:15,000 (Davinroy R. D., 1999). Con fundamento en los criterios anteriormente mencionados, el valor de la escala de longitud horizontal elegida para el micromodelo fue igual a 1:5,400.

3.3.2 Escala de longitud vertical

La escala de longitud vertical se determina de forma práctica por medio de la calibración, proponiendo distintas magnitudes de ésta, vigilando que sus valores se encuentren entre 1:100 y 1:1,200, de acuerdo con el rango usualmente utilizado en micromodelos de USACE indicado por Davinroy (1999). También se procuró que, al proponer distintos valores de escala de longitud vertical, la distorsión no fuera menor a 6 ni mayor a 22, tal como en varios de los micromodelos estudiados por el USACE (Davinroy et al., 2011). En la Tabla 3.2 se muestran distorsiones con valores entre 5 y 27, con el objetivo de tener un panorama más amplio respecto a la aplicación de las posibles escalas de longitud vertical.



Tabla 3.2 Rango en que se encuentra la escala de longitud vertical del micromodelo y su respectiva distorsión

Escala de longitud vertical, L_{ev}	Distorsión, Ω
1080	5
900	6
675	8
600	9
540	10
450	12
360	15
300	18
270	20
225	24
216	25
200	27
180	30

3.3.3 Generación del mapa

El mapa del micromodelo se elaboró utilizando el software de Sistemas Información Geográfica ArcGIS®, tomando como base la imagen satelital y el levantamiento topobatimétrico de la bifurcación del río Mezcalapa.

La imagen de la bifurcación del río Mezcalapa fue capturada el 25 de marzo de 1997 por el satélite LANDSAT y fue obtenida para este trabajo de tesis a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. La fotografía satelital sirvió para delimitar las márgenes del río, las barras y las islas dentro del cauce, así como para ubicar puentes y obras de protección fluvial, y trazarlas posteriormente en el mapa. Sin embargo, por cuestiones estéticas, la impresión final del mapa de la bifurcación se realizó utilizando como fondo una imagen reciente y de mejor resolución obtenida de Google Earth®, debido a que la imagen satelital de 1997 posee baja calidad visual.

El levantamiento topo-batimétrico proporcionado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, también sirvió para definir y trazar las márgenes del río, así como las islas dentro de su cauce, complementando a la información visualizada en la fotografía satelital.

Puesto que las márgenes y las islas fueron dibujadas de acuerdo con la vista en planta del río en 1997, se puede apreciar en la versión final del mapa como cambió la morfología del río



desde ese año hasta la fecha. El mapa generado para representar el modelo de la bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal se observa en la Figura 3.4.

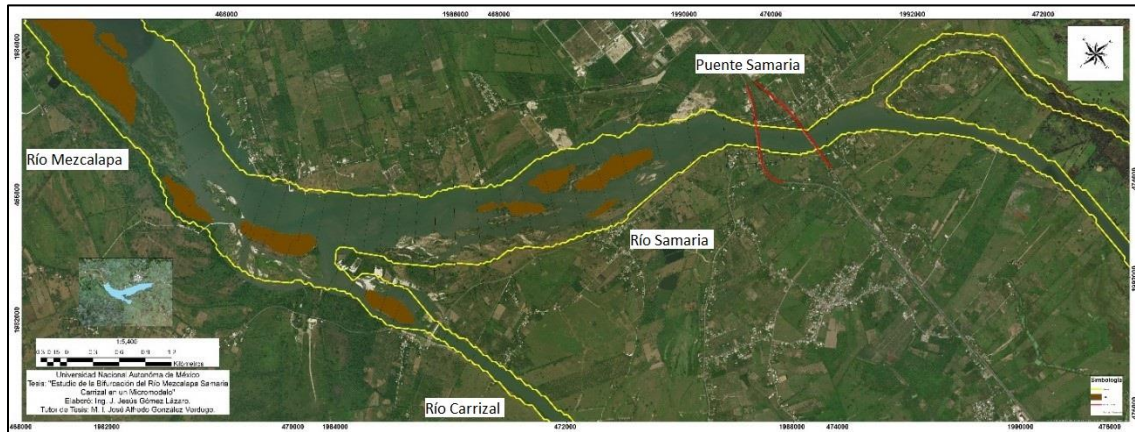


Figura 3.4 Mapa del micromodelo de la bifurcación del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal

3.4 CONSTRUCCIÓN DEL MICROMODELO

El micromodelo del río se construyó a partir del mapa de la zona de estudio, en una placa que se inserta dentro de la plataforma de acrílico que se encuentra sobre la mesa de modelación. En las siguientes líneas, se describen los pasos para llevar a cabo la fabricación del micromodelo de la bifurcación del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal:

1. Impresión del mapa. Se realizó en una lámina de vinil de 0.90 m de ancho por 2.40 m de largo, pues este tamaño fue el disponible en el mercado. La impresión se realizó a color y es a prueba de agua debido a las propiedades del material del que se encuentra fabricada.
2. Corte del mapa. Este proceso fue llevado a cabo por un prestador de servicios, utilizando una cortadora láser de alta precisión. Para llevar a cabo esta acción, fue necesario convertir los vectores que conforman el trazo de las márgenes y las islas del cauce a formato “.dwg” del programa AutoCAD®, ya que el software controlador de la cortadora láser reconoce las líneas de corte mediante este tipo de archivo.



Figura 3.5 Mapa impreso de la zona de estudio



3. Corte de la placa para dar forma a la cubeta del río. Esta actividad se hizo a partir del mapa recortado de la zona de estudio. En primer lugar, se adquirieron dos placas de poliestireno cuyas medidas son 1.22 m de ancho, 2.44 m de largo y 5.08 cm de espesor. Posteriormente, se unieron las dos placas de poliestireno a fin de que juntas sumaran poco más 10 cm de espesor y se pegó sobre ellas la impresión del mapa con el río recortado. Por último, tomando como molde la impresión del mapa recortado, se procedió a cortar con herramientas de mano una zanja para formar un canal en la placa de poliestireno, a una profundidad aproximada de 7.5 cm para representar a la cubeta del río (Ver Figura 3.6).



Figura 3.6 a) Trazo de las fronteras del río en la placa de poliestireno y b) Corte de la placa de poliestireno para dar forma a la cubeta del río

4. Colocación de la placa. La placa de poliestireno se recortó para que pudiera caber en 1 m de ancho que mide la caja de acrílico sobre la mesa de modelación. Después de ser colocada, la placa se selló con silicón dentro del canal que representa al río, así como en los puntos de entrada y salida de flujo en el modelo, con el fin de evitar fugas de agua. Es importante señalar, que la placa de poliestireno solo fue sobrepuesta en la mesa de micromodelación, es decir, que no se fijó permanentemente, con el propósito de aprovechar dicha mesa para futuros micromodelos (Ver Figura 3.7).



Figura 3.7 a) Placa de poliestireno cortada a lo ancho para ajustarla a la caja de poliestireno y b) Placa de poliestireno sobrepuesta en la mesa de modelación



5. Instalaciones de entrada y salida de flujo. Se construyeron tres recipientes de acrílico para una entrada y las dos salidas de flujo que tiene el micromodelo de la bifurcación. El recipiente de entrada posee la función de amortiguar la energía del flujo que proviene de la fuente de alimentación, y los dos recipientes restantes cumplen con encausar la corriente hacia su respectiva tubería de salida para que el flujo llegue al tanque de almacenamiento y el agua pueda ser recirculada. También se colocó al inicio de cada una de estas dos tuberías de salida, una reducción excéntrica de policloruro de vinilo (PVC) con el fin de evitar la acumulación de agua que pudiera provocar un remanso hacia el modelo, dichas reducciones se sellaron con silicón en su unión a los recipientes de acrílico y se conectaron al resto de la tubería de salida. Para finalizar, se fabricaron dos trampas de sedimento utilizando una fina malla de plástico, y se fijó cada una de estas mediante pequeñas prensas al extremo inicial de cada una de las dos reducciones de PVC. Las acciones realizadas en este proceso pueden apreciarse en la Figura 3.8.

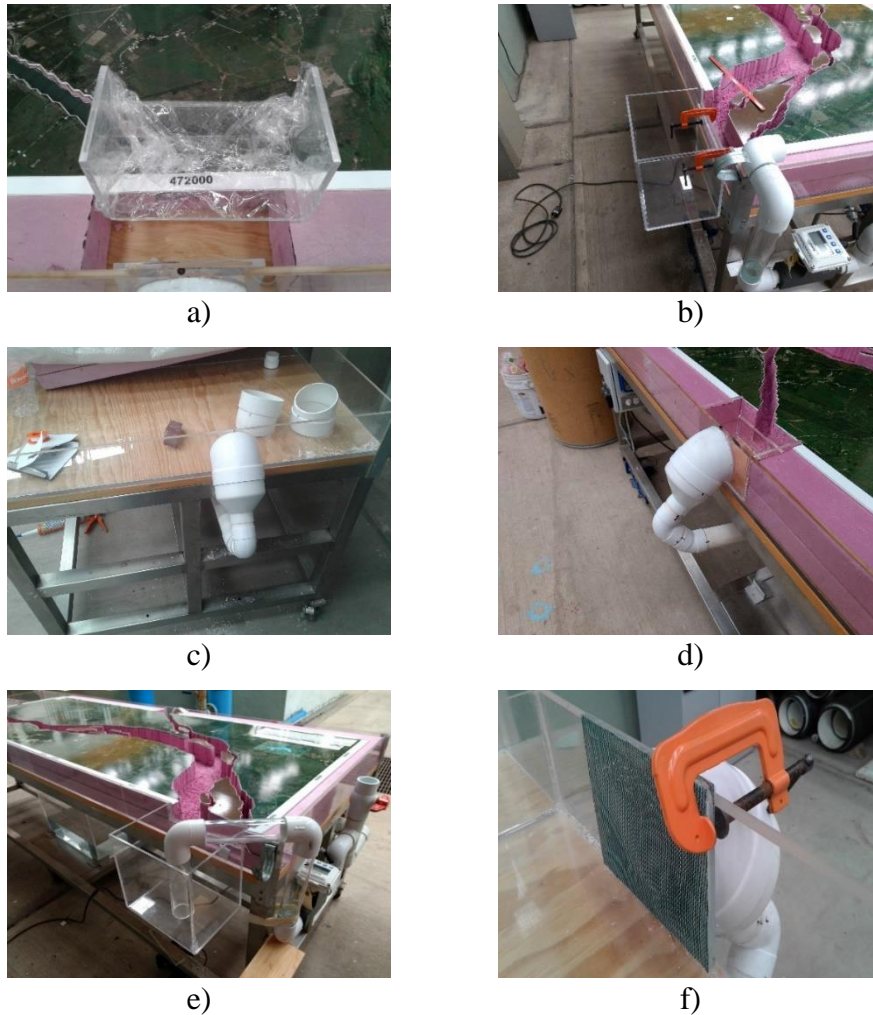


Figura 3.8 a) Recipiente de acrílico para una de las salidas del modelo, b) Colocación de recipiente de acrílico a la entrada del modelo, c) Instalación de reducción excéntrica de PVC, d) Salida del modelo concluida en la parte del río Carrizal, e) Entrada de flujo al modelo y f) Trampa de sedimento para una de las salidas del modelo



3.5 CÁLCULO DE LAS VARIABLES Y LOS PARÁMETROS DEL TRAMO DE ESTUDIO

Antes de iniciar el trabajo experimental es preciso que se obtengan ciertas variables y parámetros del río (prototipo) para escalarlos y reproducirlos en el modelo. El parámetro que es necesario definir en el cauce es la pendiente media, mientras que la variable del río que es preciso calcular es el gasto formativo; los cuales tienen que establecerse en el micromodelo antes de cada simulación. A continuación, se muestran los criterios tomados para el cálculo, así como los resultados obtenidos al determinar la pendiente media y el gasto formativo en el prototipo.

3.5.1 Pendiente media

Aparicio (1989) menciona tres métodos para obtener la pendiente media de un cauce:

- a) Donde la pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta.
- b) En el que la pendiente media es la de una línea recta que, apoyándose en el extremo de aguas abajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y abajo de dicha línea.
- c) El de Taylor y Schwarz, que proponen calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión.

Para evaluar la pendiente media del sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal, se dividió a la bifurcación en dos partes, es decir, se consideró al Mezcalapa-Carrizal como un río y al Mezcalapa-Samaria como otro, coincidiendo ambos en el tramo inicial perteneciente a la corriente del Mezcalapa. Posteriormente, se trazaron los ejes correspondientes a cada uno de los dos cauces en el levantamiento topo-batimétrico y se dibujaron sus respectivos perfiles longitudinales empleando el software AutoCAD Civil 3D®. La información extraída de los perfiles longitudinales sirvió para determinar la pendiente de cada tramo por los métodos a) y b), como se explica en las siguientes líneas.

- a) El cálculo se realizó, empleando la siguiente fórmula:

$$S = \frac{|H_f - H_i|}{L} \quad (3.1)$$

Donde

S : Pendiente media;



H_f : Elevación final (msnm);

H_i : Elevación inicial (msnm);

L : Longitud (m).

En la que se sustituyeron sus términos, con los valores obtenidos del perfil longitudinal del cauce que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores para el cálculo de la pendiente media por el método a)

Tramo	Elevación inicial, H_i (msnm)	Elevación final, H_f (msnm)	Distancia, L (m)
Mezcalapa-Carrizal	16.15	13.73	4,891.08
Mezcalapa-Samaria	16.15	11.95	8,053.14

Y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Tramo Mezcalapa-Carrizal

$$S = \frac{|H_f - H_i|}{L} = \frac{|16.15 - 13.73|}{4891.08} = 0.0005$$

- Tramo Mezcalapa-Samaria

$$S = \frac{|H_f - H_i|}{L} = \frac{|16.15 - 11.95|}{8053.14} = 0.0005$$

Por último, el promedio de la pendiente media de los dos tramos dio como resultado 0.0005.

- b) Para evaluar la pendiente media por el segundo método, se exportaron las coordenadas (cadenamiento y elevaciones) del perfil longitudinal de cada tramo de río a hojas de cálculo del programa Excel®. Con el cadenamiento y las elevaciones obtenidas se calcula el área debajo de la curva que define el perfil de cada cauce por el método de los trapecios empleando la Ecuación (3.2), cabe mencionar que para llevar a cabo el cálculo, es necesario dividir cada uno de los perfiles en intervalos definidos por incrementos constantes en el cadenamiento, cuantificar el área para cada uno de dichos intervalos y realizar la sumatoria de las áreas calculadas para su respectivo cauce.



$$AT = \frac{b(H_1 + H_2)}{2} \quad (3.2)$$

Donde

AT : Área del Trapecio (m^2);

b : Distancia entre cadenamientos (m);

H_1 : Elevación 1 (msnm);

H_2 : Elevación 2 (msnm).

Para obtener la pendiente media ponderada, es necesario modificar la Ecuación (3.2) despejando el valor H_1 , como se muestra en la Ecuación (3.3) y aplicarla sustituyendo los valores de la Tabla 3.4 para hacer el cálculo en cada tramo de río. Se debe notar que al calcular el valor de H_1 , se obtiene la altura de un trapecio que tendría un área similar a la existente bajo la curva que conforma el perfil longitudinal de su respectivo cauce.

$$H_1 = \frac{2AT}{b} - H_2 \quad (3.3)$$

Tabla 3.4 Valores para el cálculo de H_1

Tramo	Elevación final, H_2 (msnm)	Distancia entre cadenamientos, b (m)	Área del trapecio, AT (m^2)
Mezcalapa-Carrizal	13.73	4,891.08	74,968.94
Mezcalapa-Samaria	11.75	8,053.14	116,480.90

La pendiente media ponderada para cada tramo resulta al sustituir en la Ecuación (3.1), los valores mostrados en la Tabla 3.5, donde H_1 equivaldría a H_i mientras H_2 sustituiría al valor de H_f .

Tabla 3.5 Valores para el cálculo de la pendiente media por el método b)

Tramo	Elevación inicial, H_i (msnm)	Elevación final, H_f (msnm)	Distancia, L (m)
Mezcalapa-Carrizal	16.93	13.73	4,891.08
Mezcalapa-Samaria	16.98	11.95	8,053.14



Los resultados del cálculo se muestran a continuación.

- Tramo Mezcalapa-Carrizal

$$H_1 = \frac{2(74,968.94)}{4,891.08} - 13.73 = 16.93$$

$$S = \frac{|H_f - H_i|}{L} = \frac{|16.93 - 13.73|}{4891.08} = 0.0007$$

- Tramo Mezcalapa-Samaria

$$H_1 = \frac{2(116,480.90)}{8,053.14} - 11.95 = 16.98$$

$$S = \frac{|H_f - H_i|}{L} = \frac{|16.98 - 11.95|}{8053.14} = 0.0006$$

Al promediar las pendientes medias ponderadas de los dos tramos, se obtiene como resultado un valor de 0.0006.

En las siguientes figuras se muestran las gráficas del perfil longitudinal, la pendiente media calculada por el método a) y la pendiente media ponderada calculada por el método b), del tramo Mezcalapa-Carrizal, así como para el tramo Mezcalapa-Samaria.

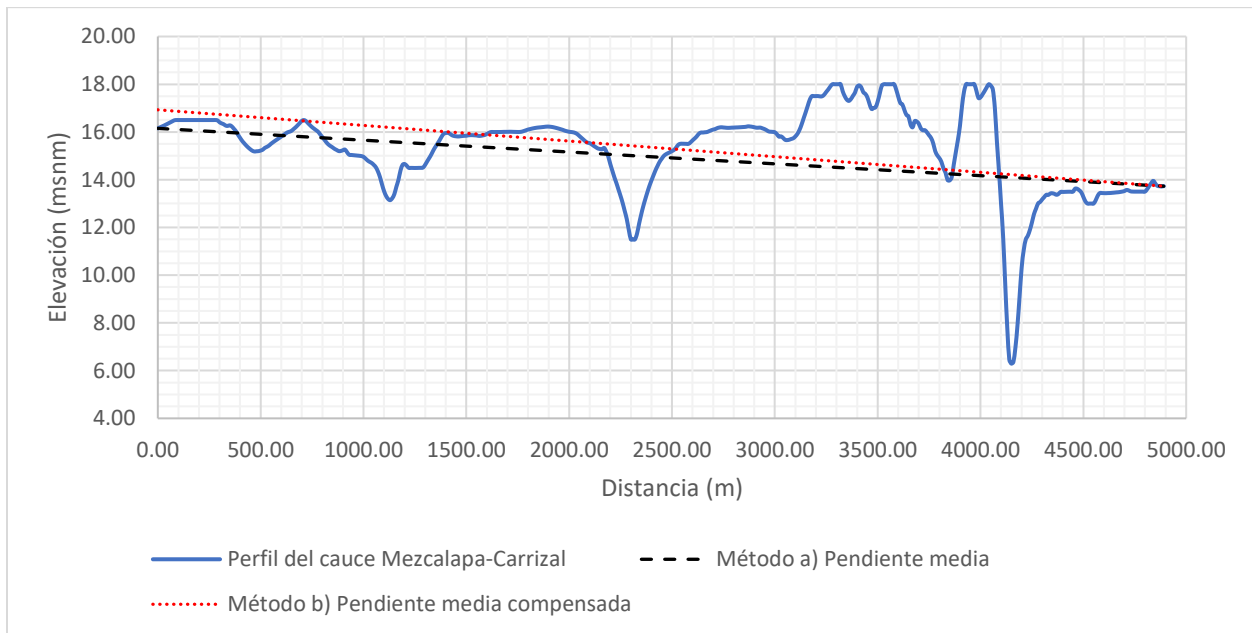


Figura 3.9 Gráfica del perfil longitudinal y las pendientes medias del cauce Mezcalapa-Carrizal

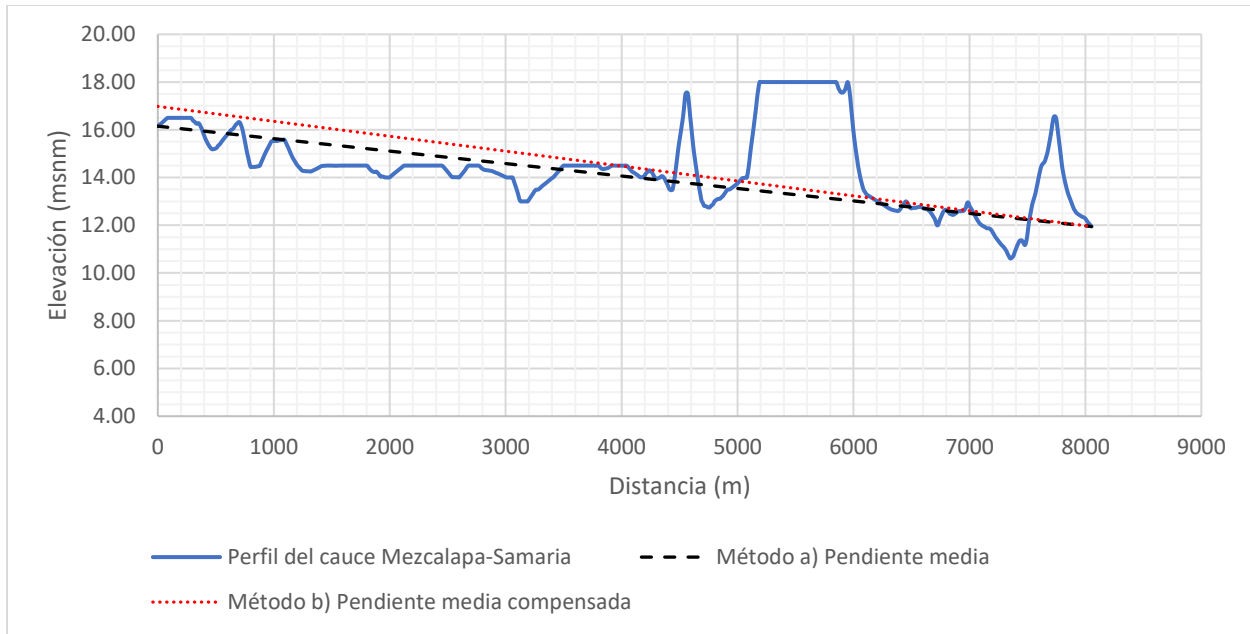


Figura 3.10 Gráfica del perfil longitudinal y las pendientes medias del cauce Mezcalapa-Samaria

En el estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2016), para el tramo del Mezcalapa-Carrizal se indica que se obtuvo una pendiente con valor 0.00033, mientras que en el tramo del Mezcalapa-Samaria la pendiente observada fue de 0.00044. Es necesario aclarar que las longitudes de cada tramo en el trabajo realizado por el IMTA son mayores que las tomadas en cuenta para el presente estudio, además de que el Instituto empleó para su análisis datos de una fecha más reciente.

3.5.2 Gasto formativo

A diferencia de los modelos de fondo móvil convencionales, en micromodelos recientes de USACE, en lugar de utilizar hidrogramas para administrar flujo gradualmente variado durante la modelación, las simulaciones se llevan a cabo bajo condiciones de flujo permanente. Es por este motivo que se eligió calcular el gasto formativo en el prototipo y escalarlo posteriormente en el modelo (Ver Capítulo 4), ya que resume en un solo valor constante la cantidad de flujo necesaria para darle forma al cauce. Es en sí el mismo concepto de gasto formativo, el que ayudó a determinar que este fuera elegido para llevar a cabo los trabajos de modelación, puesto que la forma de fondo del micromodelo (como se menciona en el capítulo anterior) se obtiene a través de la hidrodinámica del flujo. Con el propósito de dar mayor claridad al concepto de gasto formativo, se muestra su definición en palabras de Ramírez-Muñoz (2004):



“El gasto formativo es el escurrimiento representativo del régimen hidrológico que actúa en un cauce natural, y que por sus características de calidad, magnitud y recurrencia, es el responsable de la mayor parte del proceso gradual de conservación o modificación de las fronteras sólidas del canal natural a lo largo del tiempo.”

Los métodos más comunes para el cálculo del gasto formativo son (Aparicio Mijares, Ramírez Muñoz, & Mejía Zermeño, 2010):

- a) Gasto del cauce principal o capacidad máxima del cauce principal (CMCP). Que considera al gasto formativo como el gasto que puede transportar el cauce principal de una corriente aluvial sin desbordar a las planicies de inundación. Es importante mencionar que este método solo puede emplearse en corrientes aluviales.
- b) Gasto asociado a un periodo de retorno determinado. En este método, el gasto formativo se supone equivalente a la capacidad máxima del cauce y se calcula para un periodo de retorno fijo mediante el análisis estadístico de los registros hidrométricos.
- c) Gasto dominante / gasto efectivo. Estima que es el gasto que realiza la mayor cantidad del trabajo formativo en el cauce, dentro del conjunto de escurrimientos que se presentan en un determinado periodo de tiempo. El parámetro más utilizado para evaluar la magnitud y recurrencia del gasto dominante es el transporte de sedimentos en el fondo del cauce, y debido a ello, también es el método que mayor cantidad de información requiere, tales como: Secciones transversales, datos hidrométricos y aforo de sedimentos.

Tomando en cuenta la información disponible del sitio, así como la simplicidad del cálculo, se eligió obtener el gasto formativo del prototipo, asociándolo a un periodo de retorno determinado. Otro factor que influyó en la elección de emplear este método es la conveniencia de que en cada una de las simulaciones en el micromodelo se puede utilizar un valor diferente de gasto, pues el período de retorno para determinar el gasto formativo varía según el criterio de distintos autores en un rango que va desde 1 a 7 años (Ramírez-Muñoz, 2004).

La información hidrométrica utilizada para los cálculos se tomó de dos estaciones: Samaria, ubicada a casi 7 km aguas abajo de la bifurcación sobre el cauce y el puente que llevan el mismo nombre de la estación; y González, que se localiza sobre el río Carrizal aguas abajo de la bifurcación y aproximadamente a 16 km de la ciudad Villahermosa.

El cálculo del gasto formativo se realizó empleando los gastos máximos diarios registrados en cada una de las dos estaciones hidrométricas, buscando que dichos gastos existieran y coincidieran en fecha en ambos puntos de aforo, para después sumarlos y obtener el gasto máximo



mensual, así como el gasto máximo anual ocurrido en el sistema. Cabe mencionar que el grupo de datos empleados para los cálculos pertenece a los rangos de los años 1958-1986 y 1993-1999, debido a que solo para esos años se encontraron registros coincidentes en fecha para ambas estaciones hidrométricas. Posteriormente, la serie de los gastos máximos anuales sirvió para asignarle valor a un determinado periodo de retorno T_R aplicando la ecuación (3.4). La serie de gastos máximos anuales agrupados por fecha, por estación hidrométrica donde fueron registrados y de acuerdo con su determinado periodo de retorno, pueden observarse en el Anexo A.

$$T_R = \frac{n + 1}{m} \tag{3.4}$$

Donde

T_R : Periodo de retorno (años);

m : Número de orden en una lista de mayor a menor de los datos;

n : Número de datos.

Después de haber asignado el periodo de retorno a los gastos máximos anuales registrados, se buscó una *Función de Distribución de Probabilidad Teórica* que se ajustara mejor a los datos. De entre las funciones *Normal*, *Log Normal 3 Parámetros*, *Exponencial 1 Parámetro*, *Exponencial 2 Parámetros*, *Pearson III* y *Gumbel*, la más conveniente resultó ser la *Log Normal 2 Parámetros*, cuya selección se basó en los resultados obtenidos de los cálculos por el método del Error Estándar de Ajuste y por la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (Ver Tabla 3.6).

Tabla 3.6 Selección de la Función de Distribución de Probabilidad Teórica que mejor se ajusta a los gastos máximos anuales registrados

Prueba de ajuste		Normal	Log Normal 2 Parámetros	Log Normal 3 Parámetros	Exponencial 1 Parámetro	Exponencial 2 Parámetros	Pearson III o Gamma 3 Parámetros	Gumbel
Kolmogorov-Smirnov	d	0.2178	0.2178	0.2178	0.2178	0.2178	0.2178	0.2178
	D	0.1300	0.0917	0.1134	0.4152	0.5057	0.1039	0.0904
	Estatus	Aceptada	Aceptada	Aceptada	No aceptada	No aceptada	Aceptada	Aceptada
Error estándar de ajuste		179.1882	134.5249	148.8611	1587.2972	231.4688	137.7700	151.6662



Mediante la interpolación de la *Función de Distribución de Probabilidad Teórica “Log Normal 2 Parámetros”*, que fue la que mejor se ajustó a los gastos máximos anuales, se determinó el gasto formativo del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal para los periodos de retorno mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 3.7 Gasto formativo del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal para distintos periodos de retorno

Periodo de retorno, T_R (Años)	Gasto formativo (m^3/s)
1.4	2184.48
1.5	2274.51
2	2586.76
3	2941.88
4	3164.05
5	3325.99
7	3558.19



4 EXPERIMENTACIÓN

4.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental comprende desde el propio micromodelo, hasta los materiales, equipos y dispositivos de medición para llevar a cabo las actividades de modelación. Dicha instalación experimental, se encuentra dentro del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en el Laboratorio de Hidráulica “Enzo Levi”, aunque por su pequeño tamaño, la instalación experimental podría trasladarse convenientemente a cualquier otro sitio para realizar los trabajos de modelación.

En el Capítulo 2 ya se hizo mención de los materiales, equipos y dispositivos de medición utilizados por el USACE para el desarrollo de sus estudios en micromodelos, por lo que en este subcapítulo se enlistarán los recursos con los que cuenta el Laboratorio de Hidráulica “Enzo Levi” para realizar dichas actividades de modelación.

4.1.1 Material y equipo

A continuación, se enlistan y se describen los materiales y equipos existentes en el laboratorio para realizar el modelado:

- a) Mesa de micromodelación. Constituida por un esqueleto de acero inoxidable, se encuentra formada en su parte superior por una placa de madera que soporta una caja de acrílico y en cada una de sus cuatro patas tiene una rueda para facilitar su transporte. La función principal de la mesa es albergar al micromodelo de río, así como contener los componentes necesarios para llevar a cabo las pruebas tales como: el tanque de alimentación hidráulica, la bomba sumergible, la tubería para la circulación del flujo, las válvulas reguladoras, el caudalímetro electromagnético y los gatos eléctricos. Las dimensiones de la mesa de micromodelación son 3 m de largo, 1 m de ancho y 95 cm de alto.
- b) Gabinete de resguardo. Alberga el centro de carga para la alimentación eléctrica de la bomba sumergible, de los gatos eléctricos y del caudalímetro electromagnético, también contiene al datalogger que forma parte del sistema de medición de flujo. Está ubicado sobre un costado de la mesa de micromodelación.



Figura 4.1 Mesa de micromodelación

- c) Tanque o depósito de alimentación hidráulica. Fabricado en su totalidad de acrílico y cuyo objetivo es el almacenamiento y la regulación del agua que debe ser proporcionada al modelo. Se localiza en la parte inferior de la mesa de micromodelación. Posee 60 cm de ancho, 60 cm de largo y 40 cm de alto, con una capacidad de almacenamiento de hasta 126 litros.
- d) Bomba sumergible. Su propósito es suministrar energía cinética al agua para transportarla al micromodelo y se encuentra ubicada dentro del depósito de alimentación hidráulica. Es capaz de aportar un gasto de hasta 8,500 l/h, la altura a la que puede elevar el flujo es de hasta 5.5 m, soporta una temperatura máxima en el fluido de 35° C y se alimenta de corriente alterna entre los 110-120 V. Se acciona mediante un interruptor colocado en el gabinete de resguardo.



a)



b)

Figura 4.2 a) Tanque o depósito de alimentación hidráulica y b) Bomba sumergible

- e) Gatos eléctricos. Son dos, su función es proporcionarle pendiente al modelo para realizar la experimentación y se encuentran instalados en la parte inferior de las patas ubicadas en el extremo aguas arriba de la mesa de micromodelación. Los gatos eléctricos son de tipo tijera y cada uno de estos tiene una capacidad de cargar hasta 2 toneladas. Se elevan mediante unos controladores localizados en el gabinete de resguardo.



Figura 4.3 a) Gatos eléctricos y b) Controladores de los gatos eléctricos

- f) Urea granular tipo II. Es un plástico utilizado para remover recubrimientos de manera abrasiva en diversos ramos de la industria, es de forma granular y se encuentra disponible en el mercado en distintos tamaños de partícula. El propósito de la Urea es actuar como el sedimento que conforma el fondo móvil en el modelo de río. La Urea empleada en la experimentación poseen una gravedad específica de 1.5 y una distribución del tamaño de sus partículas denominada 12-16 según la especificación militar MIL-P-85891A (Ver Tabla 4.1) publicada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (1992).



Figura 4.4 Urea granular tipo II: a) A granel y b) Dentro del modelo



Tabla 4.1 Distribución del tamaño de partículas 12-16. Fuente: Elaborado a partir de la especificación militar estadounidense MIL-P-858981A

Tamaño de malla estándar en los Estados Unidos	Máximo (%)	
	Retenido	Pasa
10	0.1	-
12	5.0	-
16	-	20.0
20	-	5.0
25	-	-
30	-	-
40	-	-
50	-	-
60	-	-
80	-	-
100	-	1.0

4.1.2 Sistemas de medición

Los sistemas de medición que serán empleados durante los experimentos para la recolección de los datos se muestran y se explican a continuación.

- a) Sistema de medición de flujo. Se compone de un sensor flujo electromagnético, un indicador de flujo y un *data logger*, además de incluir un software para configurar en una PC al *data logger* mencionado anteriormente; el sistema de medición pertenece a la marca comercial Seametrics®. El sensor de flujo electromagnético corresponde al modelo EX800-Series, es de tipo inserción, para una tubería de 1", tiene un rango de medición de gasto entre los 0.04 y 3.09 l/s, mide fluidos con temperaturas entre los 0° y 55° C, detecta velocidades en el flujo que van de 0.04 a 6.09 m/s, tiene una precisión de $\pm 1\%$ y se alimenta de corriente alterna. El indicador de flujo pertenece al modelo FT430, es un microcontrolador que interactúa con la salida de pulso de los sensores de flujo para calcular y mostrar el gasto, totalizar el flujo y generar señales de salida que representan al flujo; se alimenta de corriente alterna. El *data logger* corresponde al modelo DL76, es un registrador de datos que se configura mediante una PC y es capaz de almacenar registros hasta por tres años dependiendo la frecuencia de lectura seleccionada por el usuario; se alimenta con una batería de litio de 3.6 V tipo C. El software FlowInspector® se utiliza para configurar el *data logger*, para descargar y administrar registros de medición, así como para analizar y exportar datos. Los manuales que contienen las especificaciones de los componentes del



sistema de medición se consultaron en la página web de la marca Seametrics®, cuya dirección es <https://www.seametrics.com/>.

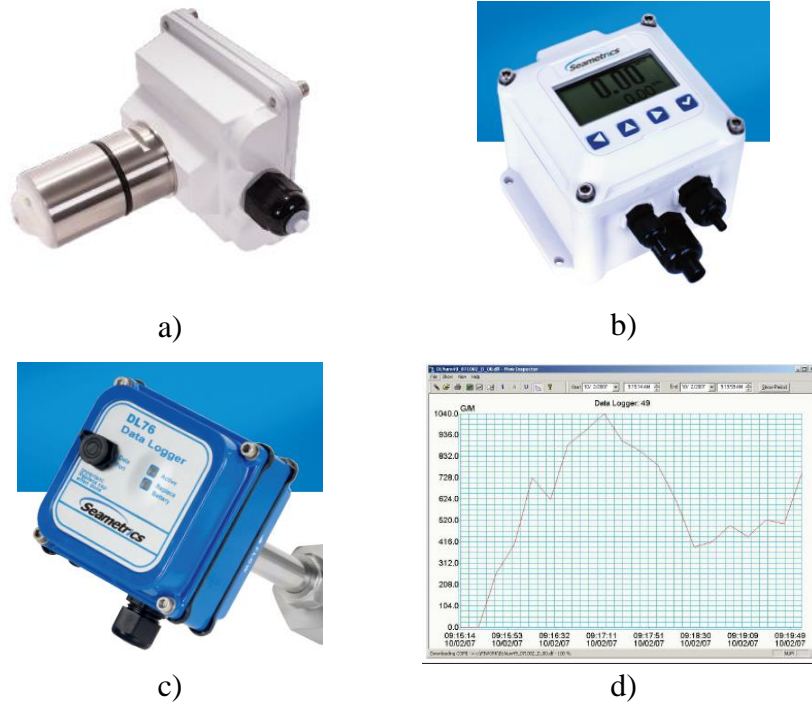


Figura 4.5 Sistema de medición de flujo: a) Sensor de flujo electromagnético EX800-Series, b) Indicador de flujo FT430, c) Data logger DL76 y d) Pantalla principal de FlowInspector®. Fuente: <https://www.seametrics.com/>

- b) Sistema de medición láser tridimensional. Está integrado por un escáner láser 3D y por un brazo de medición portátil fabricados por Hexagon Manufacturing Intelligence®, además del software PolyWorks® desarrollado por la compañía InnovMetric®. El escáner láser modelo RS4 permite la digitalización de puntos de superficies en 3D sin necesidad de contacto, su línea de escaneo horizontal de luz roja tiene una amplitud media de 115 mm, posee una precisión de 28 m, tiene un espaciamiento mínimo entre puntos de 11 m, es capaz de adquirir hasta 752,000 puntos/s, opera en una temperatura de 5° a 40° C y pesa 0.4 kg. El brazo de medición portátil pertenece a la serie Absolute Arm, sirve para sostener el escáner láser 3D y para proporcionarle una mayor flexibilidad al medir, mantiene comunicación alámbrica para la configuración de las mediciones con una PC, está hecho de fibra de carbono, funciona en un rango de temperatura que va de 5° a 40° C, pesa menos de 11 kg y se alimenta de una batería recargable que también le proporciona energía al escáner láser. PolyWorks® es un software de metrología que sirve para procesar los datos de digitalizadores 3D, mediante este programa los puntos medidos con el escáner láser se organizan y se alinean a un sistema de coordenadas tridimensionales, además de que permite visualizar la recolección de dichos puntos en tiempo real (PolyWorks®, 2016).



Los manuales del escáner láser 3D y del brazo de medición portátil se consultaron en la página web del fabricante: <https://www.hexagonmi.com/es-ES>.

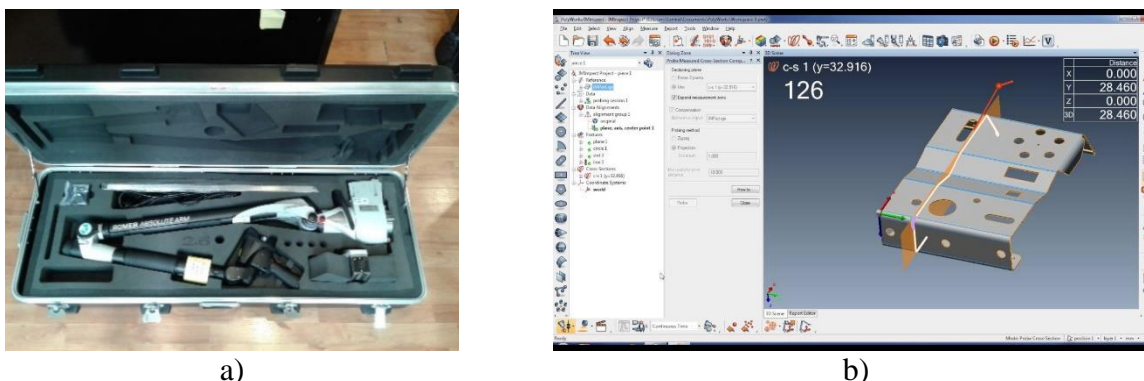


Figura 4.6 Sistema de medición láser tridimensional: a) Escáner láser 3D con brazo de medición portátil y b) Pantalla principal de Polyworks®. Fuente: <https://www.hexagonmi.com/es-ES>

Es importante mencionar que en los estudios de micromodelos realizados por el USACE, se utiliza un Mini Velocímetro Láser *Doppler* para la medición de velocidades y una cámara de video de alta velocidad para la visualización de patrones de flujo, equipo del cual se dispone en el Laboratorio de Hidráulica del IMTA, sin embargo, en los trabajos realizados para el presente proyecto de tesis, se prescindió de su uso, debido a que los alcances se limitaron a la reproducción del fondo de prototipo en el micromodelo, por lo que solo fue necesario el empleo del caudalímetro para la medición del gasto y del escáner láser para el levantamiento topobatimétrico.

4.2 RELACIONES DE ESCALA

Sirven para relacionar los valores de una variable o parámetro característico del prototipo con sus respectiva variable o parámetro característico correspondiente en el modelo, y se obtienen de manera general a partir de la siguiente formula:

$$()_e = \frac{()_p}{()_m} \quad (4.1)$$

Donde

$()$: Representa a la variable o al parámetro de interés.

Y los subíndices quieren decir

e : escala de la variable o parámetro;



p : característica del prototipo;

m : característica del modelo.

A partir de las escalas de longitud, se pueden deducir matemáticamente el resto de las escalas de variables y parámetros que son de interés en la modelación hidráulica, como puede consultarse en los libros “Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo” (Echávez, 1996) y “Técnicas de Modelación en Hidráulica” (Vergara Sánchez, 1993). Los valores de escala pueden variar dependiendo el tipo de modelo que desea estudiarse. Es importante conocer dichos valores de escala para las distintas variables o parámetros de interés que intervengan en algún caso de estudio, pues sirven para determinar estas mismas variables o parámetros en el modelo cuando se tiene información en el prototipo o viceversa. En la Tabla 4.2 se muestran distintos valores de escala para modelos fluviales de acuerdo con en el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (1983).

Las relaciones de escala que deberán ser obtenidas para realizar los trabajos de experimentación, son las que involucran al parámetro de pendiente y a la variable de gasto. Es necesario determinar la magnitud de la pendiente y del gasto en el modelo, debido a que estos dos valores intervienen directamente en el desarrollo de la topobatimetría durante la realización de las pruebas.

Para determinar las relaciones de escala de pendiente y de gasto en el modelo, es preciso contar con sus respectivos valores de prototipo, los cuales ya fueron calculados y pueden ser consultados en el Capítulo 3. También es necesario conocer las magnitudes de las escalas longitudinales, de las cuales, la escala de longitud horizontal ya fue definida desde la fase de diseño; mientras que se propondrán distintos valores de escalas de longitud vertical, para precisar cuál es la que mejores resultados arroja al evaluar la topobatimetría después de las pruebas.



Tabla 4.2 Escalas para modelos fluviales. Fuente: CFE, 1983

Variable	Escala	No distorsionado	Distorsionado
Escalas comunes a modelos de fondo fijo y móvil			
Longitud horizontal	L_{eh}	L_e	L_{eh}
Longitud vertical	L_{ev}	L_e	L_{ev}
Área	A_e	$(L_e)^2$	$(L_{eh})L_{ev}$
Volumen	V_e	$(L_e)^3$	$(L_{eh})^2L_{ev}$
Distorsión	Ω	1	L_{eh}/L_{ev}
Velocidad	V_e	$(L_e)^{1/2}$	$(L_{ev})^{1/2}$
Tiempo	T_e	$(L_e)^{1/2}$	$L_{eh}/(L_{ev})^{1/2}$
Aceleración	a_e	1	L_{ev}/L_{eh}
Gasto	Q_e	$(L_e)^{5/2}$	$(L_{eh})(L_{ev})^{3/2}$
Pendiente	S_e	1	L_{ev}/L_{eh}
Perímetro mojado	P_e^*	P_p/P_m	P_p/P_m
Radio hidráulico	RH_e	$(L_e)^2/P_e$	$(L_{eh})L_{ev}/P_e$
Fuerza	F_e	$(L_e)^3$	$(L_{eh})(L_{ev})^2$
Presión	F_e	L_e	L_{ev}
Número de Reynolds	R_e	$(L_e)^{3/2}$	$(L_{ev})^{3/2}$
Escalas aplicables a modelos de fondo fijo			
Coefficiente de rugosidad de Manning **	n_e	$(L_e)^{1/6}$	$(L_{eh})^{1/6} (L_{ev}/P_e)^{2/3}$
Coefficiente de rugosidad de Chezy	C_e	1	$L_{eh}^{1/2}/RH_e^{1/2}$
Aspereza de la pared	ks_e	L_e	L_{ev}
Escalas aplicables a modelos de fondo móvil			
Velocidad de caída	ω_e	$(L_e)^{1/2}$	
Diámetro de las partículas	D_e	Función de ω_e	
Peso específico	γS_e	Se puede elegir independientemente	
* Si se trata de una sección muy amplia $P_e \approx L_e$ o a L_{eh}			
** En modelos distorsionados de fondo fijo, se puede requerir rugosidad artificial			

A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo para obtener las pendientes y los gastos que serán administrados al modelo.

4.2.1 Pendientes

Las pendientes en el micromodelo se definieron a partir de la ecuación (4.1), de la que fue necesario despejar el término del parámetro característico del modelo, resultando la fórmula que se muestra a continuación.



$$S_m = \frac{S_p}{S_e} \quad (4.2)$$

Donde

S_m : Pendiente del modelo;

S_p : Pendiente del prototipo;

S_e : Escala de pendiente.

La pendiente del prototipo S_p que se substituyó en la ecuación (4.2) tiene un valor igual a 0.0005 y se calculó de acuerdo con la metodología empleada en el Capítulo 3 al aplicar el método a).

Los valores de la escala de pendiente fueron calculados empleando la ecuación (4.3) para un modelo fluvial distorsionado (Ver Tabla 4.2).

$$S_e = L_{ev}/L_{eh} \quad (4.3)$$

Donde

L_{ev} : Escala de longitud vertical;

L_{eh} : Escala de longitud horizontal.

La escala de longitud horizontal tiene un valor fijo igual a 5,400; mientras que, como se explicó anteriormente, para la escala de longitud vertical se propusieron diferentes magnitudes, que son mostradas en la primera columna de la Tabla 4.3.

Las pendientes en el micromodelo que resultaron aplicando la ecuación (4.2) también se muestran en la Tabla 4.3.



Tabla 4.3 Pendientes en el micromodelo

Escala de longitud vertical, L_{ev}	Distorsión, Ω	Escala de pendiente, S_e	Pendiente en el micromodelo, S_m	Elevación de la mesa (cm)
1080	5	0.2000	0.0025	0.8
900	6	0.1667	0.0030	0.9
675	8	0.1250	0.0040	1.2
600	9	0.1111	0.0045	1.4
540	10	0.1000	0.0050	1.5
450	12	0.0833	0.0060	1.8
360	15	0.0667	0.0075	2.3
300	18	0.0556	0.0090	2.7
270	20	0.0500	0.0100	3.0
225	24	0.0417	0.0120	3.6
216	25	0.0400	0.0125	3.8
200	27	0.0370	0.0135	4.1
180	30	0.0333	0.0150	4.5

4.2.2 Gastos

También los gastos en el micromodelo se determinaron con base en la ecuación (4.1), a través del despeje del término de la variable característica del modelo, como se muestra en la ecuación (4.4).

$$Q_m = \frac{Q_p}{Q_e} \quad (4.4)$$

Donde

Q_m : Gasto en el modelo;

Q_p : Gasto en el prototipo;

Q_e : Escala de gasto.

El término de la ecuación anterior que hace referencia a los gastos en el prototipo fue establecido de acuerdo con los gastos formativos calculados en el Capítulo 3 (Ver Tabla 3.7), lo cual quiere decir que se cuentan con distintas magnitudes de gastos en el prototipo.



Los valores de las escalas de gasto fueron obtenidos utilizando la ecuación (4.5) para un modelo fluvial con distorsión (Ver Tabla 4.2).

$$Q_e = (L_{eh})(L_{ev})^{3/2} \tag{4.5}$$

Los mismos valores de las escalas longitudinales del micromodelo que se emplearon para el cálculo de las escalas de pendiente, fueron utilizados para obtener las escalas de gasto.

Empleando las distintas escalas de gasto y los múltiples valores de gasto formativo asociados a diferentes periodos de retorno, se estimaron los gastos en el micromodelo mostrados en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Gastos en el micromodelo de acuerdo con distintos valores de gasto formativo y con sus respectivas escalas de gasto

Escala de longitud vertical, L_{ev}	Distorsión, Ω	Escala de gasto, Q_e	Gasto en el micromodelo, Q_m (l/s)						
			0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
1080	5	191,659,077.32	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
900	6	145,800,000.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
675	8	94,699,877.90	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
600	9	79,363,467.67	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
540	10	67,761,716.63	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
450	12	51,548,084.35	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
360	15	36,884,806.63	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10
300	18	28,059,223.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
270	20	23,957,384.67	0.09	0.09	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
225	24	18,225,000.00	0.12	0.12	0.14	0.16	0.17	0.18	0.20
216	25	17,142,509.02	0.13	0.13	0.15	0.17	0.18	0.19	0.21
200	27	15,273,506.47	0.14	0.15	0.17	0.19	0.21	0.22	0.23
180	30	13,040,748.44	0.17	0.17	0.20	0.23	0.24	0.26	0.27
Gasto formativo del río, Q_p (m³/s)			2184.48	2274.51	2586.76	2941.88	3164.05	3325.99	3558.19
Período de retorno, T_R (Años)			1.4	1.5	2	3	4	5	7

4.3 PRUEBAS

Las pruebas en el micromodelo se realizaron con el propósito de observar el comportamiento del fondo respecto a la dinámica del flujo. Durante la experimentación se probaron en el micromodelo varios valores de escalas de longitud vertical, lo que implicó también que existieran diferentes magnitudes de distorsión, escalas de gasto, escalas de pendiente, gastos



y pendientes. El objetivo de realizar pruebas con distintos valores de escalas de longitud vertical es el de apreciar cuál de estas escalas verticales en conjunto con una magnitud de gasto formativo, reproducen una topobatimetría en el micromodelo más parecida a la que se tiene en prototipo. A continuación, se describe como se estructuraron las series de pruebas realizadas en el modelo, así como la metodología utilizada para el desarrollo experimental.

4.3.1 Series

Los gastos y las pendientes en el micromodelo ya fueron calculados en la sección 4.2 Relaciones de escala, sin embargo, para la correcta operación del modelo solo algunos valores fueron considerados para la experimentación como se leerá más adelante.

Para organizar las series de pruebas, se contemplaron escalas de longitud vertical con valores entre 200 y 450, debido a que valores de escala más pequeños equivalen a pendientes más pronunciadas, lo que provoca que el flujo deje de circular por la corriente que representa al río Carrizal en el micromodelo; mientras que valores de escala más grandes a los mencionados, arrojan gastos más pequeños de los que es capaz de medir el caudalímetro instalado en el modelo.

Para la modelación solo fueron considerados los gastos formativos del prototipo asociados a los periodos de retorno de 1.4, 2, 4 y 7 años que pueden observarse en la Tabla 4.4, con el fin de manejar valores con intervalos un poco más amplios entre los gastos modelados.

El último paso para estructurar las series de pruebas consiste en evaluar la congruencia de la configuración del fondo entre modelo y prototipo, a través de prueba y error. Es decir, que se fueron proponiendo diferentes valores de escala de longitud vertical (cada uno relacionado a un valor de distorsión y pendiente) y gastos al micromodelo, así como realizando distintos cambios en la configuración en planta al modelo de río, hasta obtener una topobatimetría parecida a la del prototipo, resultando las series que se muestran en la Tabla 4.5 y cuyas características se listan a continuación:

- Serie 1. Con escala de longitud vertical igual a 450 y gastos en el modelo con un rango de 0.04 a 0.07 l/s. Sus gastos demasiado pequeños no generaron movimientos significativos en el fondo del modelo, por lo que las mediciones realizadas después de cada prueba ni siquiera fueron presentadas en la sección de resultados. Haber realizado las pruebas concernientes a esta serie, sirvió para tomar la decisión de aumentar el gasto en las series posteriores.



- Serie 2. Con escala de longitud vertical igual a 225 y gastos en el modelo con un rango de 0.12 a 0.20 l/s. Se observaron movimientos satisfactorios en el fondo del modelo para las secciones correspondientes al río Mezcalapa y al río Samaria, sin embargo, no sucedió lo mismo en las secciones del río Carrizal.
- Serie 3. Con escala de longitud vertical y un rango de gastos en el modelo iguales a los de la Serie 2. Se cambio la configuración en planta del modelo respecto al diseño original, con el propósito de motivar movimiento en el fondo del tramo que representa al río Carrizal, dicho cambio consistió en quitar la isla ubicada en el margen derecho (viéndolo con dirección aguas abajo) del río Mezcalapa y encerrada en el círculo color naranja de la Figura 4.7.

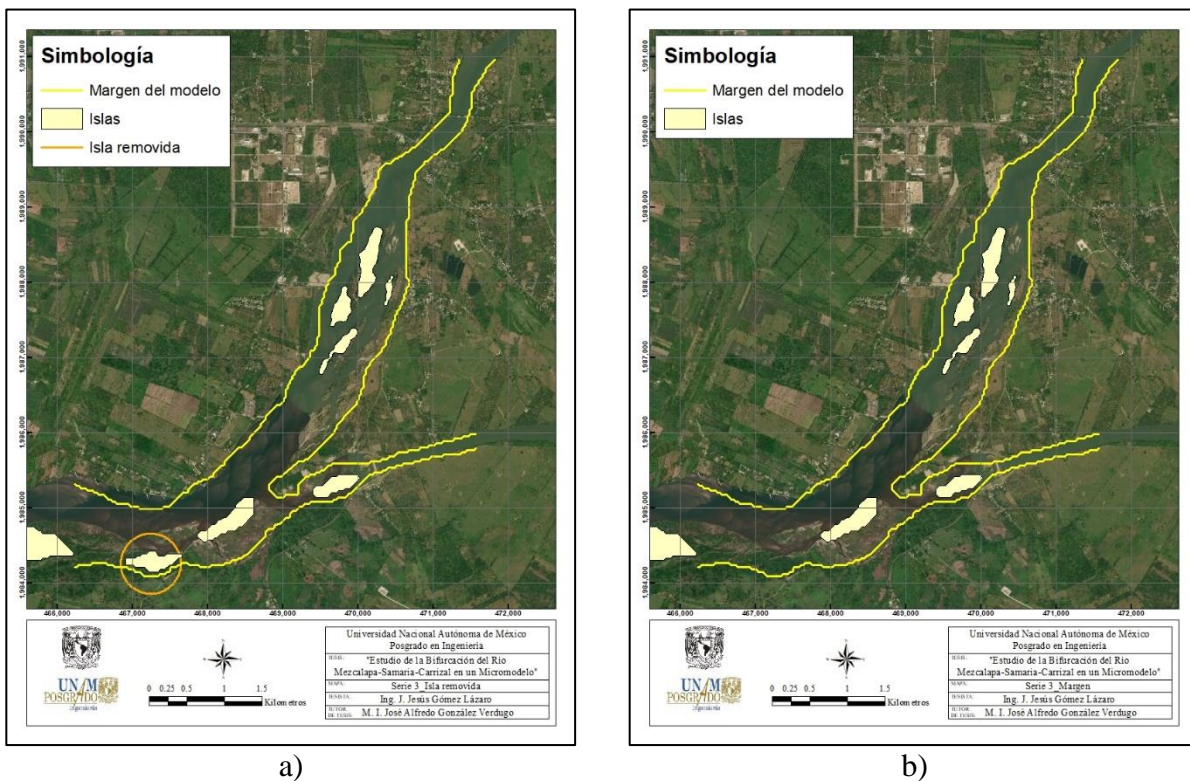


Figura 4.7 Cambio de configuración en planta para la Serie 3: a) Isla removida; b) Margen e islas resultantes

- Serie 4. Con escala de longitud vertical y un rango de gastos en el modelo iguales a los de la Serie 2. También se modificó la configuración en planta del micromodelo, pero en este caso, la isla del río Mezcalapa (encerrada en el círculo color naranja) se unió a la margen derecha en vez de eliminarse como en la Serie 3, además de que se rectificaron otros márgenes en el modelo (encerradas en los círculos rojos), como puede apreciarse en la Figura 4.8.

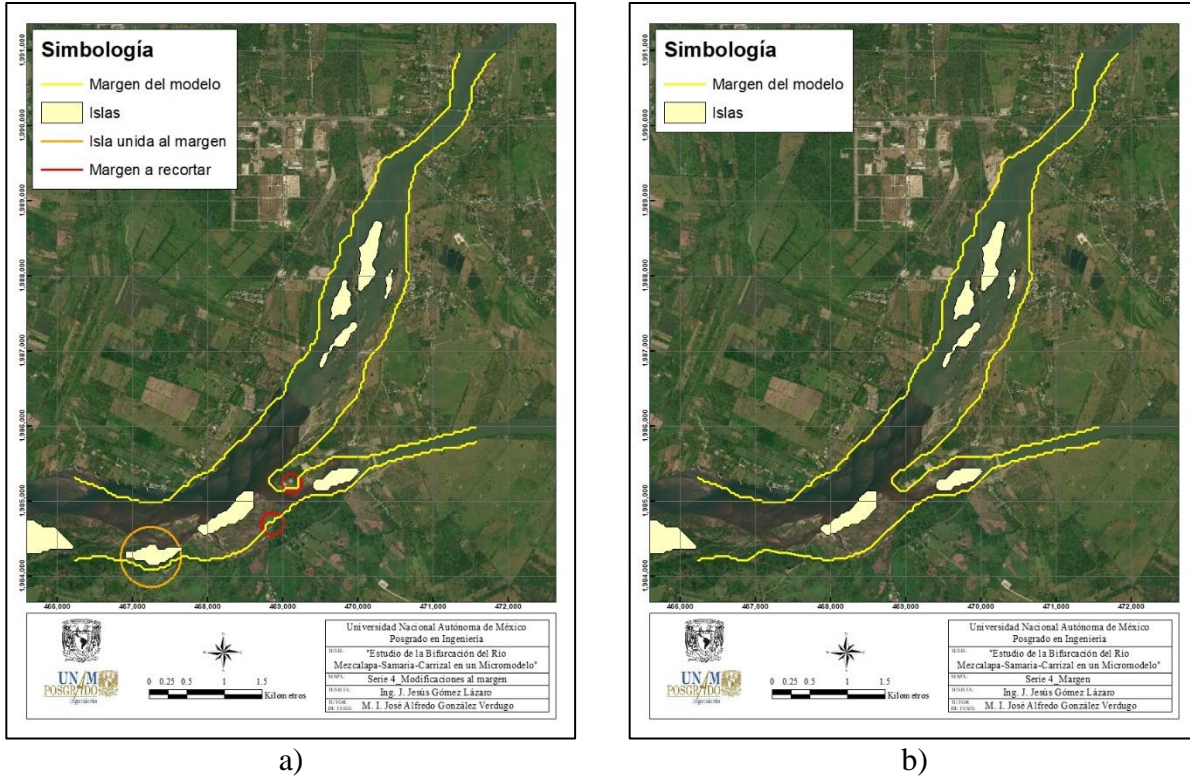


Figura 4.8 Cambio de configuración en planta para la Serie 4: a) Modificaciones al margen; b) Margen e islas resultantes

Con cuatro series de experimentos y cuatro gastos para cada una de estas, se tienen dieciséis pruebas para determinar cuál de ellas aporta una mejor aproximación a la topobatemetría del prototipo. En la Tabla 4.5 se muestran las series de pruebas bajo las que se realizó la experimentación.

Tabla 4.5 Series de pruebas experimentales en el micromodelo

Serie	Escala de longitud vertical, L_{ev}	Distorsión, Ω	Pendiente en el Micromodelo, S_m	Elevación de los gatos (cm)	Elevación de la mesa (cm)	Gasto en el micromodelo, Q_m (l/s)			
						0.04	0.05	0.06	0.07
1	450	12	0.006	1.8	96.4	0.04	0.05	0.06	0.07
2	225	24	0.012	3.6	98.2	0.12	0.14	0.17	0.20
3									
4									
Gasto formativo del río, Q_p (m^3/s)						2184.48	2586.76	3164.05	3558.19
Período de retorno, T_R (Años)						1.4	2	4	7



4.3.2 Metodología

El procedimiento mediante el que se llevaron a cabo los experimentos se basa principalmente en la metodología descrita en la patente del micromodelo de Davinroy (1997), salvo algunas modificaciones. Los pasos para realizar, medir y evaluar las pruebas que integran a las series (Ver Tabla 4.5) se muestran a continuación:

1. Ajuste de pendiente. Se realiza longitudinalmente por medio de los gatos eléctricos instalados en las patas del extremo aguas arriba de la mesa de micromodelación. De acuerdo con las medidas de la mesa y la pendiente que debe proporcionársele al modelo, se determinó la altura en centímetros a la que deben elevarse los gatos eléctricos respecto al nivel del suelo para cada una de las series de pruebas (Ver columna 5 de la Tabla 4.5).
2. Introducción del sedimento. Una capa de Urea tipo II debe colocarse manualmente dentro del modelo de río, de manera uniforme y con aproximadamente 3 cm de espesor.
3. Suministro de gasto. Se lleva a cabo por medio del equipo de bombeo que se encarga de proporcionarle energía cinética al fluido, se regula empleando una válvula de compuerta y se cuantifica por medio del caudalímetro electromagnético instalado en el micromodelo. Cada uno de los gastos aportados al micromodelo, representa una prueba que forma parte de una de las series mostradas en la Tabla 4.5. Después de encender la bomba, la válvula de compuerta debe abrirse de manera gradual hasta llegar al gasto que será dado al modelo, se debe esperar a que el flujo se estabilice para iniciar una prueba con gasto constante y una vez iniciada la prueba deben transcurrir 20 minutos para finalizarla.
4. Medición del fondo. Se efectúa por medio del escáner láser tridimensional que fue descrito en la sección 4.1.2 Sistemas de medición, cada vez que se da por finalizada una prueba y después de que se ha desalojado el agua del tramo de río modelado. El mecanismo que conforma al escáner láser tridimensional se coloca sobre una base metálica diseñada especialmente para soportarlo, posteriormente se procede a configurar su sistema de referencia en la PC mediante el software Polyworks® y finalmente se recolectan con el láser las coordenadas tridimensionales de millones de puntos que conforman el fondo del micromodelo.
5. Proceso de datos recabados. Se realiza con los archivos resultantes de la medición del fondo del micromodelo para cada prueba. Los puntos recopilados se procesan utilizando el software Polyworks® y se exportan en formato tipo ASCII, posteriormente sus coordenadas se escalan a valores de prototipo y, por último, mediante el programa ArcGIS® se dibujan las curvas de nivel del levantamiento topobatimétrico.
6. Evaluación de resultados. Se dibujan las secciones transversales de cada levantamiento topobatimétrico que resulte en cada prueba, y a dichas secciones transversales se les extraen los valores de parámetros morfológicos como son el área y la profundidad máxima.



A los valores de área y profundidad máxima obtenidos de las secciones transversales de cada prueba, se les calcula el Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE, por sus siglas en inglés) con respecto a los valores de las secciones transversales correspondientes de prototipo, para evaluar cuál de las pruebas es la que produce el levantamiento con mayor congruencia entre modelo y prototipo. Las secciones transversales que deben evaluarse entre el levantamiento topobatimétrico original y cada una de las pruebas, se organizaron numéricamente como se muestra en la Figura 4.10.

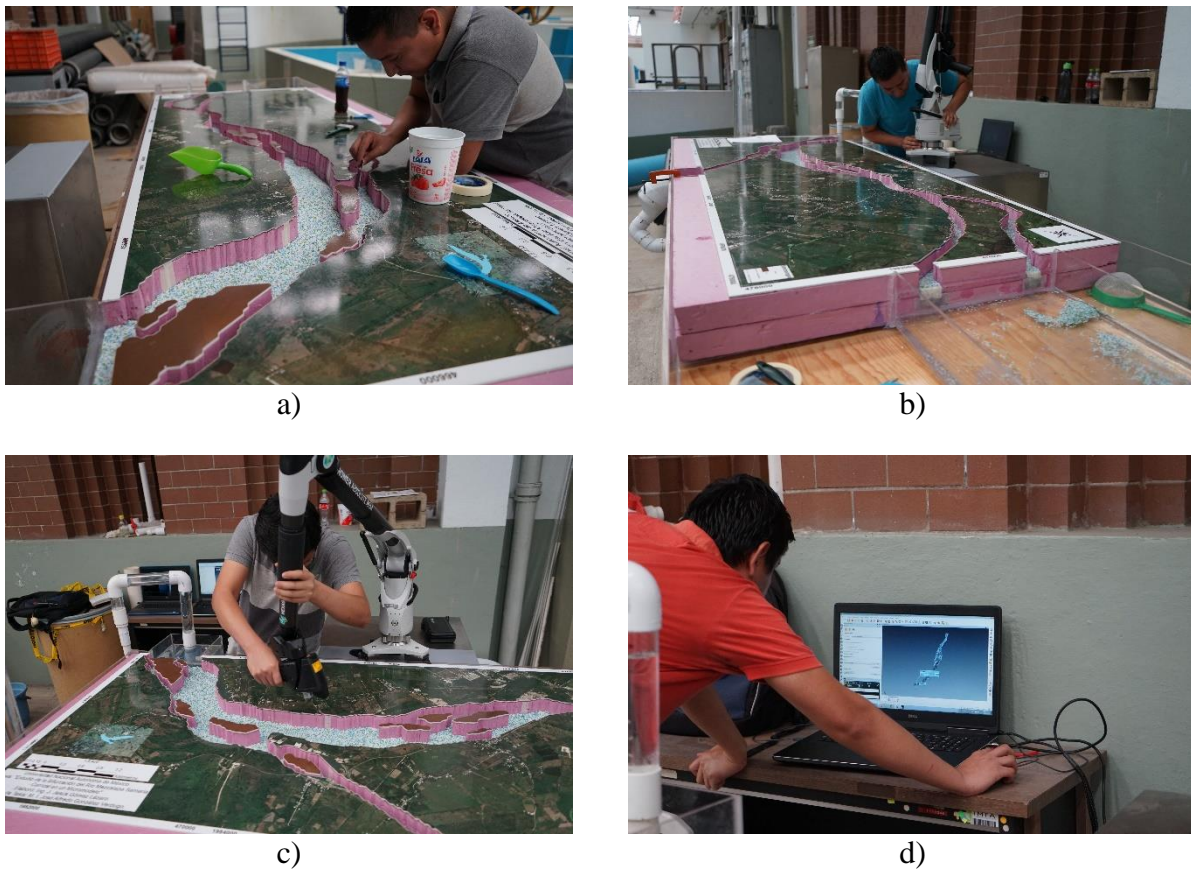


Figura 4.9 Trabajos experimentales: a) Introducción de sedimento, b) Montaje del brazo láser, c) Levantamiento topobatimétrico con el escáner láser y d) Proceso de datos recabados. Fuente: Maestro Omar Fonseca Moreno

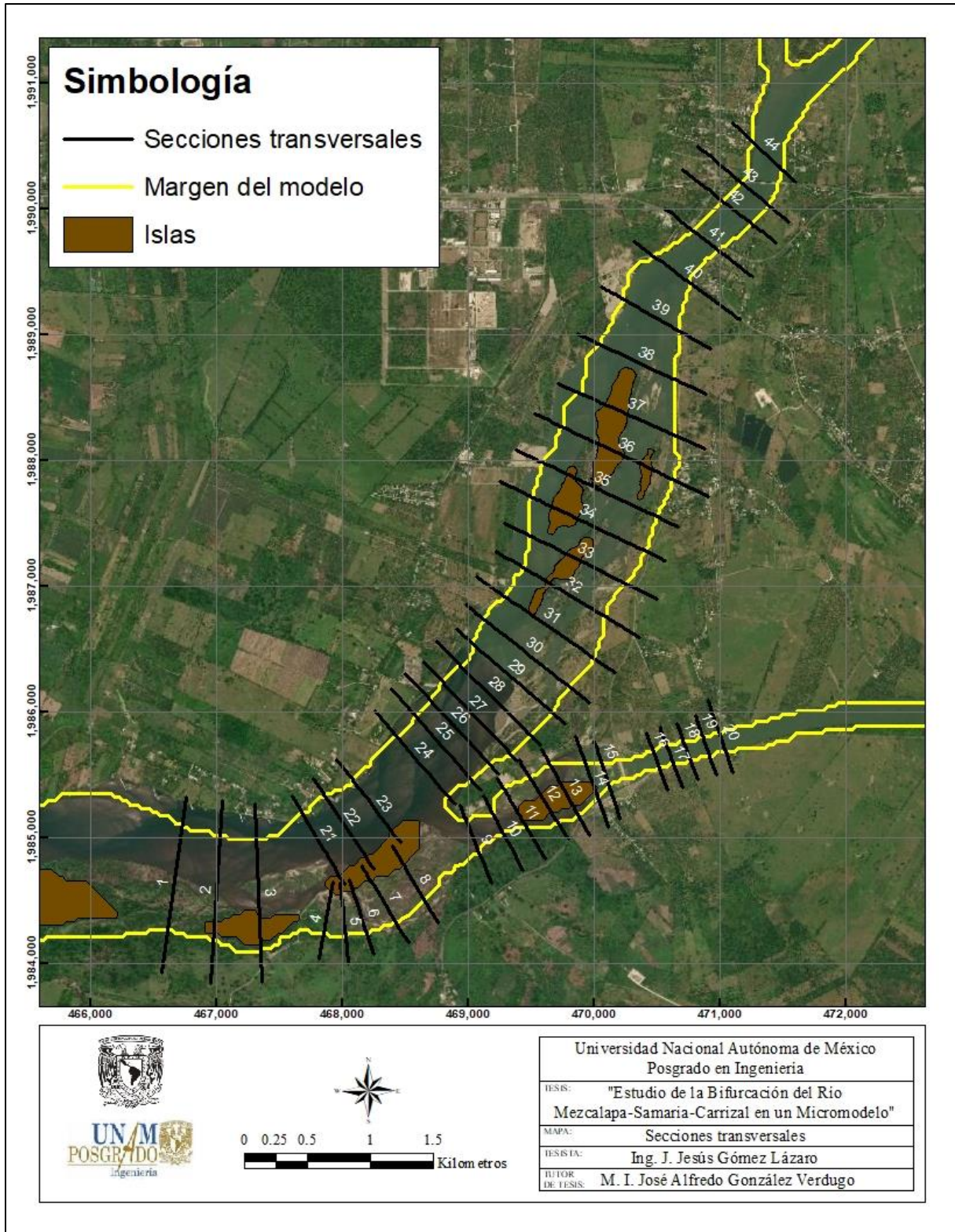


Figura 4.10 Secciones transversales a evaluar



5 RESULTADOS

Los resultados de evaluar con el Error Porcentual Medio Absoluto a los parámetros morfológicos de las secciones transversales (profundidad máxima y área) que conforman a las series de pruebas, se muestran para la bifurcación y para cada uno de los ríos que conforman al sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal. Como se mencionó en el capítulo anterior, los resultados de las pruebas pertenecientes a la Serie 1 no se muestran en esta sección, debido a que se apreció poco o nulo movimiento en el fondo del micromodelo para dichas pruebas; solo se exponen las condiciones bajo las que esta serie de pruebas fue realizada. La escala de longitud horizontal y la pendiente de prototipo son dos parámetros con valor constante en todas las pruebas, con una magnitud de 5,400 y 0.0005 respectivamente; el resto de las variables y parámetros característicos de cada prueba, se explican en los siguientes subcapítulos que hablan sobre las series que agrupan dichas pruebas. El código para identificar a las pruebas, sus características y la serie a la que pertenecen se explica a continuación:

Tabla 5.1 Código identificador de las pruebas

Código de prueba	SX	Qm=X.XX	PX
Significado	Serie a la que pertenece	Gasto de modelo en l/s	Número de prueba

Es importante mencionar que los mapas topobatimétricos resultantes de cada una de las pruebas evaluadas, así como el mapa del levantamiento topobatimétrico de la bifurcación realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en el año 1997, pueden consultarse en el Anexo B. Por su parte, las tablas para el cálculo del MAPE agrupadas por series de pruebas se muestran en el Anexo C.

5.1 SERIE 1

5.1.1 Características de las pruebas

Las pruebas que componen esta Serie se realizan en una configuración en planta del micromodelo igual a la mostrada en la Figura 3.4.



Las características de la prueba S1_Qm0.04_P1 son un gasto en modelo igual a 0.04 l/s, un gasto en prototipo de 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años, una pendiente en modelo que vale 0.006 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 450.

La prueba S1_Qm0.05_P1 tiene un gasto en modelo igual a 0.05 l/s, un gasto en prototipo de 2,586.76 m³/s asociado a un periodo de retorno de 2 años, una pendiente en modelo que vale 0.006 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 450.

La prueba S1_Qm0.06_P1 posee un gasto en modelo igual a 0.06 l/s, un gasto en prototipo de 3,164.05 m³/s asociado a un periodo de retorno de 4 años, una pendiente en modelo que vale 0.006 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 450.

Las características de la prueba S1_Qm0.07_P1 son un gasto en modelo igual a 0.07 l/s, un gasto en prototipo de 3,558.19 m³/s asociado a un periodo de retorno de 7 años, una pendiente en modelo que vale 0.006 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 450.

5.2 SERIE 2

5.2.1 Características de las pruebas

El conjunto de pruebas que componen a esta Serie, al igual que en la Serie 1, se realizan con la configuración en planta del micromodelo que se observa en la Figura 3.4.

Las características de la prueba S2_Qm0.12_P1 son un gasto en modelo igual a 0.12 l/s, un gasto en prototipo de 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

La prueba S2_Qm0.14_P1 tiene un gasto en modelo igual a 0.14 l/s, un gasto en prototipo de 2,586.76 m³/s asociado a un periodo de retorno de 2 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

La prueba S2_Qm0.17_P1 posee un gasto en modelo igual a 0.17 l/s, un gasto en prototipo de 3,164.05 m³/s asociado a un periodo de retorno de 4 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.



Las características de la prueba S2_Qm0.20_P1 son un gasto en modelo igual a 0.20 l/s, un gasto en prototipo de 3,558.19 m³/s asociado a un periodo de retorno de 7 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

5.2.2 MAPE en la bifurcación

Al evaluar los parámetros de profundidad máxima y área de las secciones transversales de cada prueba que conforman a la Serie 2, se obtienen los valores de MAPE que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 MAPE en la bifurcación para la Serie 2

Prueba	Error Porcentual Medio Absoluto (%)	
	Profundidad máxima	Área
S2_Q0.12_P1	10.73	56.03
S2_Q0.14_P1	8.28	66.87
S2_Q0.17_P1	8.02	63.10
S2_Q0.20_P1	10.57	65.39

5.2.3 MAPE en cada río

La evaluación del Error Porcentual Medio Absoluto de los parámetros morfológicos de las secciones transversales entre valores de prototipo y pruebas del micromodelo para la Serie 2, también se llevó a cabo en cada uno de los ríos que componen el sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal, como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 MAPE en cada río para la Serie 2

Río	Prueba	Error Porcentual Medio Absoluto (%)	
		Profundidad máxima	Área
Mezcalapa	S2_Q0.12_P1	1.79	199.04
	S2_Q0.14_P1	9.25	327.36
	S2_Q0.17_P1	5.77	274.78
	S2_Q0.20_P1	7.11	283.84
Carrizal	S2_Q0.12_P1	8.86	61.26
	S2_Q0.14_P1	9.02	89.83
	S2_Q0.17_P1	8.65	87.13
	S2_Q0.20_P1	10.67	91.18
Samaria	S2_Q0.12_P1	13.16	34.45
	S2_Q0.14_P1	7.64	18.04
	S2_Q0.17_P1	7.85	19.62
	S2_Q0.20_P1	10.92	19.82



5.3 SERIE 3

5.3.1 Características de las pruebas

Las pruebas de esta Serie se llevaron a cabo con las modificaciones a la configuración en planta del micromodelo descritas en el subcapítulo 4.3.1 y mostradas en la Figura 4.7.

Las características de la prueba S3_Qm0.12_P1 son un gasto en modelo igual a 0.12 l/s, un gasto en prototipo de 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

La prueba S3_Qm0.14_P1 tiene un gasto en modelo igual a 0.14 l/s, un gasto en prototipo de 2,586.76 m³/s asociado a un periodo de retorno de 2 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

La prueba S3_Qm0.17_P1 posee un gasto en modelo igual a 0.17 l/s, un gasto en prototipo de 3,164.05 m³/s asociado a un periodo de retorno de 4 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

Las características de la prueba S3_Qm0.20_P1 son un gasto en modelo igual a 0.20 l/s, un gasto en prototipo de 3,558.19 m³/s asociado a un periodo de retorno de 7 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

5.3.2 MAPE en la bifurcación

Al evaluar los parámetros de profundidad máxima y área de las secciones transversales de cada prueba que conforman a la Serie 3, se obtienen los valores de MAPE que se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 MAPE en la bifurcación para la Serie 3

Prueba	Error Porcentual Medio Absoluto (%)	
	Profundidad máxima	Área
S3_Q0.12_P1	9.29	92.71
S3_Q0.14_P1	9.54	102.01
S3_Q0.17_P1	11.45	132.29
S3_Q0.20_P1	11.34	121.47



5.3.3 MAPE en cada río

La evaluación del Error Porcentual Medio Absoluto de los parámetros morfológicos de las secciones transversales entre valores de prototipo y pruebas del micromodelo para la Serie 3, también se llevó a cabo en cada uno de los ríos que componen el sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal, como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 MAPE en cada río para la Serie 3

Río	Prueba	Error Porcentual Medio Absoluto (%)	
		Profundidad máxima	Área
Mezcalapa	S3_Q0.12_P1	10.43	468.94
	S3_Q0.14_P1	15.61	538.63
	S3_Q0.17_P1	22.77	697.70
	S3_Q0.20_P1	20.71	630.16
Carrizal	S3_Q0.12_P1	10.25	120.84
	S3_Q0.14_P1	10.54	128.55
	S3_Q0.17_P1	13.11	170.86
	S3_Q0.20_P1	12.90	155.94
Samaria	S3_Q0.12_P1	8.47	25.76
	S3_Q0.14_P1	8.07	28.64
	S3_Q0.17_P1	8.87	34.30
	S3_Q0.20_P1	9.07	33.47

5.4 SERIE 4

5.4.1 Características de las pruebas

Las pruebas de esta Serie se llevaron a cabo con las modificaciones a la configuración en planta del micromodelo descritas en el subcapítulo 4.3.1 y mostradas en la Figura 4.8.

Las características de la prueba S4_Qm0.12_P1 son un gasto en modelo igual a 0.12 l/s, un gasto en prototipo de 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

La prueba S4_Qm0.14_P1 tiene un gasto en modelo igual a 0.14 l/s, un gasto en prototipo de 2,586.76 m³/s asociado a un periodo de retorno de 2 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.



La prueba S4_Qm0.17_P1 posee un gasto en modelo igual a 0.17 l/s, un gasto en prototipo de 3,164.05 m³/s asociado a un periodo de retorno de 4 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

Las características de la prueba S4_Qm0.20_P1 son un gasto en modelo igual a 0.20 l/s, un gasto en prototipo de 3,558.19 m³/s asociado a un periodo de retorno de 7 años, una pendiente en modelo que vale 0.012 y una escala de longitud vertical propuesta con valor de 225.

5.4.2 MAPE en la bifurcación

Al evaluar los parámetros de profundidad máxima y área de las secciones transversales de cada prueba que conforman a la Serie 4, se obtienen los valores de MAPE que se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 MAPE en la bifurcación para la Serie 4

Prueba	Error Porcentual Medio Absoluto (%)	
	Profundidad máxima	Área
S4_Q0.12_P1	10.88	53.39
S4_Q0.14_P1	9.99	116.85
S4_Q0.17_P1	12.50	126.69
S4_Q0.20_P1	9.31	58.99

5.4.3 MAPE en cada río

La evaluación del Error Porcentual Medio Absoluto de los parámetros morfológicos de las secciones transversales entre valores de prototipo y pruebas del micromodelo para la Serie 4, también se llevó a cabo en cada uno de los ríos que componen el sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal, como se muestra en la Tabla 5.7.



Tabla 5.7 MAPE en cada río para la Serie 4

Río	Prueba	Error Porcentual Medio Absoluto (%)	
		Profundidad máxima	Área
Mezcalapa	S4_Q0.12_P1	4.13	132.52
	S4_Q0.14_P1	20.01	493.23
	S4_Q0.17_P1	23.73	552.88
	S4_Q0.20_P1	2.74	222.75
Carrizal	S4_Q0.12_P1	8.43	62.55
	S4_Q0.14_P1	12.70	173.63
	S4_Q0.17_P1	12.77	177.70
	S4_Q0.20_P1	10.20	78.61
Samaria	S4_Q0.12_P1	13.47	37.00
	S4_Q0.14_P1	6.81	29.59
	S4_Q0.17_P1	10.90	37.29
	S4_Q0.20_P1	9.49	24.61

5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.5.1 MAPE en la bifurcación

El Error Porcentual Medio Absoluto de la profundidad máxima de las secciones transversales de magnitud más grande resultó ser de la prueba S4_Q0.17_P1 con 12.50%, mientras que la cantidad más baja pertenece a la prueba S2_Q0.17_P1 y vale 8.02%.

El MAPE del área de las secciones transversales más alto equivale a 132.29% y el más bajo a 53.39%, pertenecientes a las pruebas S3_Q0.17_P1 y S4_Q0.12_P1, respectivamente.

Al evaluar el parámetro de la profundidad máxima, se puede apreciar que sus valores del MAPE tienen un valor más o menos constante, puesto que no existe gran diferencia entre la magnitud más alta y la más baja. Por su parte, el MAPE máximo y mínimo evaluado en el área de las secciones transversales, presenta una diferencia significativa entre ambos valores, además de manifestar un error bastante alto.

5.5.2 MAPE en cada río

Por conveniencia, para dar a conocer los valores máximos y mínimos del Error Porcentual Medio Absoluto al evaluar los dos parámetros morfológicos de las secciones transversales de cada una de las pruebas en cada río, se elaboraron las tablas que se muestran a continuación.



Tabla 5.8 MAPE máximo y mínimo de la profundidad máxima de las secciones transversales en cada río

Río	Error Porcentual Medio Absoluto (%)			
	Profundidad máxima			
	Máximo	Prueba	Mínimo	Prueba
Mezcalapa	23.73%	S4_Q0.17_P1	1.79%	S2_Q0.12_P1
Carrizal	13.11%	S3_Q0.17_P1	8.43%	S4_Q0.12_P1
Samaria	13.47%	S4_Q0.12_P1	6.81%	S4_Q0.14_P1

Tabla 5.9 MAPE máximo y mínimo del área de las secciones transversales en cada río

Río	Error Porcentual Medio Absoluto (%)			
	Área			
	Máximo	Prueba	Mínimo	Prueba
Mezcalapa	697.70%	S3_Q0.17_P1	132.52%	S4_Q0.12_P1
Carrizal	177.70%	S4_Q0.17_P1	61.26%	S2_Q0.12_P1
Samaria	37.29%	S4_Q0.17_P1	18.04%	S2_Q0.14_P1

Se puede observar que en el análisis realizado para cada uno de los ríos que componen a la bifurcación, el MAPE más alto en las profundidades máximas se presentó en el río Mezcalapa, en la prueba S4_Q0.17_P1, con un valor de 23.73%; mientras que el valor más bajo equivale a 1.79% y pertenece a la prueba S2_Q0.12_P1 del río Mezcalapa.

El MAPE evaluado en el área de las secciones transversales analizado por río, muestra que el valor más grande se presentó en la corriente del Mezcalapa, con una magnitud de 697.70%, en la prueba S3_Q0.17_P1; por su parte, el valor mínimo de MAPE pertenece a la prueba S2_Q0.14_P1 del río Samaria y tiene una magnitud de 18.04%.

5.5.3 Pruebas de mejor ajuste

Después de haber analizado los resultados de las pruebas con el Error Porcentual Medio Absoluto en sus secciones transversales, se determinó que la prueba que mejor replicó las tendencias topobatimétricas de prototipo en la bifurcación fue la denominada S4_Q0.12_P1, con un MAPE para la profundidad máxima de 10.88% y un MAPE para el área de 53.39%, que como puede observarse en la Tabla 4.5, supone una escala de longitud vertical que vale 225, una distorsión de 24 y un gasto en prototipo de 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años.



Los ensayos con los que mejores resultados se obtuvieron al evaluar el MAPE de las secciones transversales en cada río fueron:

- La prueba S4_Q0.12_P1 para el tramo del río Mezcalapa, con un Error Porcentual Medio Absoluto de 4.13% y de 132.52%, para los parámetros de profundidad máxima y de área, respectivamente; la escala de longitud vertical en esta prueba es igual a 225, con un valor de distorsión igual a 24 y un gasto en prototipo igual a 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años.
- La prueba S2_Q0.12_P1 para el tramo del río Carrizal, con un Error Porcentual Medio Absoluto de 8.86% y de 61.26%, para los parámetros de profundidad máxima y de área, respectivamente; la escala de longitud vertical en esta prueba es igual a 225, con un valor de distorsión igual a 24 y un gasto en prototipo igual a 2,184.48 m³/s asociado a un periodo de retorno de 1.4 años.
- La prueba S2_Q0.14_P1 para el tramo del río Samaria, con un Error Porcentual Medio Absoluto de 7.64% y de 18.04%, para los parámetros de profundidad máxima y de área, respectivamente; la escala de longitud vertical en esta prueba es igual a 225, con un valor de distorsión igual a 24 y un gasto en prototipo igual a 2,586.76 m³/s asociado a un periodo de retorno de 2 años.

En las figuras que van de la 5.1 a la 5.8, se grafica una comparativa entre los parámetros de profundidad máxima y de área de las secciones transversales entre las pruebas de las que mejores resultados se obtuvieron y el levantamiento topobatimétrico del año 1997.

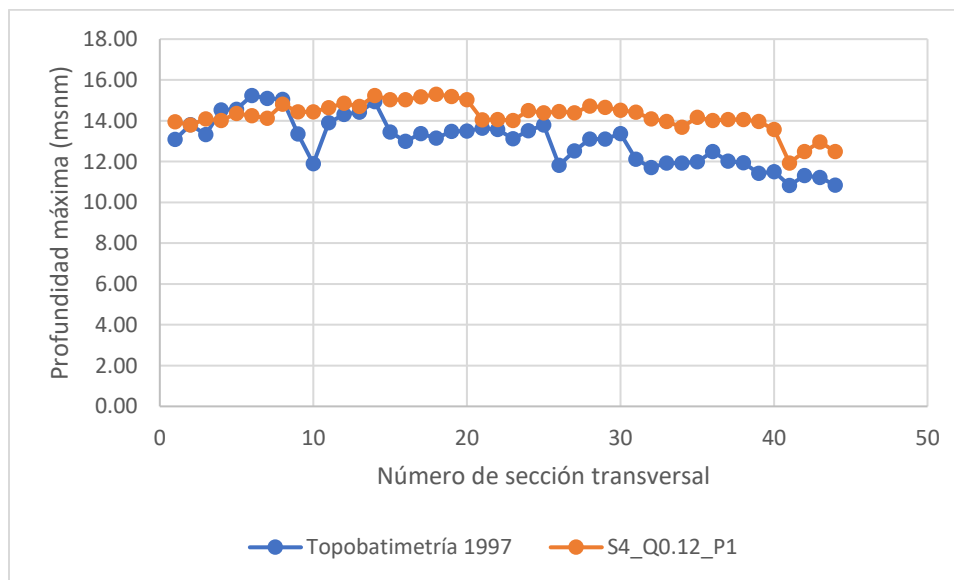


Figura 5.1 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en la bifurcación

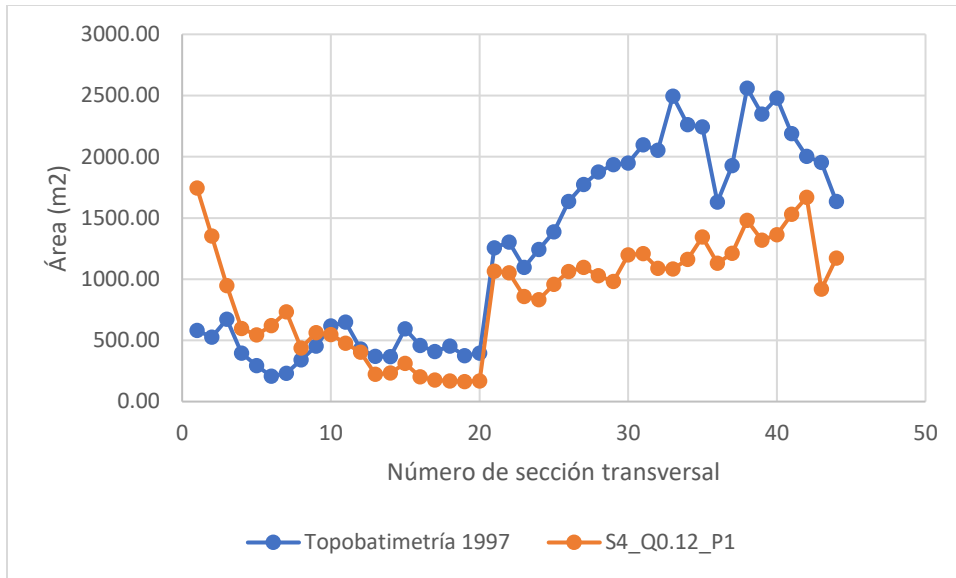


Figura 5.2 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en la bifurcación

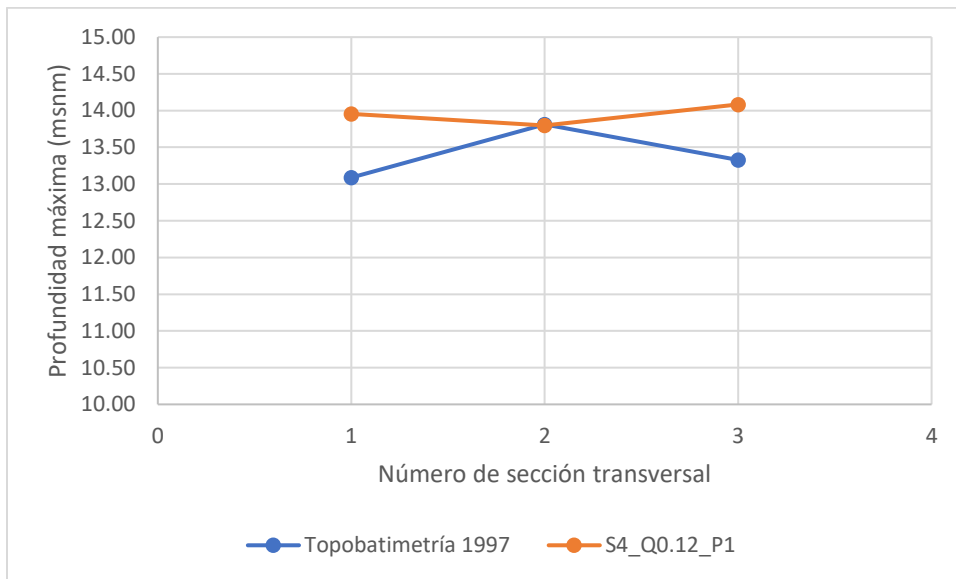


Figura 5.3 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en el río Mezcalapa

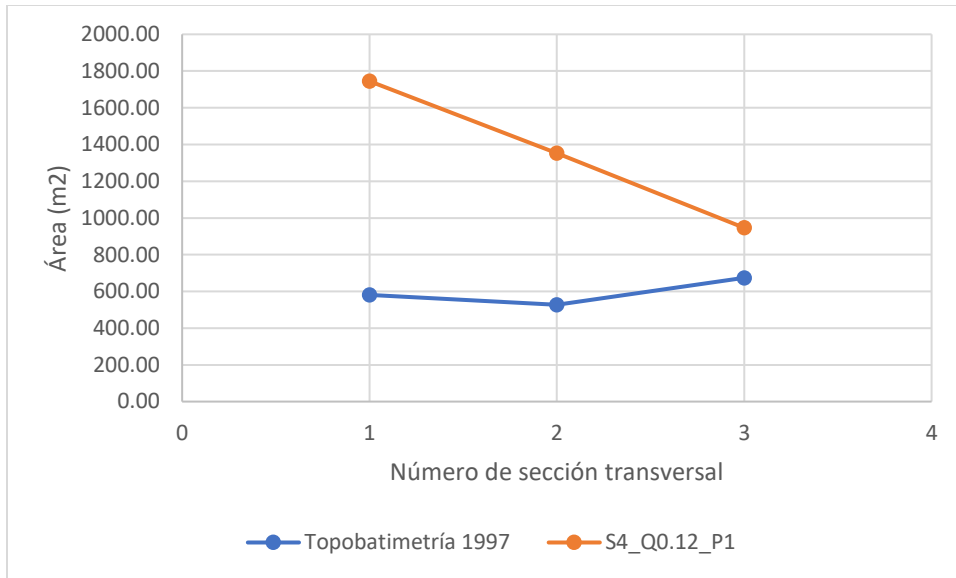


Figura 5.4 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S4_Q0.12_P1, en el río Mezalapa

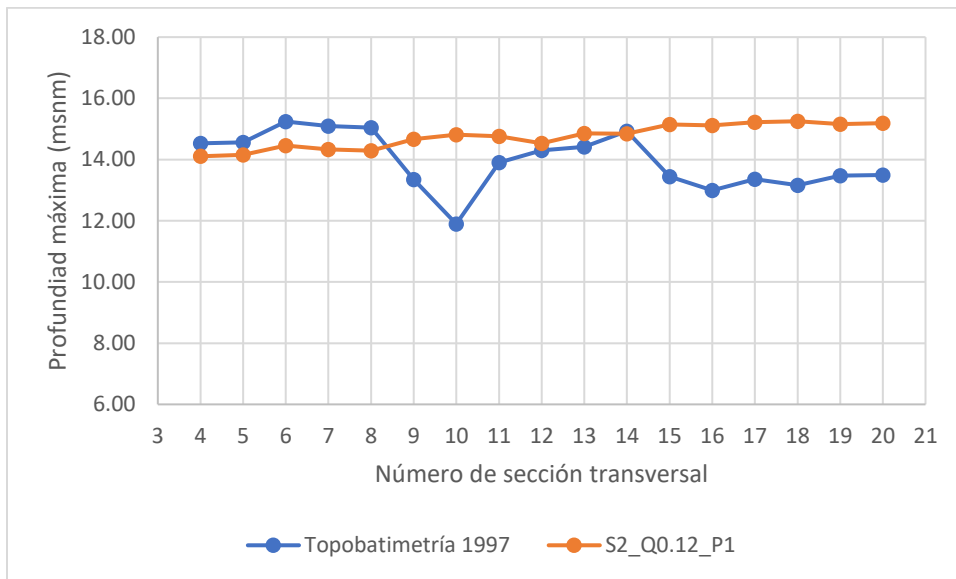


Figura 5.5 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.12_P1, en el río Carrizal

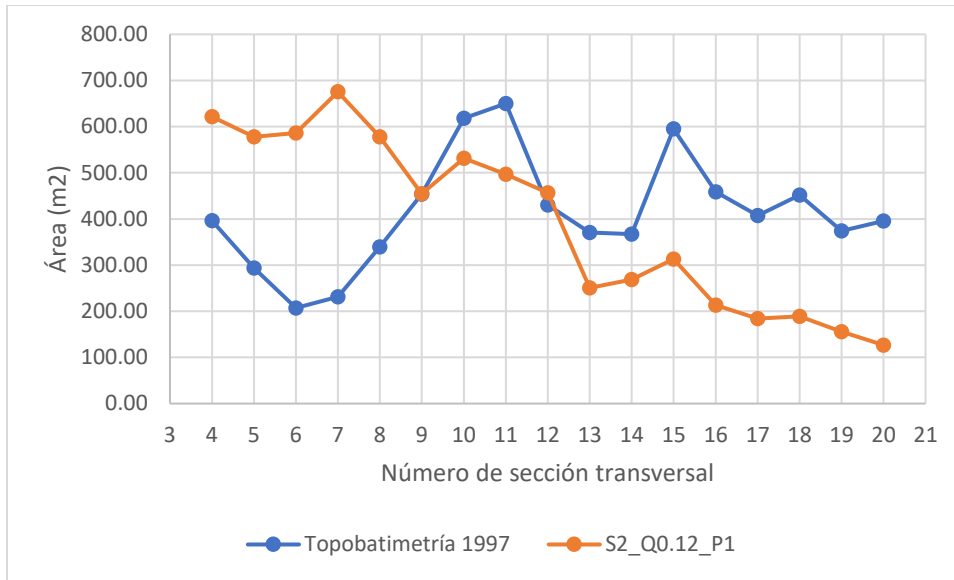


Figura 5.6 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.12_P1, en el río Carrizal

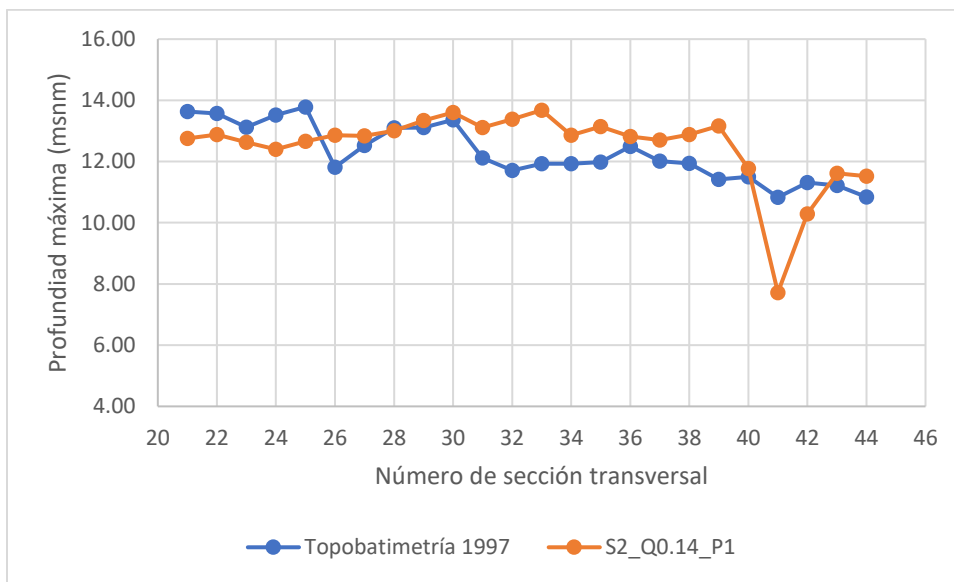


Figura 5.7 Comparación de la profundidad máxima de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.14_P1, en el río Samaria

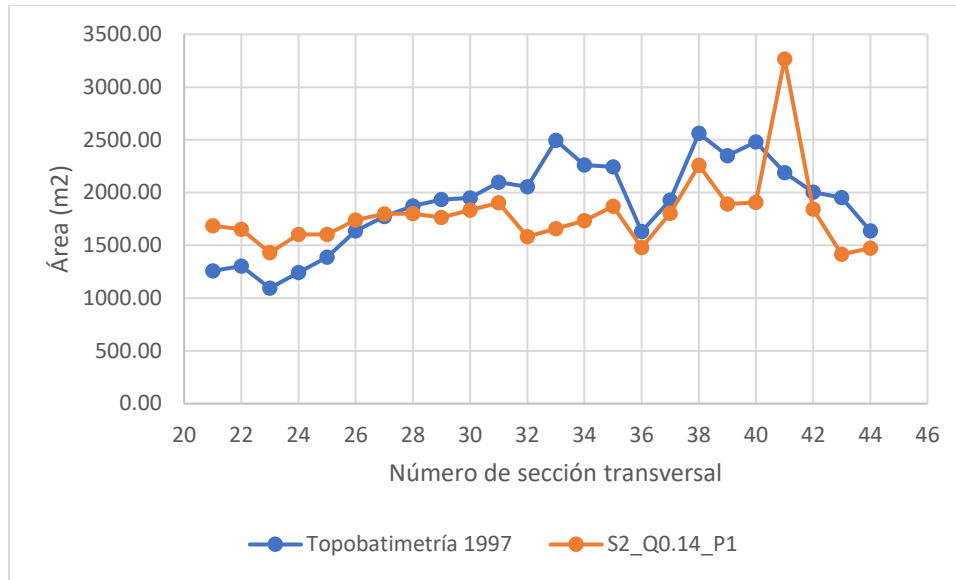


Figura 5.8 Comparación del área de cada sección transversal entre el levantamiento topobatimétrico de 1997 y la prueba S2_Q0.14_P1, en el río Samaria

El criterio para determinar las pruebas que originan una topobatimetría más parecida a la de prototipo de acuerdo con el cálculo del MAPE en cada río y en la bifurcación, se basó principalmente, en seleccionar aquellas pruebas cuyo valor de MAPE fuera el mínimo para el área de las secciones transversales, puesto que el MAPE en la profundidad máxima no presentó valores con diferencias tan pronunciadas como en el MAPE del área.

5.5.4 Análisis de los resultados obtenidos

La magnitud máxima del Error Porcentual Medio Absoluto encontrada en algunos reportes técnicos de micromodelos del USACE, al evaluar el área de secciones transversales, asciende al 16.3% (Ver Tabla 5.10). Atendiendo al valor mencionado anteriormente, el análisis global del Sistema Mezcalapa-Samaria-Carrizal no proporciona resultados adecuados, sin embargo, si solo se toma en cuenta la evaluación del río Samaria, se puede decir que con la prueba S2_Q0.14_P1 se obtiene un resultado aceptable. En el Anexo D se grafican las secciones transversales del levantamiento topobatimétrico de 1997 y las resultantes de la prueba S2_Q0.14_P1, pertenecientes al río Samaria, con el fin de mostrar una comparativa entre el prototipo y la prueba que aportó los mejores resultados, mientras que en la Figura 5.9 pueden apreciarse dos de estas secciones transversales: la de mayor y la de menor correspondencia entre modelo y prototipo.

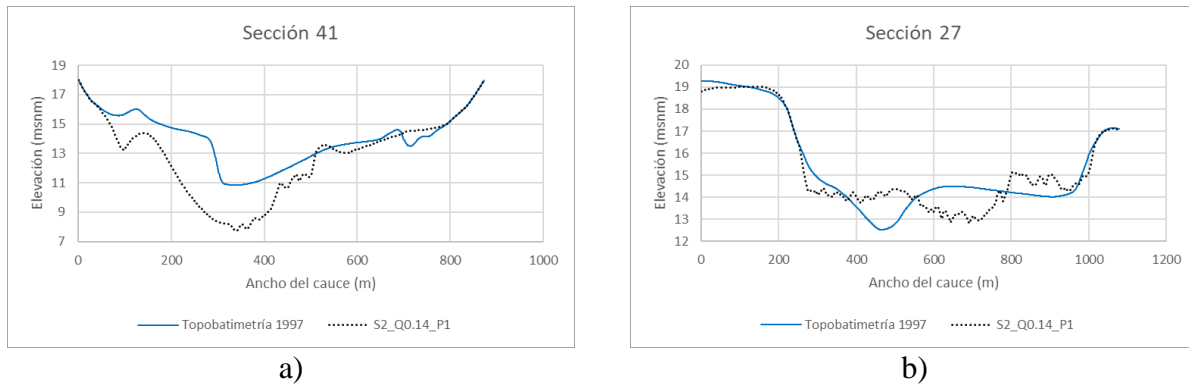


Figura 5.9 a) Sección transversal con menor correspondencia en el tramo del río Samaria de la prueba S2_Q0.14_P1 y b) Sección transversal con mayor correspondencia en el tramo del río Samaria de la prueba S2_Q0.14_P1

El haber obtenido mayores valores del MAPE en la evaluación del área de las secciones transversales para este trabajo de investigación, respecto a los que se reportan en informes técnicos del USACE, puede explicarse en los siguientes puntos:

- El tramo correspondiente al río Mezcalapa es demasiado cercano a la entrada de flujo del modelo, lo cual genera una socavación excesiva que impide el desarrollo adecuado de la topobatemetría en este intervalo.
- El tramo que representa al río Carrizal, por cuestiones de disponibilidad de espacio al momento del diseño, no cumple con el ancho mínimo de 4 cm para cauces de micromodelos que recomienda el USACE, provocando la constricción del material de fondo ubicado en este segmento y limitando el movimiento del sedimento a lo ancho de sus secciones transversales.
- Haber abordado el caso de estudio de una bifurcación, genera que se compliquen las condiciones de frontera del modelo, por lo que no existe un apropiado punto de comparación con los resultados obtenidos en micromodelos desarrollados por el USACE, ya que en la revisión de sus informes técnicos no se encontraron casos similares.
- Si bien la escala de longitud horizontal y la escala de longitud vertical empleadas se encuentran en el rango utilizado usualmente para micromodelos de fondo móvil, el valor de la distorsión sobrepasa al de la mayoría de los estudios realizados por el USACE como puede apreciarse en la Tabla 5.10.

Por su parte, el haber conseguido mejores resultados en el río Samaria, se debe a la localización de dicho tramo, pues está lo suficientemente alejado de la entrada y la salida del modelo, además de ser lo bastante largo y ancho para favorecer el movimiento del sedimento que compone el fondo.



Tabla 5.10 Cuadro comparativo del MAPE del área de las secciones transversales entre algunos casos de estudio del USACE y el mejor resultado obtenido en el presente trabajo de tesis para el tramo del río Samaria

Número de reporte técnico	Título	Escala horizontal, L_{eh}	Escala vertical, L_{ev}	Distorsión, Ω	MAPE en el área de las secciones transversales (%)		
					Modelo vs Prototipo 1	Modelo vs Prototipo 2	Modelo vs Prototipo 3
M14	SEDIMENTATION AND NAVIGATION STUDY OF THE LOWER ATCHAFALAYA RIVER AT MORGAN CITY & BERWICK, LOUISIANA, RIVER MILES 124.0 TO 118.5	1:7,200	1:1,200	6	8.2	N/A	N/A
M56	Bangert Island HSR Model Missouri River Miles 34.3 to 28.1 Hydraulic Sediment Response Model Investigation	1:3,600	1:324	11.11	9.7	N/A	N/A
M58	Grand Lake Towhead HSR MODEL Mississippi River Miles 26.0 – 10.5 HYDRAULIC SEDIMENT RESPONSE MODEL INVESTIGATION	1:9,600	1:444	21.62	16.3	N/A	N/A
M62	Vancill Towhead HSR MODEL River Miles 72.00 – 65.00 HYDRAULIC SEDIMENT RESPONSE MODEL INVESTIGATION	1:8,400	1:624	13.46	4.9	5.7	6.2
M66	SALT LAKE CHUTE HSR MODEL Mississippi River Miles 143.0 – 134.0 HYDRAULIC SEDIMENT RESPONSE MODEL INVESTIGATION	1:8,400	1:888	9.46	10.7	8.4	N/A
M67	MORO CHUTE HSR MODEL RIVER MILES 125.00 – 117.00 HYDRAULIC SEDIMENT RESPONSE MODEL INVESTIGATION	1:9,600	1:624	15.38	5.7	13.3	8.4
M68	The Mouth of the Meramec River HSR MODEL Mississippi River, River Miles 165.00 – 156.00 HYDRAULIC SEDIMENT RESPONSE MODEL INVESTIGATION	1:10,800	1:912	11.84	8.4	8.4	N/A
N/A	Missouri River at St. Charles, Missouri	1:3,600	1:324	11.11	6.4	N/A	N/A
N/A	Upper Brown Bar Reach	1:9,600	1:720	13.33	9.9	N/A	N/A
N/A	Water Points Reach	1:7,200	1:816	8.82	9.8	N/A	N/A
TESIS DE MAESTRÍA	ESTUDIO DE LA BIFURCACIÓN DEL RÍO MEZCALAPA-SAMARIA-CARRIZAL EN UN MICROMODELO (TRAMO SAMARIA)	1:5,400	225	24	18.04	N/A	N/A



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- En el proceso de diseño de un micromodelo, la selección de las escalas de longitud (horizontal y vertical) se realiza de manera distinta a como se seleccionan dichas escalas para un modelo de fondo móvil convencional. En el primero, la escala de longitud horizontal se elige de acuerdo con el espacio disponible en la mesa de micromodelación, cuidando que el ancho de río en modelo no sea menor a 4 cm; mientras que la escala de longitud vertical se determina mediante la experimentación, evaluando cual es el valor que mejores resultados proporciona al compararse con la topobatimetría del prototipo. Por su parte, las escalas de longitud en los modelos convencionales de fondo móvil se seleccionan antes de la construcción del modelo, mediante un análisis numérico que garantice el movimiento de las partículas de material que componen el fondo.
- La inversión inicial para el desarrollo de los micromodelos es alta, ya que incluye la construcción de la mesa de micromodelación, así como la adquisición del equipo de bombeo, del sistema de medición de flujo, del escáner láser 3D y del Mini Velocímetro Láser *Doppler* (LDV). Sin embargo, una vez que se cuenta con los aditamentos anteriormente mencionados, estos pueden seguirse aprovechando para futuras investigaciones, además, el uso del escáner láser y del Mini LDV no se limitan a aplicaciones que solo tengan que ver con la micromodelación.
- Un micromodelo es fácil, rápido y económico de construir. Las labores de construcción implican cortar el mapa de vinil y la placa de poliestireno que le da forma al modelo de río, así como los trabajos de fontanería para la entrada y salida del agua que se administrara durante la experimentación. La construcción puede llevarse a cabo por una sola persona y ser concluida en un tiempo máximo de dos semanas, en cambio, la construcción de un modelo de fondo móvil convencional dura por lo menos un mes (dependiendo el tamaño del modelo) e involucra toda una cuadrilla de personal para trabajos de albañilería, acrílico, carpintería y fontanería.
- El micromodelo es fácil de operar, puesto que esta actividad puede ser realizada por una sola persona. Las pruebas tienen una duración de veinte minutos, sin embargo, solo podían efectuarse dos pruebas diarias en una jornada de seis horas, debido a la labor de acomodar el sedimento dentro del micromodelo antes de iniciar cada ensayo y a la medición del fondo con el escáner láser cada vez que finalizaba una prueba. Otra característica del micromodelo que facilita su operación, es su independencia dentro de laboratorio, pues al poseer su propio tanque de alimentación hidráulica, trabaja sin necesidad de atenerse al



funcionamiento de otros modelos hidráulicos convencionales que comparten un mismo sistema de abastecimiento de agua.

- Después de evaluar el MAPE entre las secciones transversales del levantamiento topobatimétrico de 1997 y de las pruebas realizadas, se observó que no se obtuvieron buenos resultados en el análisis de la bifurcación, ya que la prueba S4_Q0.12_P1 que fue la que mejor se ajustó, presentó un MAPE de 10.88% en la profundidad máxima y de 53.39% en el área. En cambio, los resultados fueron más aceptables al aislar el caso del río Samaria, donde el MAPE obtenido fue de 7.64% y de 18.04%, para profundidad máxima y área, respectivamente. Los resultados obtenidos en el micromodelo de la bifurcación se explican de la siguiente manera:
 - El tramo correspondiente al río Mezcalapa es demasiado cercano a la entrada del modelo, lo cual genera una socavación excesiva que no permite el desarrollo de su topobatimetría de manera adecuada.
 - El tramo del río Carrizal no cumple con el ancho mínimo de 4 cm recomendado por el USACE, debido a cuestiones de espacio en la etapa de diseño, provocando la constricción del sedimento ubicado en ese segmento, impidiendo el desarrollo de tendencias topobatimétricas a lo ancho de sus secciones transversales.
 - Que se hayan presentado menores valores del MAPE al evaluar el área de las secciones transversales del río Samaria, se debe a que este tramo se ubica lo suficientemente alejado de la entrada y la salida del modelo, además de ser lo bastante largo y ancho para favorecer el movimiento del fondo.
- A pesar de haberse obtenido mejores resultados en el tramo del modelo del río Samaria con la prueba S2_Q0.14_P1, el MAPE del área de las secciones transversales resultó ser más elevado que en modelos evaluados por el USACE. Lo anterior puede deberse a:
 - El caso de estudio analizado en el presente trabajo de tesis trata acerca de una bifurcación, lo cual complica las condiciones de frontera del modelo, a diferencia de los micromodelos estudiados por el USACE, cuyos informes revisados no reportan el análisis de un caso similar.
 - Aunque la escala de longitud horizontal y la escala de longitud vertical empleadas en este trabajo experimental se encuentran en el rango utilizado usualmente por el USACE para micromodelos de fondo móvil, la distorsión sobrepasa valores comúnmente utilizados por ingenieros estadounidenses.
- El micromodelo es susceptible de padecer efectos de escala tales como falta de correspondencia con tirantes hidráulicos de prototipo, excesivos números de Froude, la incorrecta distribución de flujo y/o pequeñas dimensiones de gasto que podrían caracterizar flujo de tipo laminar, ocasionados por múltiples factores tales como grandes valores de escalas de longitud, excesivo número de distorsión y el tamaño de las partículas de



sedimento, sin embargo, aún se desconoce cuál de estos factores es el que mayor influencia sobre los efectos de escala tiene.

- En las secciones transversales que van del número 21 al 24, producidas por la prueba S2_Q0.14_P1 y pertenecientes al río Samaria, se observa una mayor profundidad que la existente en prototipo; ya entre las secciones transversales 25 y 31, sus graficas se cruzan apreciándose una mayor correspondencia entre modelo y prototipo; mientras que entre las secciones 32 y 44, en un tramo con presencia de islas, el prototipo presento mayores profundidades.
- El micromodelo tiene la conveniencia de que los resultados de las pruebas pueden obtenerse rápidamente. En este caso bastó solo con realizar 16 ensayos, número que podría optimizarse con un modelador experimentado, puesto que el autor carecía de experiencia en la modelación física a escala reducida al momento de realizar la presente experimentación.
- Por último, el estudio de micromodelos fluviales de fondo móvil es un campo que se sigue desarrollando, y que aún puede ser ampliamente explotado.

6.2 RECOMENDACIONES

- Pueden seguirse probando nuevas series en el micromodelo del Mezcalapa-Samaria-Carrizal con el propósito de reducir el valor del Error Porcentual Medio Absoluto mínimo que resultó de evaluar las pruebas descritas en la presente investigación.
- Una alternativa que podría plantearse para obtener mejores resultados utilizando el mismo modelo que en este estudio, es ampliar el corte del cauce hacia el exterior de las márgenes del río, con el propósito de que pueda desarrollarse con mayor libertad la geometría de las secciones transversales.
- En caso de que con el modelo utilizado en este trabajo de tesis no se logre disminuir el valor del MAPE obtenido en el análisis de las pruebas descritas anteriormente, puede construirse un micromodelo de mayor tamaño para continuar con el estudio de la bifurcación.
- Existe gran cantidad de información acerca del río Mezcalapa-Samaria-Carrizal que data en su mayor parte del periodo que comprende del año 1997 hasta la fecha, por lo que pueden construirse y estudiarse micromodelos acerca de la bifurcación con diferentes escenarios temporales, para continuar fortaleciendo este tipo de experimentación.
- Efectuar pruebas alimentando al modelo con sedimento, es decir, considerando la introducción del material que teóricamente sería arrastrado desde aguas arriba de la frontera del micromodelo, con el fin de constar si esto aporta a que se obtengan mejores



resultados al evaluar los parámetros morfológicos resultantes de las secciones transversales.

- Es conveniente realizar el análisis de micromodelos en casos de estudio más sencillos que el de una bifurcación, con el objetivo de reducir el valor del Error Porcentual Medio Absoluto al evaluar los parámetros de profundidad máxima y área en dichos casos, para justificar de manera más contundente, el empleo de micromodelos en el estudio de erosión y deposición de sedimentos dentro de los cauces.
- Una vez que en algún micromodelo se haya reproducido el fondo de prototipo de manera aceptable (MAPE en el área de las secciones transversales no mayor a 16.30%, el máximo reportado en estudios de USACE), pueden analizarse en el modelo características del flujo tales como la velocidad y su distribución espacial, con el objeto de apreciar la correspondencia de estos valores en prototipo.
- Utilizar modelos numéricos que analicen la erosión y deposición de sedimentos en cauces, para comparar sus resultados con los que puedan obtenerse al experimentar en un micromodelo, para un mismo caso de estudio.
- Realizar el análisis de un mismo caso de estudio probando distintos valores de escala de longitud horizontal, números de distorsión y tamaños de partículas de sedimento, con el propósito de evaluar los efectos de escala en un micromodelo y cuál de los factores o combinaciones de estos son los que tienen mayor peso sobre dichos efectos.



7 BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, México: Limusa.
- Aparicio Mijares, J., Ramírez Muñoz, J. C., & Mejía Zermeño, R. (2010). *Gasto Formativo*. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., & Luna-Cruz, F. (Mayo-Junio de 2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(3), 5-32.
- ASCE. (2000). *Hydraulic Modeling Concepts and Practice*. (R. Ettema, R. Arndt, P. Roberts, & T. Wahl, Edits.) Reston, Virginia, Estados Unidos de América: American Society of Civil Engineers.
- Avila-Galindo, F. (2011). *Estudio en mini-modelo de la socavación al pie de una cubeta de lanzamiento*. Tesis de Maestría en Ingeniería. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CFE. (1983). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia* (Vol. A.2.15 Técnicas Experimentales). México: Comisión Federal de Electricidad.
- Davinroy, R. D. (1994). *Physical sediment modeling of the Mississippi River on a micro scale*. Master thesis. Missouri: University of Missouri-Rolla.
- Davinroy, R. D. (5 de August de 1997). *United States of America Patente n° 5 653 592*.
- Davinroy, R. D. (July de 1999). River replication. *Civil Engineering*, 69(7), 60-64.
- Davinroy, R. D., Gaines, R. A., Gordon, D. C., Hopkins, L. L., Barretta, D. P., Brown, J. L., . . . Krichel, B. J. (2011). *Hydraulic Sediment Response Modeling, Replication Accuracy to the River (Technical Paper M53)*. U.S. Army Corps of Engineers, St. Louis and Memphis Districts.
- Echávez, G. (1996). *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo*. Ciudad de México, México: UNAM, CONACYT, AMH.
- Echávez, G., & Ruiz, G. (2013). *The use of mini- and micro-models to solve some type of problems*. Conference Paper. Beijing: Tsinghua University Press.



- Espinoza-Ayala, J., & González-Verdugo, J. A. (2014). *Micromodelos, una herramienta para el estudio de procesos fluviales en laboratorio*. Coordinación de Hidráulica. Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ettema, R. (2001). "A framework for evaluating micro-models." *Limited Distribution Report No. 295*. The University of Iowa. Iowa City: Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Ettema, R., & Maynard, S. T. (2002). Framework for evaluating very small hydraulic models of channel-control works. *Hydraulic Measurement and Experimental Methods*.
- Ettema, R., & Muste, M. (2002). *Scale effect trends in hydraulic models of flow at a dike in a flat-bed channel*. The University of Iowa, College of Engineering. Iowa: IHR—Hydroscience & Engineering.
- Gaines, R. A., & Maynard, S. T. (May de 2001). Microscale loose-bed hydraulic models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(5), 335-338.
- Gordon, D. (July/August de 2000). Micro River Modeling. *Land and Water*, 49-50.
- Gordon, D. C., & Davinroy, R. D. (2001). Bridge abutment erosion problem solved with a small scale physical sediment transport modeling approach. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, I*, págs. 128-135. Reno, Nevada.
- Gordon, D. C., & Davinroy, R. D. (2001). Small scale physical sediment transport modeling approach used to solve a chronic dredging problem on the Atchafalaya River at Morgan City, Louisiana. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, I*, págs. 40-46. Reno, Nevada.
- Graf, W. H. (1984). *Hydraulics of sediment transport*. United States of America: Water Resources Publication.
- IMTA. (2016). *Estudio de la evolución del comportamiento morfológico de las bifurcaciones en ríos*. Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Jiménez-Castañeda, A. A., Gracia-Sánchez, J., Berezowsky-Verduzco, M., & Martínez-Cuaxospa, J. (Octubre-Diciembre de 2008). Funcionamiento hidráulico de la bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal. *Ingeniería hidráulica en México*, XXIII(4), 53-67.
- Levi, E. (2001). *El agua según la ciencia*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



- Maynard, S. T. (1 de April de 2006). Evaluation of the Micromodel: An Extremely Small-Scale Movable Bed Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 343-353.
- Maza, J. A., & García, M. (1997). *Estabilidad de Cauces. Capítulo 12 del Manual de Ingeniería de Ríos*. D. F., México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Mustafa, M. T., Cox, A. L., Davinroy, R. D., Krischel, B. J., & Nguyen, I. H. (2017). Mobile-bed similitude evaluation of hydraulic sediment response models. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1-16.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2010). *Hydraulic Modelling: An Introduction: Principles, methods and applications*. New York: Spon Press.
- PolyWorks®. (2016). *PolyWorks Modeling and Inspection Software Suite*. InnovMetric Software Inc.
- Ramírez-Muñoz, J. C. (2004). *Gasto formativo de cauces naturales, criterios y aplicación a cuatro corrientes aluviales del Golfo de México. Tesis de Maestría en Ingeniería*. Jiutepec, Morelos, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rivera-Trejo, F., Vazquez-Rodríguez, J. M., Mendoza-Palacios, J. d., Estrada-Botello, M., & Soto-Cortés, G. (Julio-Septiembre de 2008). Alteración que presenta la distribución de sedimentos en una bifurcación de un río de planicie debido a cambios morfológicos inducidos. Estudio de campo. *Ingeniería hidráulica en México*, XXIII(3), 49-63.
- Rouse, H. (Abril de 1983). Highlights in the History of Hydraulics. *Books at Iowa*(38), 3-17.
- U.S. Department of Defense. (1992). *MIL-P-85891A*. U.S. Department of Defense.
- Vergara Sánchez, M. Á. (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. México: Alfaomega.
- Yalin, M. S. (1971). *Theory of hydraulics models*. London, United Kingdom: MacMillan.



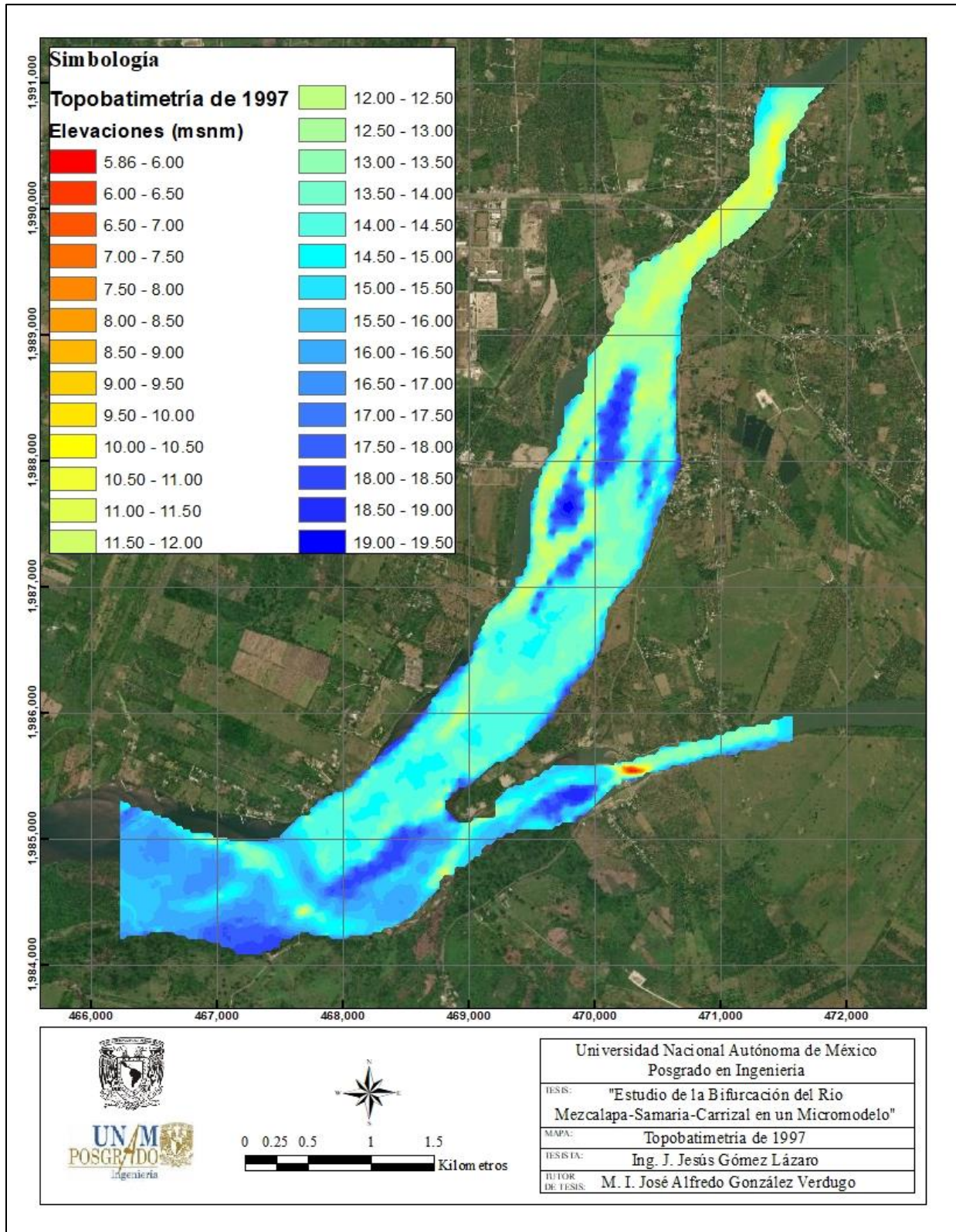
8 ANEXOS

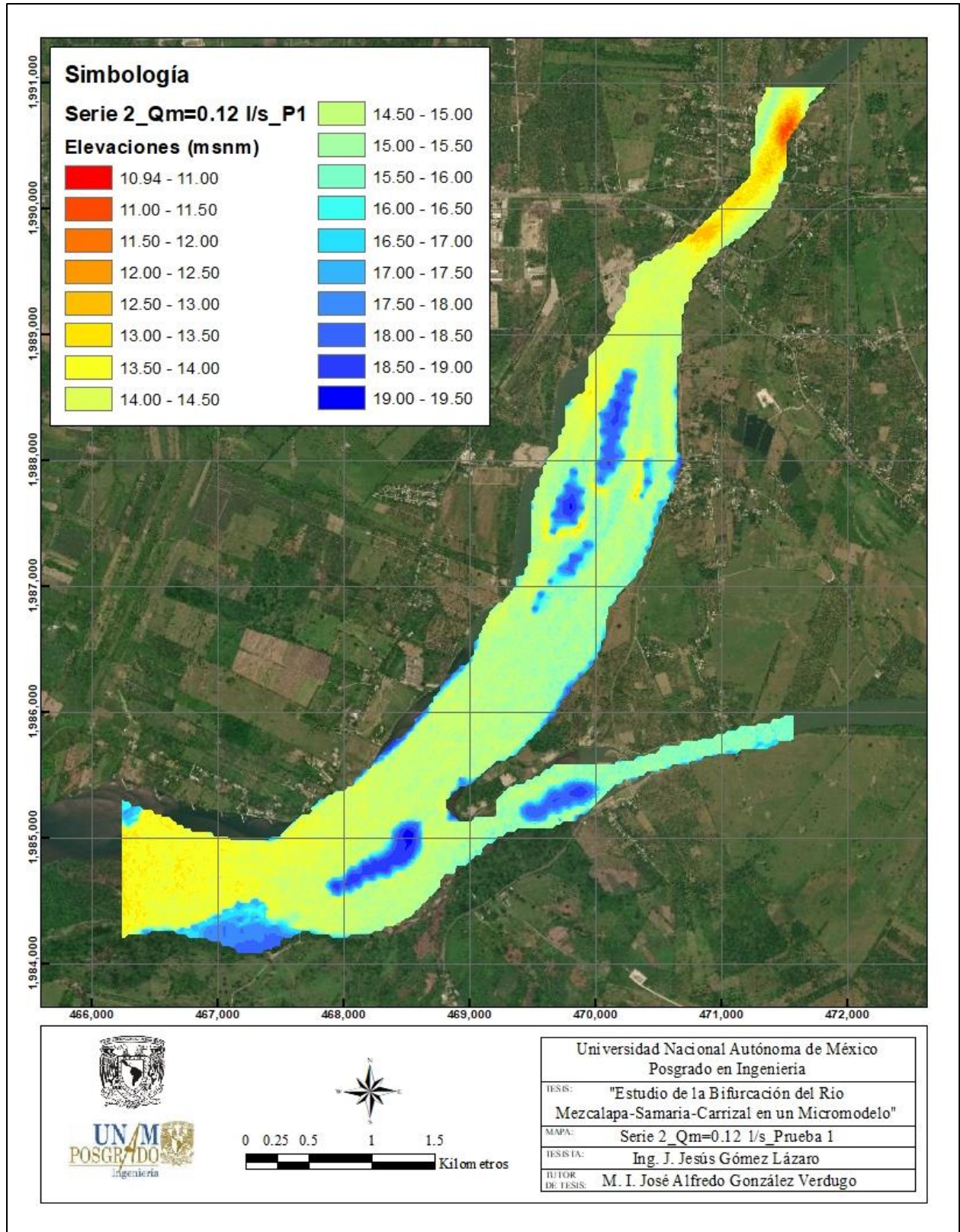
8.1 ANEXO A. GASTOS MÁXIMOS ANUALES

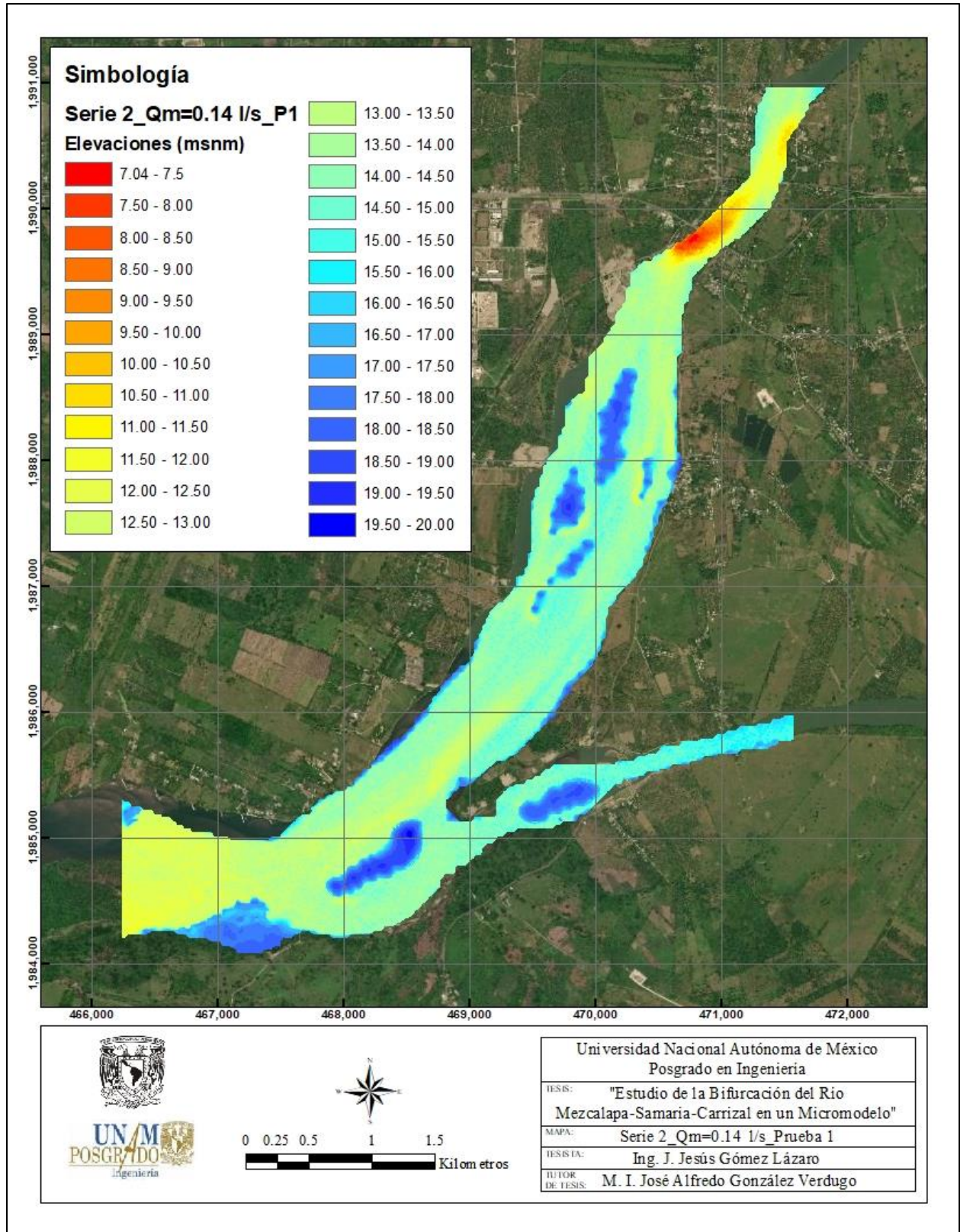
Fecha	Gastos registrados Q (m ³ /s)			T _R (Años)	Fecha	Gastos registrados Q (m ³ /s)			T _R (Años)
	Estación González	Estación Samaria	Total			Estación González	Estación Samaria	Total	
13/10/1958	762.00	1949.00	2711.00	2.11	17/10/1978	488.45	1757.83	2246.27	1.67
19/10/1959	887.00	3161.00	4048.00	10.00	17/09/1979	524.50	2347.17	2871.67	2.67
02/11/1960	719.00	2204.00	2923.00	2.86	01/11/1980	649.12	2290.00	2939.12	3.08
17/10/1961	851.00	2363.00	3214.00	3.64	26/08/1981	320.50	2244.00	2564.50	2.00
30/09/1962	925.00	2308.00	3233.00	4.00	05/11/1982	249.21	1890.00	2139.21	1.38
25/09/1963	966.90	3570.00	4536.90	40.00	04/01/1983	246.11	1473.00	1719.11	1.11
07/10/1964	905.50	3096.60	4002.10	8.00	20/09/1984	368.00	1660.00	2028.00	1.33
06/10/1965	990.00	3083.76	4073.76	13.33	29/08/1985	376.86	1352.00	1728.86	1.14
26/10/1966	670.80	1828.00	2498.80	1.90	01/06/1986	1864.30	2320.96	2320.96	1.82
24/12/1967	1038.94	3037.50	4076.44	20.00	24/10/1993	518.18	1642.98	2161.16	1.43
25/10/1968	789.14	2028.50	2817.64	2.50	12/10/1994	419.87	1419.02	1838.89	1.18
15/09/1969	902.00	2545.00	3447.00	4.44	08/09/1995	222.40	1653.25	1875.65	1.21
02/10/1970	970.00	2690.50	3660.50	5.71	23/08/1996	758.82	1451.98	2210.80	1.60
17/10/1971	461.20	1170.60	1631.80	1.08	19/02/1997	928.81	1084.53	2013.34	1.29
17/12/1972	725.10	2028.40	2753.50	2.35	05/11/1998	782.84	1410.13	2192.97	1.48
25/10/1973	985.50	2650.00	3635.50	5.00	24/10/1999	1340.53	2340.16	3680.69	6.67
21/09/1974	610.00	2121.40	2731.40	2.22	19/02/2001	691.61	1319.45	2011.06	1.25
24/09/1975	476.60	1829.00	2305.60	1.74	03/09/2003	632.34	951.97	1584.31	1.05
23/11/1976	473.80	1733.75	2207.55	1.54	23/04/2004	674.36	893.28	1567.63	1.03
12/11/1977	601.00	2571.00	3172.00	3.33					

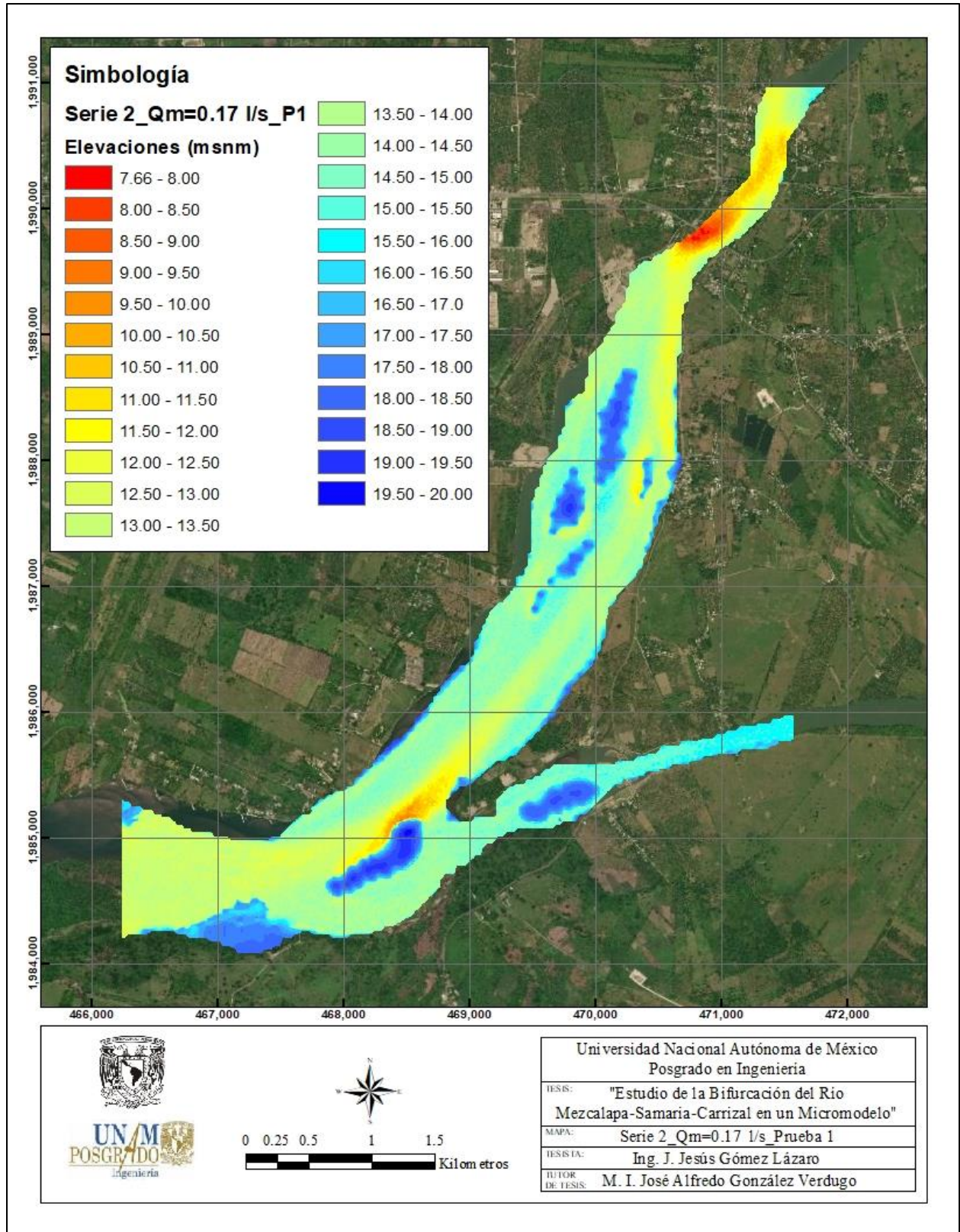


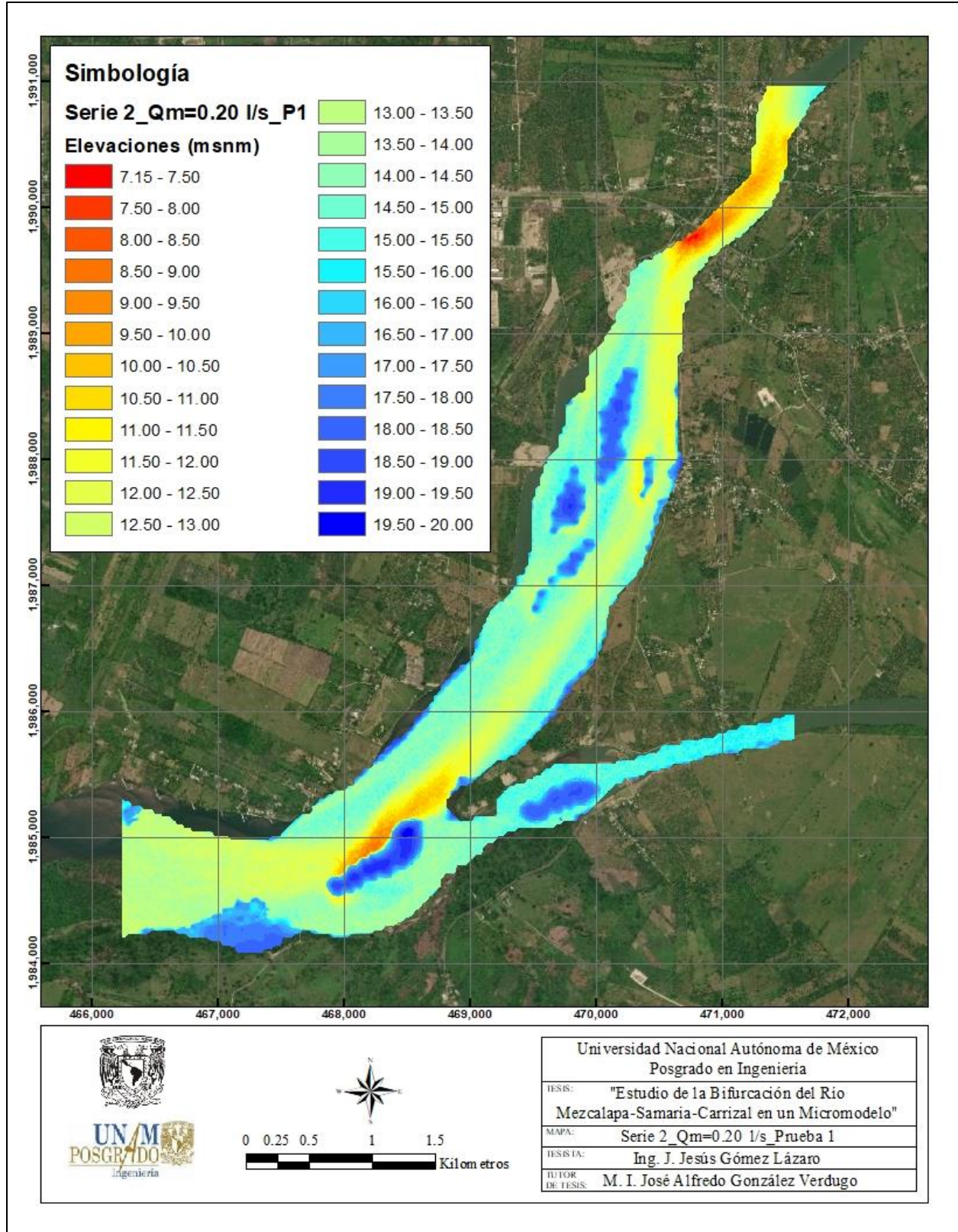
8.2 ANEXO B. LEVANTAMIENTOS TOPOBATIMÉTRICOS

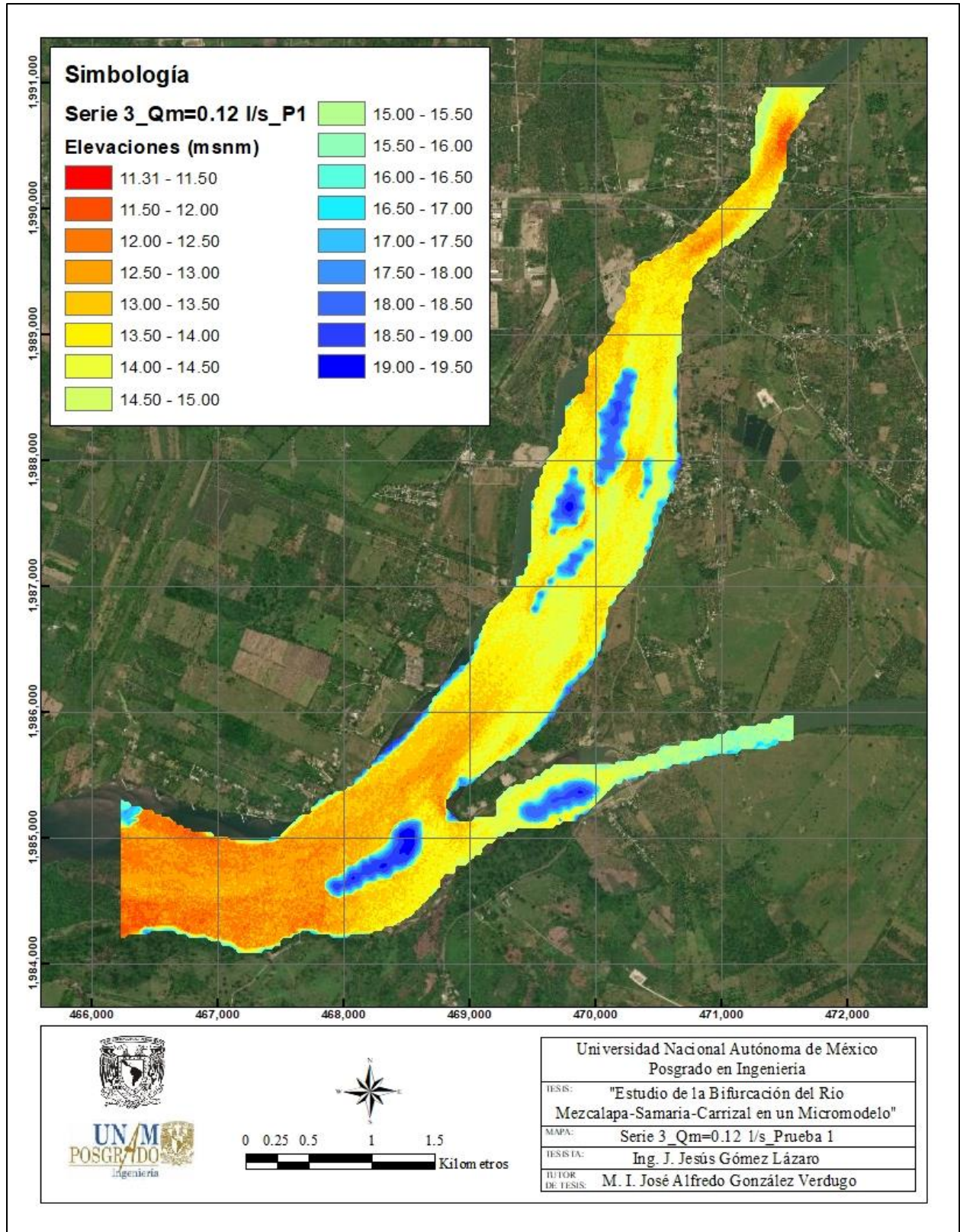


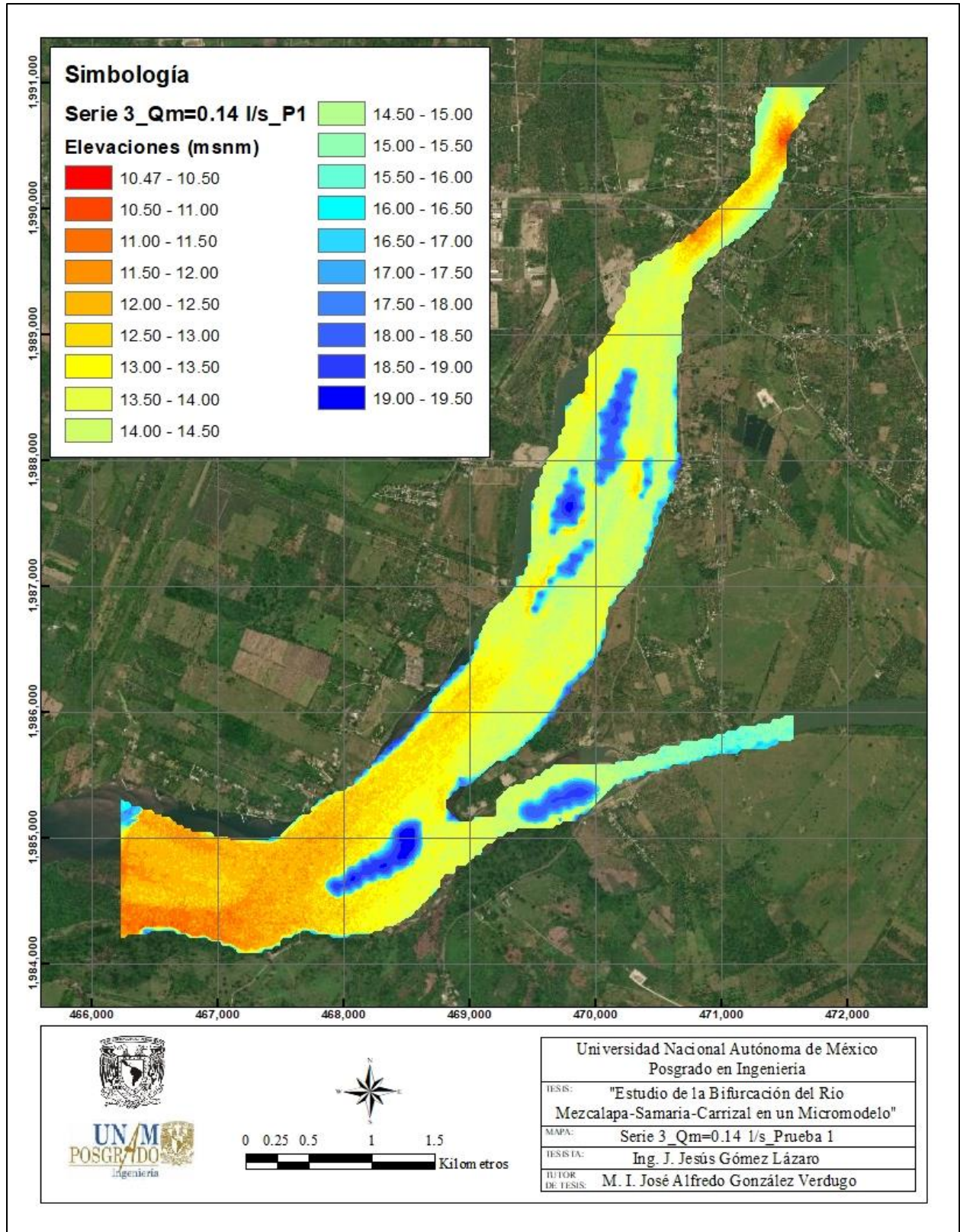


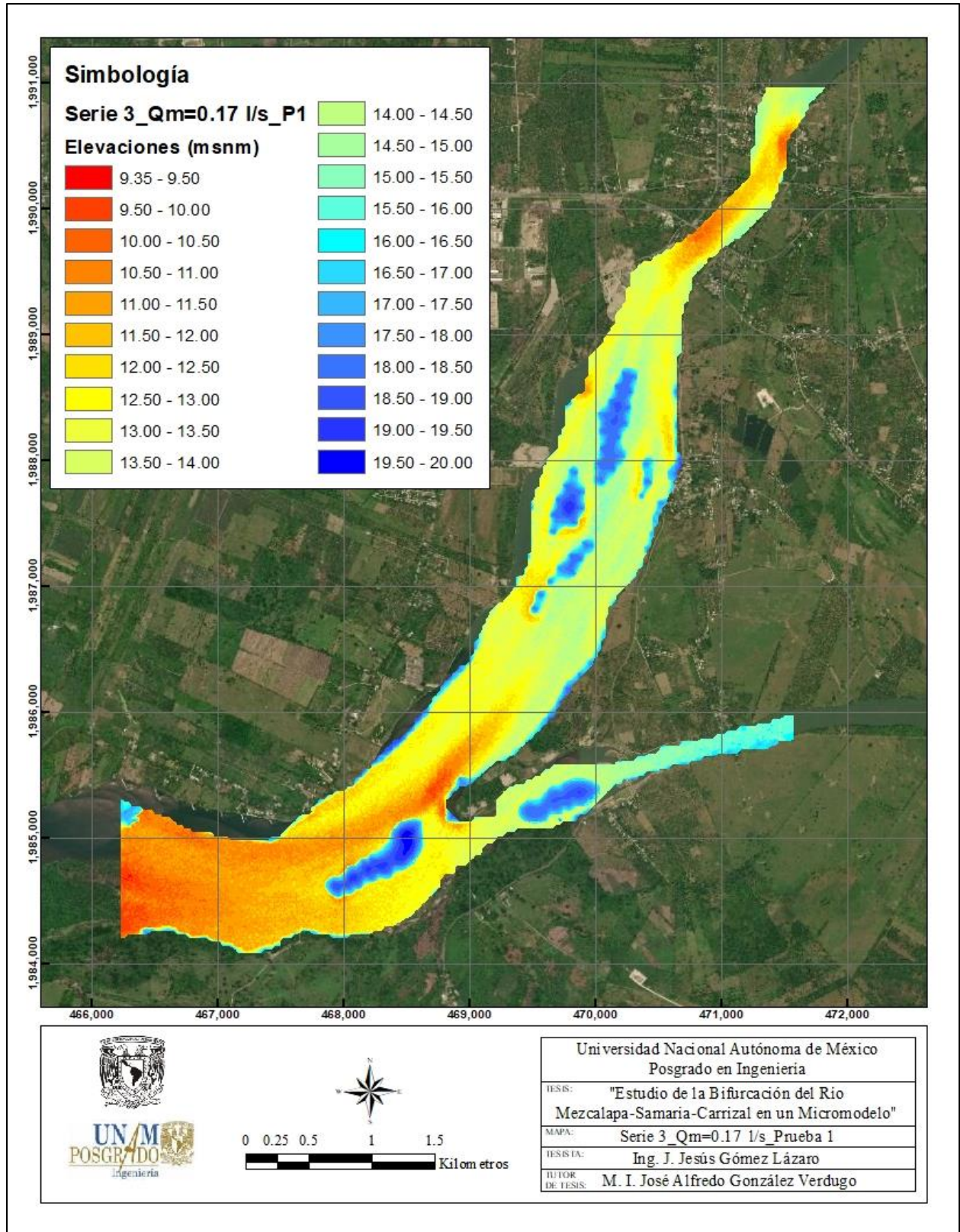


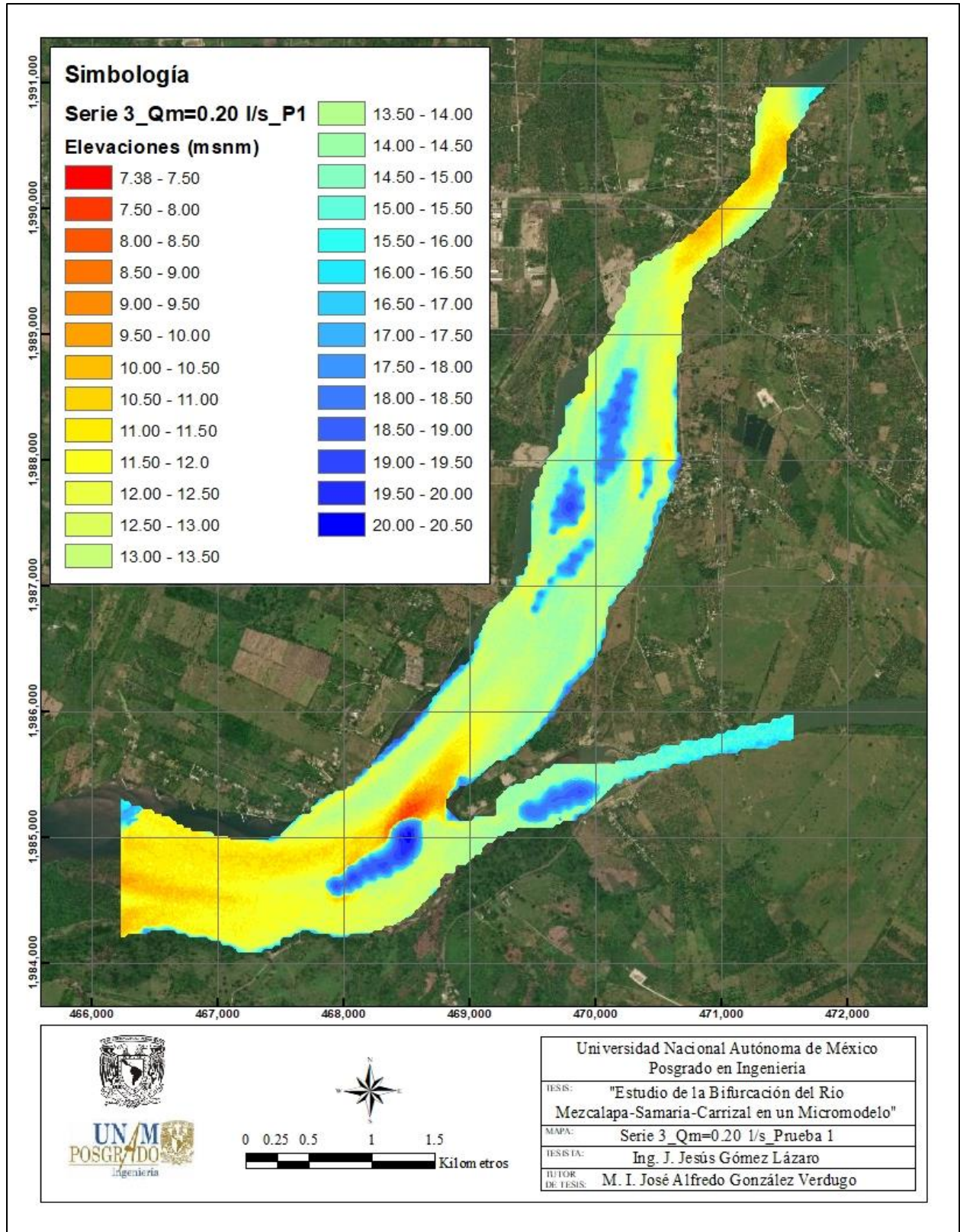


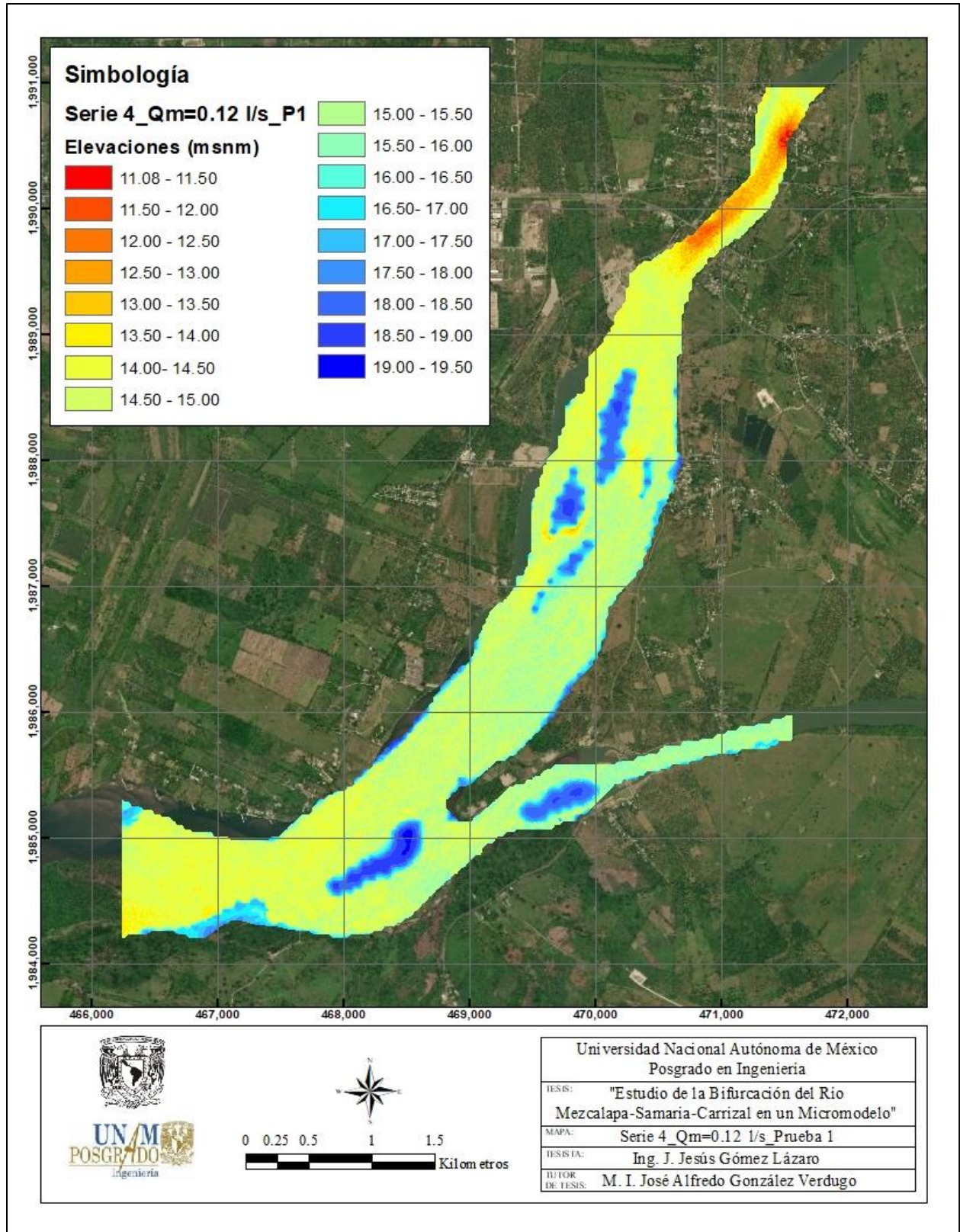


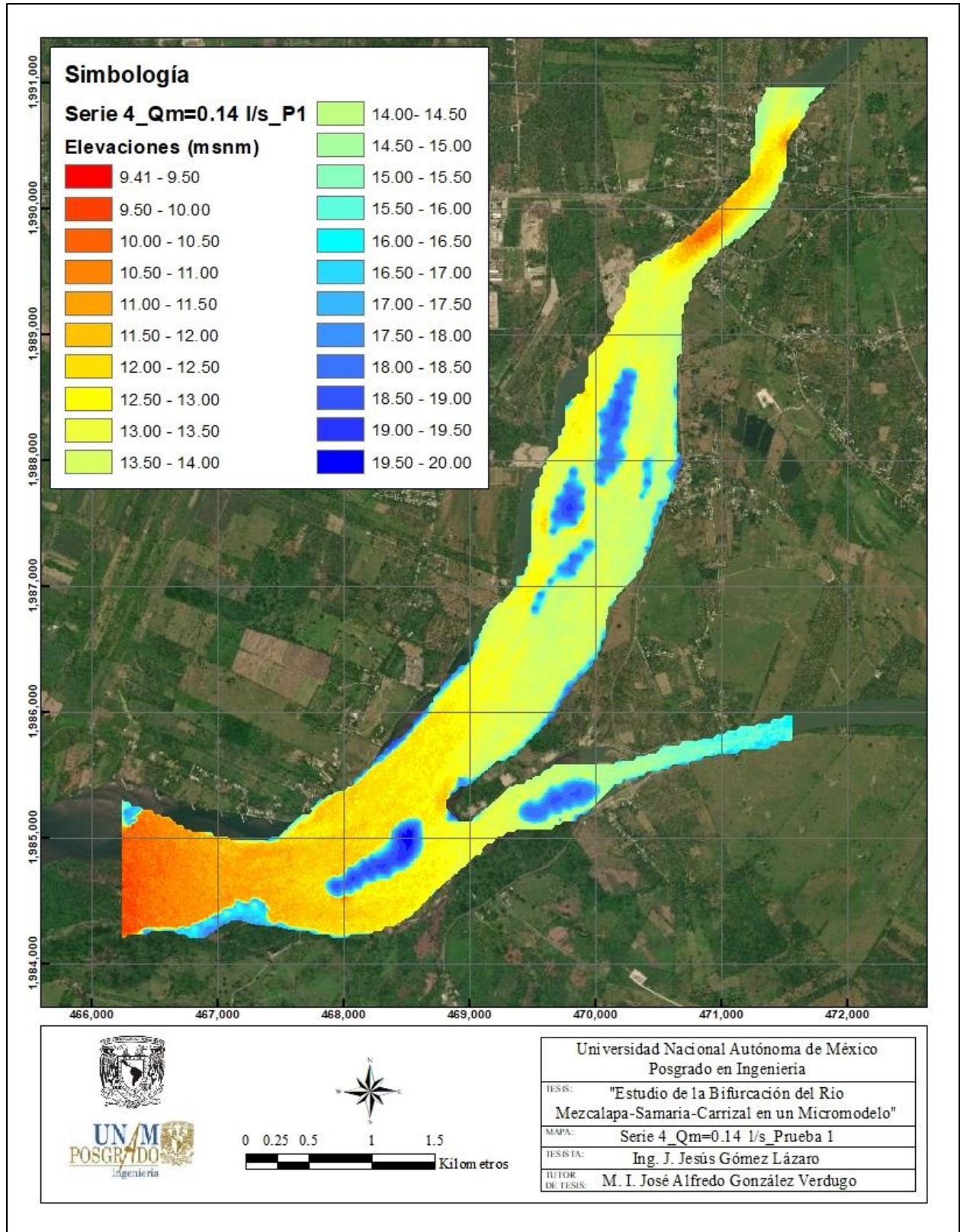


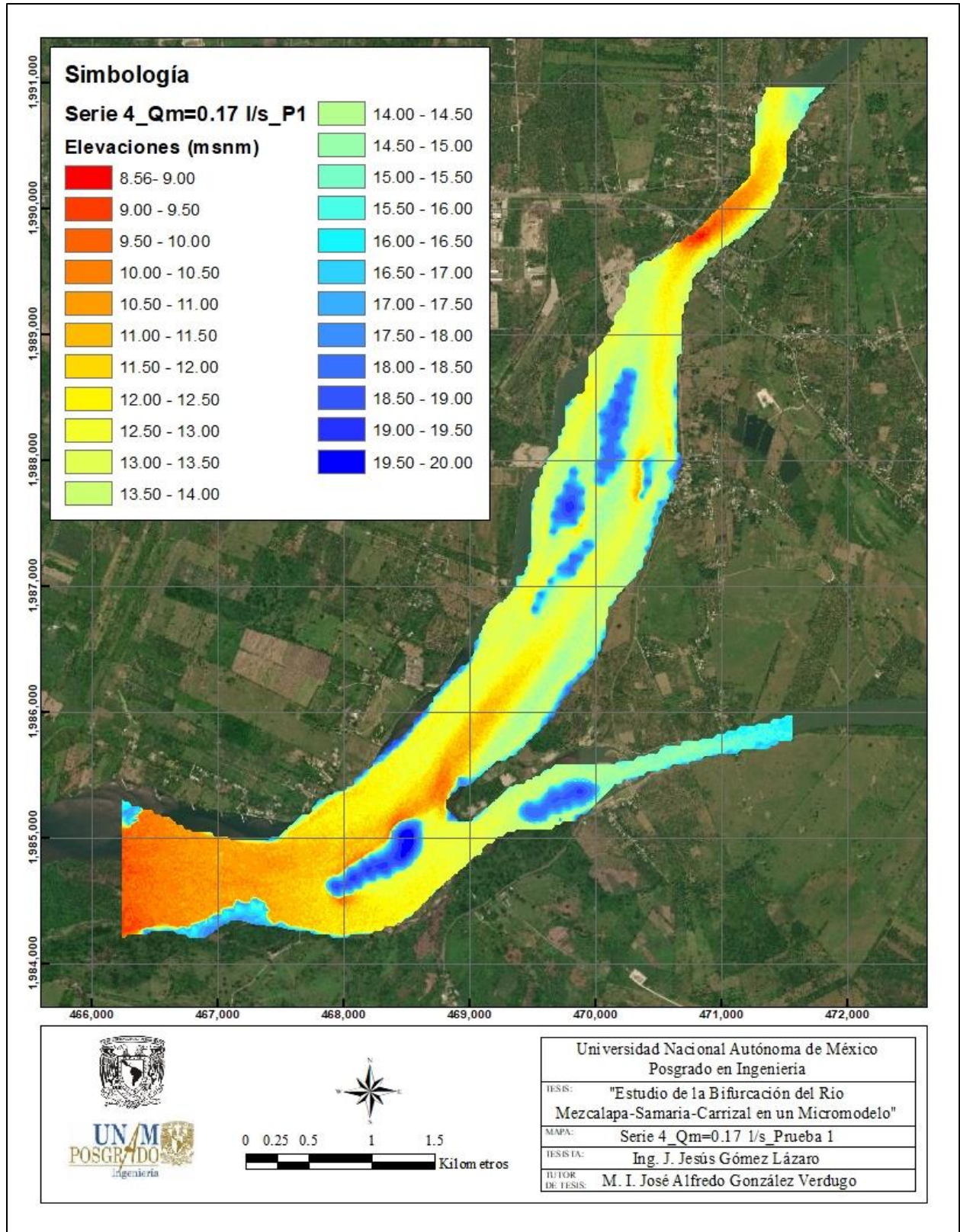


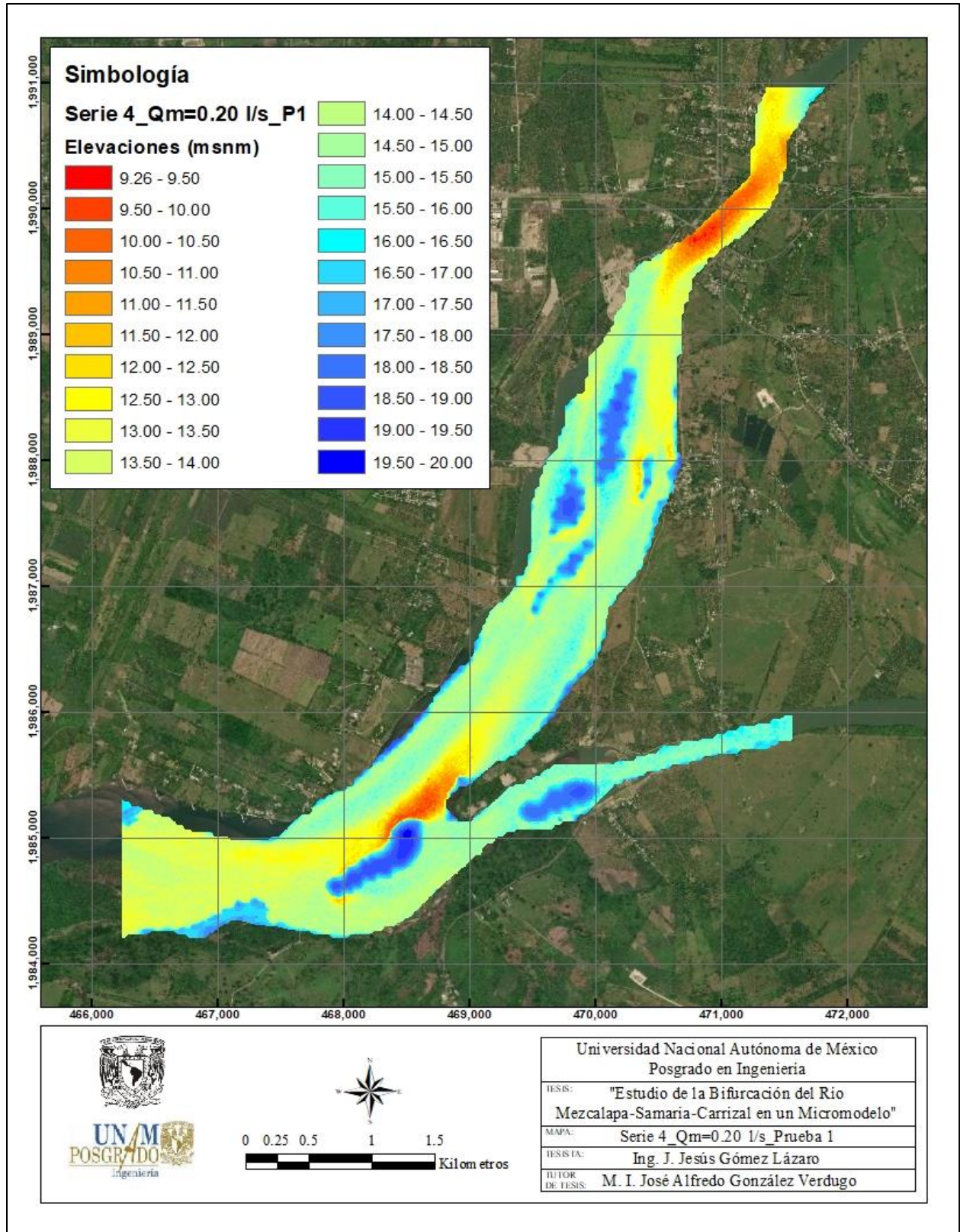














8.3 ANEXO C. TABLAS DE CÁLCULO DEL MAPE

8.3.1 C.1 Serie 2

Río	Sección transversal	Profundidad máxima (msnm)					Error absoluto (%)			
		Topobatimetría 1997	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1
Mezcalapa	1	13.09	13.12	11.82	12.68	12.70	0.25	9.67	3.14	2.96
	2	13.81	13.44	12.09	12.74	12.54	2.67	12.48	7.74	9.17
	3	13.33	13.65	12.58	12.47	12.10	2.45	5.59	6.43	9.20
						SUMA	5.36	27.74	17.32	21.33
						MAPE	1.79	9.25	5.77	7.11
Carrizal	4	14.53	14.11	12.99	13.29	11.61	2.90	10.58	8.53	20.08
	5	14.56	14.15	12.46	13.04	11.63	2.80	14.43	10.41	20.09
	6	15.24	14.46	13.47	13.60	13.05	5.15	11.63	10.74	14.40
	7	15.09	14.33	13.55	13.71	13.34	5.03	10.25	9.18	11.63
	8	15.04	14.29	13.46	13.87	13.50	5.00	10.48	7.79	10.23
	9	13.35	14.67	13.91	14.16	13.88	9.92	4.22	6.08	3.98
	10	11.90	14.82	14.13	13.73	14.05	24.55	18.79	15.42	18.11
	11	13.90	14.76	13.96	14.06	14.61	6.17	0.38	1.13	5.07
	12	14.30	14.53	14.14	14.48	14.28	1.56	1.17	1.21	0.19
	13	14.41	14.85	14.29	14.35	14.67	3.06	0.87	0.46	1.80
	14	14.93	14.85	14.38	14.54	14.34	0.57	3.73	2.62	3.94
	15	13.44	15.14	14.58	14.53	14.56	12.67	8.47	8.12	8.34
	16	12.99	15.12	14.83	14.89	14.80	16.36	14.14	14.59	13.93
	17	13.36	15.23	14.59	14.97	14.96	13.93	9.21	11.99	11.97
	18	13.16	15.25	14.78	14.74	14.97	15.93	12.37	12.07	13.82
	19	13.47	15.16	15.00	15.22	15.03	12.52	11.32	12.99	11.58
	20	13.50	15.19	15.02	15.35	15.16	12.53	11.32	13.72	12.29
						SUMA	150.65	153.36	147.06	181.44
						MAPE	8.86	9.02	8.65	10.67
Samaria	21	13.63	13.78	12.76	12.18	9.71	1.04	6.42	10.66	28.76
	22	13.57	13.99	12.88	11.52	8.87	3.07	5.12	15.09	34.62
	23	13.12	13.94	12.62	9.96	9.31	6.24	3.79	24.08	29.05
	24	13.51	14.20	12.40	11.29	10.27	5.08	8.27	16.44	24.03
	25	13.78	14.29	12.66	11.90	11.62	3.66	8.15	13.68	15.72
	26	11.81	14.39	12.86	12.38	12.05	21.78	8.86	4.84	1.98
	27	12.53	14.30	12.84	12.61	12.23	14.10	2.45	0.68	2.39
	28	13.10	14.54	13.00	12.85	12.42	10.99	0.75	1.92	5.22
	29	13.11	14.65	13.34	13.11	12.56	11.74	1.80	0.00	4.13
	30	13.36	14.22	13.60	13.31	12.61	6.42	1.77	0.35	5.61
	31	12.12	14.52	13.11	13.11	12.92	19.81	8.17	8.19	6.65
	32	11.71	14.15	13.38	13.39	12.84	20.80	14.27	14.30	9.61
	33	11.93	13.92	13.68	13.43	12.82	16.69	14.63	12.53	7.46
	34	11.93	13.68	12.86	12.61	12.24	14.66	7.78	5.68	2.62
	35	11.98	13.12	13.15	12.64	12.20	9.53	9.70	5.45	1.83
	36	12.49	13.64	12.82	11.94	11.18	9.26	2.62	4.42	10.44
	37	12.01	13.52	12.70	11.96	11.63	12.57	5.71	0.48	3.22
	38	11.94	14.03	12.88	11.98	11.95	17.44	7.82	0.27	0.08
	39	11.42	13.99	13.16	12.14	11.76	22.48	15.21	6.34	2.99
	40	11.50	13.93	11.77	11.67	10.92	21.07	2.36	1.49	5.05
	41	10.83	12.58	7.72	7.89	7.73	16.18	28.73	27.16	28.64
	42	11.31	13.14	10.29	10.34	9.96	16.12	9.05	8.55	11.98
	43	11.21	13.11	11.61	10.58	9.48	16.91	3.57	5.64	15.46
	44	10.85	12.83	11.52	10.82	10.35	18.30	6.25	0.22	4.54
							SUMA	315.93	183.24	188.47
						MAPE	13.16	7.64	7.85	10.92
						MAPE BIFURCACIÓN	10.73	8.28	8.02	10.57

ESTUDIO DE LA BIFURCACIÓN DE RÍO MEZCALAPA-SAMARIA-CARRIZAL EN UN MICROMODELO



Río	Sección transversal	Área (m ²)					Error absoluto (%)			
		Topobatimetría 1997	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1
Mezcalapa	1	580.70	2280.56	3353.01	2790.22	2731.13	292.73	477.41	380.50	370.32
	2	527.15	1739.31	2469.62	2096.06	2190.35	229.94	368.48	297.62	315.50
	3	673.99	1175.76	1591.88	1659.54	1790.79	74.45	136.19	146.23	165.70
						SUMA	597.12	982.08	824.34	851.52
						MAPE	199.04	327.36	274.78	283.84
Carrizal	4	396.06	621.57	872.43	812.45	941.48	56.94	120.28	105.14	137.71
	5	293.67	577.65	893.83	854.78	959.17	96.70	204.37	191.07	226.62
	6	207.27	586.13	852.09	855.50	863.78	182.78	311.10	312.74	316.74
	7	231.60	675.37	951.11	969.76	902.25	191.62	310.68	318.73	289.58
	8	339.71	577.75	805.00	802.87	836.84	70.07	136.96	136.34	146.34
	9	453.56	454.41	734.60	629.93	731.39	0.19	61.96	38.88	61.25
	10	618.26	531.76	743.70	808.82	729.21	13.99	20.29	30.82	17.95
	11	650.12	496.47	873.95	735.98	692.97	23.63	34.43	13.21	6.59
	12	430.35	456.31	676.37	534.93	532.85	6.03	57.17	24.30	23.82
	13	370.63	250.35	420.56	391.05	336.80	32.45	13.47	5.51	9.13
	14	367.26	268.86	398.88	347.87	385.20	26.79	8.61	5.28	4.89
	15	595.28	313.13	438.74	395.19	391.83	47.40	26.30	33.61	34.18
	16	458.53	213.50	272.41	233.60	237.91	53.44	40.59	49.05	48.11
	17	407.69	184.20	250.55	230.34	195.46	54.82	38.55	43.50	52.06
	18	452.02	188.72	276.12	233.41	199.97	58.25	38.91	48.36	55.76
	19	374.28	155.90	196.57	153.29	162.20	58.34	47.48	59.04	56.66
							SUMA	1041.39	1527.13	1481.20
						MAPE	61.26	89.83	87.13	91.18
Samaria	21	1256.49	1261.78	1684.24	1769.49	1971.81	0.42	34.04	40.83	56.93
	22	1303.28	1160.16	1651.19	1799.78	1954.73	10.98	26.69	38.10	49.99
	23	1095.09	948.65	1429.90	1524.09	1719.52	13.37	30.57	39.17	57.02
	24	1242.32	986.34	1603.72	1872.31	2078.63	20.60	29.09	50.71	67.32
	25	1387.26	1059.76	1603.90	1842.26	1989.63	23.61	15.62	32.80	43.42
	26	1635.36	1153.00	1741.06	1826.73	1868.22	29.50	6.46	11.70	14.24
	27	1772.62	1233.51	1797.13	1823.56	1938.57	30.41	1.38	2.87	9.36
	28	1874.28	1155.33	1799.84	1731.69	1826.22	38.36	3.97	7.61	2.56
	29	1934.92	1124.56	1764.73	1732.89	1842.20	41.88	8.80	10.44	4.79
	30	1948.96	1250.23	1834.38	1851.03	2008.64	35.85	5.88	5.02	3.06
	31	2096.89	1230.71	1903.47	1839.75	2047.26	41.31	9.22	12.26	2.37
	32	2053.76	1002.64	1582.07	1677.30	1814.15	51.18	22.97	18.33	11.67
	33	2494.51	1067.29	1656.79	1726.36	1805.62	57.21	33.58	30.79	27.62
	34	2262.34	1165.56	1734.82	1841.62	2033.16	48.48	23.32	18.60	10.13
	35	2242.84	1460.96	1870.18	1967.74	2046.84	34.86	16.62	12.27	8.74
	36	1629.35	1098.08	1477.78	1552.00	1637.52	32.61	9.30	4.75	0.50
	37	1927.10	1219.62	1803.41	1900.51	1999.10	36.71	6.42	1.38	3.74
	38	2560.46	1484.31	2258.42	2270.98	2359.14	42.03	11.80	11.31	7.86
	39	2348.94	1304.09	1889.96	2117.36	2243.74	44.48	19.54	9.86	4.48
	40	2479.30	1482.76	1906.42	2258.82	2255.66	40.19	23.11	8.89	9.02
	41	2188.51	1284.86	3264.28	3259.61	2923.84	41.29	49.16	48.94	33.60
	42	2003.26	1434.60	1843.22	2326.48	2104.05	28.39	7.99	16.13	5.03
	43	1952.68	938.27	1414.19	1526.76	2046.13	51.95	27.58	21.81	4.79
	44	1635.25	1127.20	1472.27	1902.97	2245.84	31.07	9.97	16.37	37.34
						SUMA	826.75	433.07	470.95	475.57
						MAPE	34.45	18.04	19.62	19.82
						MAPE BIFURCACIÓN	56.03	66.87	63.10	65.39



8.3.2 C.2 Serie 3

Río	Sección transversal	Profundidad máxima (msnm)					Error absoluto (%)				
		Topobatiometría 1997	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	
Mezcalapa	1	13.09	11.82	11.16	10.03	10.43	9.66	14.73	23.33	20.34	
	2	13.81	12.04	11.07	10.52	10.58	12.86	19.88	23.82	23.42	
	3	13.33	12.16	11.70	10.51	10.88	8.77	12.21	21.17	18.38	
						SUMA	31.28	46.82	68.32	62.14	
						MAPE	10.43	15.61	22.77	20.71	
Carrizal	4	14.53	12.25	12.31	11.13	11.06	15.69	15.28	23.40	23.88	
	5	14.56	12.57	12.23	11.03	10.30	13.69	15.97	24.22	29.26	
	6	15.24	12.70	12.55	11.76	11.47	16.66	17.67	22.81	24.75	
	7	15.09	13.08	12.73	12.03	12.15	13.36	15.66	20.33	19.50	
	8	15.04	13.24	13.27	12.37	12.55	11.95	11.74	17.78	16.55	
	9	13.35	13.06	13.41	12.08	12.78	2.18	0.44	9.49	4.29	
	10	11.90	14.07	13.67	13.45	13.01	18.25	14.95	13.07	9.38	
	11	13.90	13.71	13.68	12.98	13.37	1.36	1.60	6.66	3.85	
	12	14.30	13.64	13.57	13.66	13.67	4.65	5.16	4.47	4.41	
	13	14.41	13.89	13.78	13.66	13.70	3.64	4.40	5.22	4.95	
	14	14.93	13.97	14.06	13.89	13.75	6.45	5.86	6.95	7.92	
	15	13.44	13.99	14.17	13.99	14.21	4.10	5.39	4.12	5.69	
	16	12.99	14.67	14.80	14.85	14.99	12.94	13.88	14.28	15.34	
	17	13.36	14.77	14.84	14.86	14.68	10.56	11.06	11.17	9.85	
	18	13.16	14.94	15.02	14.93	15.00	13.54	14.20	13.47	13.99	
	19	13.47	15.11	15.11	15.14	15.34	12.17	12.11	12.34	13.83	
	20	13.50	15.27	15.37	15.25	15.09	13.13	13.89	13.01	11.80	
						SUMA	174.33	179.25	222.80	219.26	
						MAPE	10.25	10.54	13.11	12.90	
Samaria	21	13.63	12.12	11.92	10.71	10.53	11.14	12.59	21.46	22.77	
	22	13.57	12.47	11.92	10.89	10.71	8.07	12.17	19.78	21.09	
	23	13.12	12.63	12.16	10.91	8.45	3.72	7.33	16.87	35.64	
	24	13.51	12.41	12.63	9.88	9.74	8.16	6.54	26.88	27.94	
	25	13.78	12.43	12.38	10.73	10.62	9.84	10.16	22.15	22.93	
	26	11.81	12.58	12.43	10.98	11.26	6.52	5.24	7.07	4.65	
	27	12.53	12.82	12.38	11.60	11.74	2.29	1.22	7.45	6.28	
	28	13.10	13.08	12.77	11.91	12.33	0.14	2.54	9.08	5.89	
	29	13.11	13.34	12.98	12.56	12.88	1.80	0.96	4.19	1.75	
	30	13.36	13.18	13.21	12.85	13.04	1.37	1.15	3.86	2.44	
	31	12.12	13.34	12.63	11.63	12.53	10.03	4.23	4.07	3.40	
	32	11.71	13.15	12.58	12.11	12.40	12.30	7.44	3.41	5.83	
	33	11.93	13.51	13.53	12.90	13.00	13.23	13.40	8.11	8.92	
	34	11.93	12.80	12.69	11.54	11.75	7.25	6.38	3.26	1.51	
	35	11.98	12.35	12.99	13.18	12.78	3.07	8.41	9.97	6.69	
	36	12.49	12.79	13.18	12.70	11.60	2.42	5.52	1.71	7.10	
	37	12.01	12.88	12.95	11.38	12.01	7.24	7.82	5.27	0.03	
	38	11.94	13.02	13.19	12.87	11.96	8.97	10.46	7.78	0.15	
	39	11.42	13.14	13.42	12.84	11.96	15.08	17.53	12.39	4.70	
	40	11.50	13.13	13.15	11.73	11.35	14.12	14.34	2.02	1.28	
	41	10.83	12.31	11.49	10.06	9.92	13.66	6.06	7.11	8.45	
	42	11.31	12.96	12.59	11.15	10.65	14.57	11.31	1.45	5.86	
	43	11.21	13.00	12.38	11.64	10.51	15.91	10.42	3.79	6.29	
	44	10.85	12.20	11.98	11.25	10.17	12.49	10.42	3.69	6.19	
							SUMA	203.36	193.65	212.79	217.79
						MAPE	8.47	8.07	8.87	9.07	
						MAPE BIFURCACIÓN	9.29	9.54	11.45	11.34	

ESTUDIO DE LA BIFURCACIÓN DE RÍO MEZCALAPA-SAMARIA-CARRIZAL EN UN MICROMODELO



Río	Sección transversal	Área (m ²)				Error absoluto (%)				
		Topobatiometría 1997	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1
Mezcalapa	1	580.70	3448.57	3794.04	4945.43	4438.02	493.87	553.36	751.64	664.26
	2	527.15	3324.15	3709.75	4691.04	4324.02	530.59	603.73	789.88	720.26
	3	673.99	3251.15	3766.25	4391.62	4084.07	382.37	458.80	551.58	505.95
						SUMA	1406.83	1615.89	2093.10	1890.47
						MAPE	468.94	538.63	697.70	630.16
Carrizal	4	396.06	1142.18	1150.18	1437.73	1371.30	188.39	190.41	263.01	246.24
	5	293.67	1077.74	1171.80	1485.70	1431.21	266.99	299.02	405.91	387.35
	6	207.27	1128.98	1153.82	1462.64	1412.76	444.69	456.67	605.67	581.60
	7	231.60	1221.88	1271.97	1603.22	1432.09	427.59	449.22	592.24	518.35
	8	339.71	968.29	1003.62	1282.05	1215.15	185.03	195.43	277.39	257.70
	9	453.56	822.19	858.75	1130.77	963.84	81.27	89.33	149.31	112.50
	10	618.26	797.54	891.91	1051.29	1013.13	29.00	44.26	70.04	63.87
	11	650.12	904.76	984.32	1130.67	1058.44	39.17	51.41	73.92	62.81
	12	430.35	713.80	742.67	834.12	783.47	65.86	72.57	93.82	82.06
	13	370.63	446.82	457.52	530.19	487.78	20.56	23.44	43.05	31.61
	14	367.26	444.42	515.11	553.25	500.90	21.01	40.26	50.65	36.39
	15	595.28	446.83	513.03	516.57	533.95	24.94	13.82	13.22	10.30
	16	458.53	263.06	257.68	244.61	238.49	42.63	43.80	46.65	47.99
	17	407.69	225.83	213.39	219.57	230.43	44.61	47.66	46.14	43.48
	18	452.02	202.86	252.10	215.38	235.40	55.12	44.23	52.35	47.92
	19	374.28	162.65	174.23	154.93	164.19	56.54	53.45	58.61	56.13
	20	395.85	155.01	117.27	147.72	139.89	60.84	70.37	62.68	64.66
						SUMA	2054.24	2185.35	2904.66	2650.96
						MAPE	120.84	128.55	170.86	155.94
Samaria	21	1256.49	2065.23	2287.48	2652.77	2614.61	64.36	82.05	111.13	108.09
	22	1303.28	1940.70	2186.69	2630.62	2415.50	48.91	67.78	101.85	85.34
	23	1095.09	1597.50	1706.65	2138.97	2058.83	45.88	55.84	95.32	88.01
	24	1242.32	1931.37	1891.33	2458.35	2552.69	55.46	52.24	97.88	105.48
	25	1387.26	1960.76	1922.42	2476.35	2548.04	41.34	38.58	78.51	83.67
	26	1635.36	2083.21	2097.68	2603.17	2510.56	27.39	28.27	59.18	53.52
	27	1772.62	2102.21	2150.92	2624.59	2519.20	18.59	21.34	48.06	42.12
	28	1874.28	1997.57	2121.53	2483.53	2388.48	6.58	13.19	32.51	27.43
	29	1934.92	2053.73	2120.06	2369.30	2301.17	6.14	9.57	22.45	18.93
	30	1948.96	2118.62	2247.78	2398.94	2333.57	8.71	15.33	23.09	19.73
	31	2096.89	2015.98	2208.96	2519.61	2334.53	3.86	5.34	20.16	11.33
	32	2053.76	1809.88	1826.16	2035.80	2018.26	11.87	11.08	0.87	1.73
	33	2494.51	1727.37	1737.79	2064.10	2014.01	30.75	30.34	17.25	19.26
	34	2262.34	1786.31	1784.25	2021.94	2033.93	21.04	21.13	10.63	10.10
	35	2242.84	2185.11	1920.26	2104.24	2141.82	2.57	14.38	6.18	4.50
	36	1629.35	1597.93	1459.53	1652.32	1709.09	1.93	10.42	1.41	4.89
	37	1927.10	1714.91	1631.86	1946.90	2040.77	11.01	15.32	1.03	5.90
	38	2560.46	2115.08	1999.76	2224.93	2370.42	17.39	21.90	13.10	7.42
	39	2348.94	1852.66	1710.33	1997.70	2265.78	21.13	27.19	14.95	3.54
	40	2479.30	1783.64	1719.99	1969.08	2403.28	28.06	30.63	20.58	3.07
	41	2188.51	1600.51	2049.94	2166.83	2888.10	26.87	6.33	0.99	31.97
	42	2003.26	1126.04	1188.44	1958.59	2359.82	43.79	40.67	2.23	17.80
	43	1952.68	1005.83	981.96	1272.17	1583.72	48.49	49.71	34.85	18.90
	44	1635.25	1210.11	1330.06	1489.85	2135.76	26.00	18.66	8.89	30.61
						SUMA	618.13	687.32	823.10	803.33
						MAPE	25.76	28.64	34.30	33.47
						MAPE BIFURCACIÓN	92.71	102.01	132.29	121.47



8.3.3 C.3 Serie 4

Río	Sección transversal	Profundidad máxima (msnm)					Error absoluto (%)				
		Topobatiometría 1997	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	
Mezcalapa	1	13.09	13.95	10.31	9.95	13.14	6.62	21.24	23.96	0.39	
	2	13.81	13.80	10.80	10.37	13.26	0.11	21.79	24.92	4.03	
	3	13.33	14.08	11.06	10.35	12.82	5.67	17.00	22.31	3.79	
						SUMA	12.39	60.03	71.20	8.21	
						MAPE	4.13	20.01	23.73	2.74	
Carrizal	4	14.53	14.02	11.48	11.05	12.76	3.51	20.96	23.91	12.18	
	5	14.56	14.36	10.83	9.98	12.12	1.35	25.61	31.45	16.74	
	6	15.24	14.24	11.68	11.20	13.41	6.57	23.36	26.50	12.03	
	7	15.09	14.12	12.02	11.87	13.92	6.44	20.33	21.34	7.79	
	8	15.04	14.82	12.13	12.04	13.92	1.49	19.36	19.93	7.44	
	9	13.35	14.43	12.68	12.71	14.38	8.15	4.97	4.80	7.73	
	10	11.90	14.43	13.03	12.74	14.52	21.28	9.53	7.13	22.03	
	11	13.90	14.63	13.20	13.05	14.43	5.27	5.04	6.14	3.81	
	12	14.30	14.85	13.53	13.36	14.69	3.85	5.38	6.59	2.69	
	13	14.41	14.70	13.70	13.78	14.72	2.01	4.93	4.38	2.12	
	14	14.93	15.23	13.97	13.90	15.03	1.99	6.41	6.92	0.69	
	15	13.44	15.03	14.17	14.07	14.93	11.81	5.42	4.71	11.10	
	16	12.99	15.03	14.72	14.66	15.10	15.68	13.32	12.81	16.21	
	17	13.36	15.17	15.01	14.72	14.94	13.52	12.33	10.14	11.82	
	18	13.16	15.30	15.03	14.53	15.13	16.29	14.23	10.45	15.01	
	19	13.47	15.19	15.12	14.77	15.03	12.73	12.19	9.61	11.53	
	20	13.50	15.03	15.19	14.89	15.19	11.33	12.58	10.34	12.53	
						SUMA	143.27	215.95	217.17	173.44	
						MAPE	8.43	12.70	12.77	10.20	
Samaria	21	13.63	14.05	11.56	10.84	12.38	3.03	15.19	20.48	9.18	
	22	13.57	14.06	11.63	10.37	12.39	3.58	14.31	23.58	8.71	
	23	13.12	14.01	11.80	9.76	10.15	6.76	10.05	25.60	22.64	
	24	13.51	14.50	11.75	9.69	10.76	7.33	13.07	28.31	20.41	
	25	13.78	14.39	12.20	10.82	12.11	4.40	11.49	21.51	12.12	
	26	11.81	14.46	12.30	10.94	12.52	22.39	4.15	7.41	5.97	
	27	12.53	14.39	12.47	10.99	12.97	14.89	0.46	12.29	3.52	
	28	13.10	14.72	12.65	11.22	13.24	12.36	3.45	14.39	1.03	
	29	13.11	14.65	12.73	11.59	13.47	11.78	2.84	11.57	2.78	
	30	13.36	14.52	13.02	11.91	13.97	8.67	2.54	10.89	4.57	
	31	12.12	14.43	12.91	12.22	13.97	19.03	6.48	0.80	15.25	
	32	11.71	14.10	12.53	12.59	13.32	20.36	6.97	7.47	13.75	
	33	11.93	13.97	13.07	12.81	13.49	17.06	9.57	7.38	13.01	
	34	11.93	13.69	12.20	12.03	13.08	14.73	2.26	0.83	9.63	
	35	11.98	14.17	12.69	12.33	13.21	18.21	5.89	2.92	10.22	
	36	12.49	14.02	12.55	11.48	12.10	12.23	0.48	8.11	3.08	
	37	12.01	14.05	12.30	12.28	12.89	16.97	2.37	2.25	7.27	
	38	11.94	14.06	12.84	12.16	13.02	17.75	7.47	1.83	9.00	
	39	11.42	13.97	12.88	12.39	13.06	22.30	12.75	8.50	14.32	
	40	11.50	13.58	12.47	11.77	11.59	18.07	8.43	2.33	0.76	
	41	10.83	11.93	10.09	8.69	9.42	10.18	6.86	19.78	13.04	
	42	11.31	12.50	11.39	9.91	9.94	10.46	0.73	12.39	12.14	
	43	11.21	12.96	11.61	10.50	10.02	15.55	3.56	6.37	10.60	
	44	10.85	12.49	12.17	11.35	11.37	15.13	12.18	4.64	4.79	
							SUMA	323.21	163.55	261.62	227.78
						MAPE	13.47	6.81	10.90	9.49	
						MAPE BIFURCACIÓN	10.88	9.99	12.50	9.31	

ESTUDIO DE LA BIFURCACIÓN DE RÍO MEZCALAPA-SAMARIA-CARRIZAL EN UN MICROMODELO



Río	Sección transversal	Área (m ²)					Error absoluto (%)			
		Topobatimetría 1997	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1	Qm=0.12 l/s P1	Qm=0.14 l/s P1	Qm=0.17 l/s P1	Qm=0.20 l/s P1
Mezcalapa	1	580.70	1744.81	4768.56	5086.16	2382.69	200.47	721.18	775.87	310.32
	2	527.15	1353.29	3233.84	3630.28	1850.18	156.72	513.45	588.66	250.98
	3	673.99	946.17	2325.67	2656.35	1394.86	40.38	245.06	294.12	106.95
						SUMA	397.57	1479.69	1658.65	668.25
						MAPE	132.52	493.23	552.88	222.75
Carrizal	4	396.06	597.01	1377.90	1470.67	744.02	50.74	247.90	271.33	87.86
	5	293.67	544.26	1406.17	1549.47	827.88	85.33	378.83	427.62	181.91
	6	207.27	620.84	1440.34	1567.57	802.53	199.53	594.90	656.29	287.19
	7	231.60	733.91	1642.96	1610.84	771.57	216.89	609.40	595.53	233.15
	8	339.71	438.68	1311.48	1400.20	704.96	29.13	286.06	312.17	107.52
	9	453.56	561.73	1185.55	1185.79	615.16	23.85	161.39	161.44	35.63
	10	618.26	547.79	1365.66	1327.51	703.81	11.40	120.89	114.72	13.84
	11	650.12	476.36	1189.52	1212.87	561.85	26.73	82.97	86.56	13.58
	12	430.35	402.34	812.90	833.72	439.53	6.51	88.89	93.73	2.13
	13	370.63	221.98	531.13	457.62	284.15	40.11	43.30	23.47	23.33
	14	367.26	234.73	504.62	479.57	286.94	36.08	37.40	30.58	21.87
	15	595.28	311.44	490.89	504.96	304.28	47.68	17.54	15.17	48.88
	16	458.53	202.72	251.68	250.36	203.41	55.79	45.11	45.40	55.64
	17	407.69	176.11	210.92	250.96	189.06	56.80	48.26	38.44	53.63
	18	452.02	168.38	217.21	273.44	214.69	62.75	51.95	39.51	52.50
	19	374.28	163.11	136.63	196.80	177.59	56.42	63.49	47.42	52.55
							SUMA	1063.37	2951.72	3020.84
						MAPE	62.55	173.63	177.70	78.61
Samaria	21	1256.49	1063.67	2400.94	2661.80	1505.61	15.35	91.08	111.84	19.83
	22	1303.28	1051.81	2442.34	2590.93	1414.69	19.30	87.40	98.80	8.55
	23	1095.09	857.64	1978.96	2155.87	1283.28	21.68	80.71	96.87	17.18
	24	1242.32	833.21	2246.13	2609.31	1779.99	32.93	80.80	110.04	43.28
	25	1387.26	958.88	2200.68	2602.15	1664.95	30.88	58.63	87.57	20.02
	26	1635.36	1063.38	2315.58	2683.50	1671.48	34.98	41.60	64.09	2.21
	27	1772.62	1095.65	2370.24	2742.20	1626.26	38.19	33.71	54.70	8.26
	28	1874.28	1027.64	2337.63	2606.04	1484.45	45.17	24.72	39.04	20.80
	29	1934.92	981.49	2332.33	2619.30	1349.33	49.28	20.54	35.37	30.26
	30	1948.96	1197.13	2332.37	2765.23	1420.99	38.58	19.67	41.88	27.09
	31	2096.89	1208.50	2298.45	2589.95	1517.35	42.37	9.61	23.51	27.64
	32	2053.76	1087.19	2063.82	2117.22	1332.96	47.06	0.49	3.09	35.10
	33	2494.51	1082.16	2035.88	2183.39	1347.26	56.62	18.39	12.47	45.99
	34	2262.34	1161.11	2107.98	2182.98	1377.35	48.68	6.82	3.51	39.12
	35	2242.84	1343.32	2346.45	2411.66	1312.29	40.11	4.62	7.53	41.49
	36	1629.35	1130.26	1817.03	1754.13	1141.97	30.63	11.52	7.66	29.91
	37	1927.10	1210.67	1972.82	2038.54	1469.06	37.18	2.37	5.78	23.77
	38	2560.46	1481.62	2400.69	2404.60	1716.29	42.13	6.24	6.09	32.97
	39	2348.94	1318.00	1953.07	2141.79	1579.68	43.89	16.85	8.82	32.75
	40	2479.30	1362.64	2001.82	2022.05	1866.37	45.04	19.26	18.44	24.72
	41	2188.51	1530.40	2493.45	2286.34	2253.77	30.07	13.93	4.47	2.98
	42	2003.26	1668.79	2130.34	2500.87	2638.67	16.70	6.34	24.84	31.72
	43	1952.68	918.34	1215.79	1520.57	1629.72	52.97	37.74	22.13	16.54
	44	1635.25	1172.11	1356.95	1740.23	1775.71	28.32	17.02	6.42	8.59
						SUMA	888.09	710.08	894.97	590.76
						MAPE	37.00	29.59	37.29	24.61
						MAPE BIFURCACIÓN	53.39	116.85	126.69	58.99



8.4 ANEXO D. COMPARATIVA ENTRE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LA TOPOBATIMETRÍA DE 1997 Y DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA S2_Q0.14_P1 PARA EL RÍO SAMARIA

