



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“MODELO FÍSICO PARA EL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE
SOLUCIÓN PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:
SAMUEL RODRÍGUEZ MOLINA**

**ASESOR:
DR. CONSTANTINO DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ**

**“TESIS APOYADA POR EL CONSEJO ESTATAL
DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MICHOACÁN”**



MORELIA, MICHOACÁN, FEBRERO DEL 2012





Agradecimientos

Dr. Constantino Domínguez Sánchez, por su apoyo como tutor en los estudios de licenciatura y como mi asesor de tesis.

Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por su apoyo y orientación, primero para poder obtener la beca y posteriormente para la elaboración de la tesis.

Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, por permitirme la construcción del modelo en el laboratorio de Hidráulica.

T.I. Rafael Gonzales, por su apoyo técnico en la construcción del modelo.

Al Ing. Sergio Ríos (Director de Planeación y evaluación de riesgos de Protección Civil Municipal de Morelia), por brindarme información de las zonas más vulnerables a inundaciones de la ciudad de Morelia, Mich.

Al OOAPAS de la ciudad de Morelia, por brindarme información topográfica (planta y secciones transversales) del río Grande de la ciudad de Morelia.

Al COECYT Michoacán, por haberme otorgado el apoyo de beca, con el número de expediente 27.

A mis padres, porque gracias a su esfuerzo, dedicación, orientación y consejos fue posible terminar la etapa de mi vida más importante, la de formación profesional.

A mis hermanos, que gracias al apoyo brindado todo fue más fácil.

Y a todas las personas que me ayudaron para la culminación de este proyecto.



**“MODELO FÍSICO PARA EL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE
SOLUCIÓN PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES”**



CONTENIDO

INTRODUCCION	6
CAPITULO I. LOCALIZACION.....	8
1.1 Delimitación del área de estudio	8
1.2 Clima	8
1.3 Uso actual del suelo	8
1.4 Tipos de vegetación.....	9
1.5 Geología.....	10
1.6 Hidrología	12
1.7 Hidrografía.....	12
1.8 Edafología	13
1.9 Topografía	14
1.10 Población.....	14
CAPITULO II. HISTORIA DE LAS INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MORELIA	15
2.1 Artículos científicos.....	17
2.2 Documentos oficiales.....	22
2.3 Oficinas de gobierno municipal.....	27
2.4 Inundaciones en la ciudad de Morelia (nota periodistica).....	29
2.5 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)	31
CAPITULO III. SELECCIÓN DE LA ZONA PARA MODELACIÓN.....	35
3.1 Areas susceptibles a inundaciones	35
3.2 Localización de las lagunas de regulacion	44
CAPITULO IV. TEORÍA DE MODELOS.....	45
4.1 Concepto de modelo hidráulico	45
4.2 Modelos numéricos vs modelos fisicos	46
4.3 Nuevos horizontes en la simulación de fenómenos hidráulicos	47
4.4 Teoría de la similitud	48
4.5 Condiciones de similitud para modelos distorsionados	51
4.6 Selección de escalas	57



CAPITULO V. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	62
5.1 Limpieza y adecuación de la zona disponible para construccion del modelo....	62
5.2 Trazo y sellado de muro	63
5.3 Colocación perimetral de ladrillo y plantilla de nivel	64
5.4 Detallado de las secciones transversales del rio y los drenes.....	65
5.5 Lgunas de regulación.....	68
5.6 Pintura y limpieza	69
5.7 Instrumentación y equipo.....	70
CAPITULO VI. PRUEBAS REALIZADAS	72
6.1 Laguna de regulación dren los Itzícuaros.....	72
6.2 Laguna de regulación unidad deportiva Cuauhtémoc.....	76
6.3 Rio Grande	80
CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
7.1 Conclusiones	86
7.2 Recomendaciones.....	87
Bibliografía.....	88



INTRODUCCIÓN

La ciudad de Morelia y su zona conurbada, debido a su topografía y al crecimiento de la mancha urbana, ha sido afectada de forma periódica por inundaciones parciales y transitorias, causadas por eventos pluviales de gran intensidad. En especial las lluvias de septiembre del año 2003, ocasionaron graves daños a la población y a la vialidad de la ciudad. Además de lo anterior, el crecimiento de la ciudad ha generado asentamientos establecidos en el sistema de drenaje natural de la cuenca; esto es en zonas de inundación e incluso en los cauces de los arroyos y ríos, ocasionando un peligro para la integridad de las personas y para la infraestructura existente.

Este trabajo tiene por objetivo la construcción de un modelo físico para el estudio de alternativas de solución para el control de inundaciones en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en este modelo se proponen y estudian diferentes propuestas para controlar, disminuir o eliminar por completo los problemas de inundación que acontecen en la zona suroeste de la ciudad de Morelia. Para ello se propone la construcción de lagunas de regulación, situadas al lado de los drenes Barajas e Itzicuaros, estas lagunas tienen la función de almacenar toda el agua excedente de una gran tormenta cuando los cauces no tengan la capacidad de transportarla, esta agua será almacenada temporalmente, esperando que los niveles de los cauces disminuyan para que posteriormente sea desalojada.

La temática del trabajo se describe en siete capítulos.

En el capítulo uno hablamos de la localización de la ciudad de Morelia, el clima, uso actual del suelo, tipos de vegetación, geología, hidrología, hidrografía, edafología, topografía y población, todos estos factores contribuyen de manera directa a los fenómenos de inundación que afectan en cada temporada de lluvias a esta ciudad.

En el capítulo dos se menciona los antecedentes de las inundaciones que más daño han causado a esta ciudad, así como diferentes artículos científicos y documentos



oficiales, donde se mencionan diferentes causas y soluciones posibles para el problema de las inundaciones en la ciudad de Morelia.

En el capítulo tres se selecciona la zona más vulnerable a sufrir inundaciones en la ciudad de Morelia, esta selección se hizo con ayuda de mapas y registros de Protección Civil y H. Ayuntamiento de Morelia, Atlas de Riesgo de Morelia, Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010 y mapas elaborados por Néstor Corona Morales en su trabajo de tesis de maestría titulado “Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a Inundaciones”.

En el capítulo cuatro se maneja todo lo relacionado a la teoría de modelos, conceptos de modelos hidráulicos físicos y numéricos, así como las condiciones de similitud para modelos distorsionados y la obtención de los valores de las escalas para la condición de Froude.

En el capítulo cinco se describe toda la construcción del modelo físico, esta construcción se realizó en varias etapas como son: limpieza y adecuación de la zona disponible para construir el modelo, trazo y sellado de muro, colocación perimetral de ladrillo y plantilla de nivel, detallado de las secciones transversales del río y los drenes, lagunas de regulación, pintura y limpieza e instrumentación y equipo. Todas estas etapas se describen detalladamente en este capítulo.

En el capítulo seis se describen todas las pruebas hechas en el modelo, se manejan diferentes escenarios para el dren Itzúcaros, dren Barajas y el río Grande, así como los diferentes periodos de retorno.

Finalmente en el capítulo siete se hace un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el modelo y además se hacen recomendaciones que ayudan a mejorar el funcionamiento de las obras propuestas.



CAPITULO 1

LOCALIZACION

1.1.- DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Morelia se localiza en la región centro norte del estado de Michoacán entre los paralelos 19° 27'06" y 19° 50'12" de latitud norte, y los meridianos 101°01'43" y 101°30'32" de longitud oeste aproximadamente. Las alturas van desde los 1,400 hasta los 3,000 msnm, la ciudad de Morelia se localiza a 1,951 msnm. Colinda con 14 municipios: al norte con Tarímbaro, Copándaro de Galeana, Chucándiro y Huaniqueo; al sur, con Acuitzio del Canje, Villa Madero y Tzitzio; al oriente, con Charo y al poniente con Coeneo, Tzintzuntzan, Lagunillas, Huiramba y Pátzcuaro. Tiene una extensión de 1,199 km² y representa el 2.03 % de la superficie total del Estado.

1.2.- CLIMA

La ciudad de Morelia tiene un clima templado con humedad media, con lluvias en verano de entre 700 y 1000 mm de precipitación anual y lluvias invernales de 5 mm anuales promedio. La temperatura media anual oscila entre los 14 y 18 °C. Los vientos predominantes vienen del suroeste y del noroeste, con variables en julio, agosto y octubre e intensidades de entre 2 y 14.5 km por hora.

1.3.- USO ACTUAL DEL SUELO

Del total de la superficie del centro de población de Morelia que es de 40,724 ha; en total, de esta área el 42.9 % (17,474 ha) corresponden a vegetación; el 20.6 % (8,395 ha), corresponden a usos rurales; y el 36.5 % (14,855 ha) corresponden a usos urbanos. Cabe destacar que dentro del límite de centro de población existen importantes áreas de bosque de pino y bosque mixto. Las zonas agrícolas de riego y de temporal, son las más proclives a ser absorbidas por el crecimiento de la mancha urbana, debido entre otras cosas a la baja productividad de estas áreas que las hace vulnerables al cambio de uso de agrícola a urbano.



1.4.- TIPOS DE VEGETACIÓN

El territorio del Municipio de Morelia queda comprendido dentro las regiones Neotropical y Neoártica, lo cual en conjunto con la gran complejidad fisiográfica, le concede a la zona una alta diversidad de especies de flora y fauna. Para la caracterización de la vegetación y usos del suelo, se sigue la clasificación que se utilizó en el mapa de cobertura y principales tipos de vegetación para el municipio de Morelia, Michoacán de escala 1:50,000, del proyecto del Ordenamiento Ecológico Territorial elaborado por el CIECO-UNAM (2007) y se mantiene el ámbito de aplicación considerado en la versión del PDUCPM del año 2004.

1.4.1.- Bosque de encino

Comunidad vegetal formada por diferentes especies (aproximadamente más de 200) de encinos o robles del género *Quercus*; estos bosques generalmente se encuentran como una transición entre los bosques de coníferas y las selvas, pueden alcanzar desde los 4 hasta los 30 m de altura más o menos abiertos o muy densos. Por las características de los encinos, estos bosques han sido muy explotados con fines forestales para la extracción de madera para la elaboración de carbón y tablas para el uso doméstico, lo cual provoca que este tipo de vegetación tienda a fases secundarias las que a su vez sean incorporadas a la actividad agrícola y pecuaria.

1.4.2.- Bosque de pino

Es una comunidad siempre verde constituida por árboles del género *Pinus*, de amplia distribución. Estos bosques que se encuentran asociados con encinares y otras especies, son los de mayor importancia económica en la industria forestal del país por lo que prácticamente todos soportan actividades forestales como aserrío, resinación, obtención de pulpa para celulosa, postería y recolección de frutos y semillas.

1.4.3.- Bosque mixto

Comunidad de bosque ampliamente distribuida que ocupa la mayor parte de la superficie forestal de las porciones superiores de los sistemas montañosos del país, la cual está compartida por las diferentes especies de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.); dependiendo del dominio de uno y otro, se le denomina pino-encino si predominan las coníferas y es llamado encino-pino cuando dominan los encinares. La



transición del bosque de encino al de pino está determinada (en condiciones naturales) por el gradiente altitudinal. Estas mezclas son frecuentes y ocupan muchas condiciones de distribución.

1.4.4.- Matorral

En este tipo de vegetación se clasifica a todos aquellos arbustos que generalmente presentan ramificaciones desde la base del tallo, cerca de la superficie del suelo y con altura variable, pero casi siempre inferior a 4 m. Los matorrales son comunidades vegetales por lo general arbustivas, aunque las hay también arbóreas, e incluyen elementos tanto caducifolios como subcaducifolios, inermes, subinermes o espinosos, cuya predominancia relativa varía de una comunidad a otra. La clasificación de los tipos de matorrales se hace de acuerdo a su fisonomía, hábitat y composición florística.

1.4.5.- Pastizal

Es aquel que surge cuando es eliminada la vegetación original. Estos pastizales han surgido como consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación; también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. En el municipio, son de muy diversos tipos y aunque cabe observar que no hay pastizales que pudieran considerarse como totalmente libres de alguna influencia humana, el grado de ingerencia del hombre es muy variable y con frecuencia difícil de estimar. Aún haciendo abstracción de los pastos cultivados, pueden reconocerse muchas áreas cubiertas por el pastizal inducido, que sin duda alguna sostenían otro tipo de vegetación antes de la intervención del hombre y de sus animales domésticos. Los pastizales inducidos algunas veces corresponden a una fase de la sucesión normal de comunidades vegetales, cuyo clímax es por lo común un bosque o un matorral. Las zonas cubiertas por pastizales en el municipio, se ocupan principalmente para el cultivo de especies forrajeras como el subín, la navajita velluda así como el caahuate.

1.5.- GEOLOGÍA

Todas las montañas que se encuentran en la zona, son de origen volcánico, existiendo dos principales tipos de rocas: las ígneas extrusivas y las sedimentarias. Las primeras son las más abundantes y destacan los siguientes tipos:



Las Andesitas se localizan en pocos afloramientos, uno cerca del Puerto de los Copales y el otro al pie del cerro Viejo, aproximadamente 1.5 kilómetros al Suroeste de Acuitzio y cerca de Atécuaro. Las Tobas andesíticas se encuentran en el kilómetro 16.4 de la carretera Morelia-Mil Cumbres sobreyaciendo a las Andesitas y formando parte inferior del banco, desde las lomas de Santa María hasta Santiago Undameo; así como en la confluencia del arroyo de Agua Zarca con el Río Chiquito.

Las Riolitas afloran en el kilómetro 7 de la carretera Morelia-Mil Cumbres, en los márgenes del Río Chiquito, Jesús del Monte y el cerro de la Presa ; en el arroyo de Carindapaz, en los contrafuertes del cerro Azul, en la Huerta , en la cascada de Santa María, en Santa Rosalía y en los cerros de Atécuaro o de las Animas.

Las Tobas riolíticas afloran en la parte alta de la Loma de Santa María hasta Cointzio, en las canteras del Zapote y de Santiaguito. Se les explota como material de construcción. Las brechas riolíticas se localizan en el Arroyo de Carindapaz, cerca de la confluencia con el arroyo de los Laureles.

Los Basaltos se extienden en corrientes a partir de numerosos focos como el Quinceo, las Tetillas del Quinceo, el cerro Pelón, cerro del Águila, cerro de San Andrés y cerro del Punhuato. Brechas basálticas se observan en la cañada del Río Chiquito, desde el Molino hasta el Palmito y en los acantilados de la Torrecilla y Peña de San Pedro.

Los Tezontles están asociados a las formaciones basálticas en la región de Tacícuaro. Dentro de las rocas sedimentarias destacan los bancos de cenizas volcánicas que se ubican cerca de Charo y Quirio.

Los conglomerados afloran cerca del manantial de Agua Caliente y en los alrededores de San Miguel del Monte. Las areniscas sobreyacen a las Tobas riolíticas de El Zapote y Santiaguito, en posición Sureste de la ciudad de Morelia, así como en los alrededores de Charo, Quirio, cerca de Tacícuaro y el cerro Pelón.

Los aluviones se distribuyen en los cauces de los arroyos y se extienden hasta las planicies. Por otra parte, los suelos que predominan en el municipio son dos: del grupo podzólico propio de los bosques subhúmedos, templados y fríos, ricos en materia orgánica de color café y en la zona norte se presentan suelos negros del grupo chernozem. Valles, ciénegas, litosoles y andosoles. Bosque de pino encino, zonas montañosas, etc.



1.6.- HIDROLOGÍA

El municipio de Morelia pertenece a la región hidrográfica Lerma – Santiago y también forma parte de la cuenca del lago de Cuitzeo. Sus principales corrientes fluviales son el río Grande y el río Chiquito. Los arroyos más conocidos, son el de La Zarza y La Pitaya. Así como los drenes los Itzicuaros, Barajas, Arroyo de Tierras, Carlos Salazar, entre otros.

Los cuerpos de agua más importantes son la presa de Cointzio, Umécuaro y Loma Caliente, aún cuando existen varios almacenamientos, principalmente para uso pecuario. En el municipio afloran más de 70 manantiales, siendo el de la Mintzita el más grande. El suministro de agua a la ciudad de Morelia se realiza principalmente por medio de 105 pozos profundos, tres manantiales: La Higuera, El Salto, San Miguel y dos fuentes superficiales: La Minzita y La Presa de Cointzio, dando una producción de 3,395 l/s.

El mapa potencial geohidrológico, es útil para conocer donde estarían las prioridades en el manejo del agua subterránea y en la detección de oportunidades para el mantenimiento del recurso geohidrológico. El potencial medio aparece como el valor predominante y se distribuye en todo el territorio de manera homogénea con el 77.48 % de la superficie total del municipio. Por otro lado, con el 11.79 % del territorio municipal del potencial geohidrológico es bajo distribuyéndose al noroeste y suroeste del municipio de Morelia.

Esto significa que las prioridades de manejo y administración en esta zona deben enfocarse en el cuidado de los acuíferos y en programas de recuperación de los mismos.

1.7.- HIDROGRAFÍA

El municipio cuenta con dos importantes ríos: el Río Grande que nace en la parte Sureste de Acuitzio, tiene un trayecto de 26 km con rumbo Norte hasta Morelia. Su principal afluente es el Río Chiquito que confluye con el Río Grande en la parte Oeste de la ciudad de Morelia de donde recorre 25 km con dirección general Norte Oriente. Posteriormente se desvía hacia el Poniente y hacia el Suroeste, describiendo casi una semicircunferencia y toma una dirección Norte-Noreste para finalmente desaguar en el



lago de Cuitzeo. El Río Grande atraviesa la ciudad de Morelia y desemboca en la cuenca del lago de Cuitzeo. Los principales escurrimientos que alimentan a este río son el arroyo de Lagunillas, los arroyos de Tirio y de la barranca de San Pedro.

El Río Chiquito por su parte se origina en los montes de la Lobera y la Lechuguilla, cuya cuenca receptora comprende gran parte de la región montañosa situada al Sur de Morelia desde cerro Azul hasta Agua Escondida. El Río Chiquito se une posteriormente con los arroyos la Cuadrilla y Agua Escondida, más adelante se une con el arroyo El Salitre, que baja de cerro Azul y luego se une con el arroyo el Peral, después se junta el arroyo Bello, todos estos arroyos tienen aguas permanentes debido a los manantiales que en ellos nacen. Posteriormente, viene la unión de los pequeños arroyos de Agua Zarca y de Las Mojaditas para llegar luego a la confluencia con el arroyo de Carindapaz y de ahí continuar hacia los filtros de donde partía la tubería que conducía el agua a la ciudad de Morelia. Al Suroeste encontramos la presa de Umécuaro y la presa de Loma Caliente que son parte del servicio para el sistema de generación de energía eléctrica que abastece a la ciudad de Morelia. Los escurrimientos de estas presas depositan sus aguas en la presa de Cointzio, aprovechando el cauce del Río Tirio y del Canal de San Juan, sobre los cuales confluye una gran cantidad de arroyos y corrientes permanentes, destacando por su importancia el Río Santa Rosalía. La presa de Cointzio cuenta con una capacidad de operación de 79.2 millones de metros cúbicos. Otra fuente importante de agua en el municipio de Morelia son los manantiales, destacando por su aprovechamiento el manantial de la Mintzita utilizado en la industria y de abastecimiento de agua potable.

1.8.- EDAFOLOGÍA

El suelo está directamente relacionado con la roca que tiene de sustento, por lo que para efectos de localización general, los estratos de Vertisol Pélico (arcilla expansiva) se encuentran principalmente sobre basalto; el Feozem Háplico sobre la Toba Riolítica, y el Luvisol Crómico se ubica sobre las áreas de origen aluvial.

Por características edafológicas, el único suelo del ámbito de estudio que es considerado problemático para el desarrollo urbano, es el Vertisol Pélico, por su expansividad; ya que cuando está seco se agrieta y es muy duro, pero cuando se



encuentra húmedo es barroso y se anega en la superficie, pudiendo presentar deslizamientos.

Desafortunadamente es el que se encuentra en mayor proporción en la ciudad y zona circundante, por lo que generalmente es necesario retirarlo mediante un mejoramiento de terreno.

1.9.- TOPOGRAFÍA

La orografía municipal se considera accidentada, ya que, en gran parte se conforma con una región montañosa que se extiende en el sur, formando vertientes muy pronunciadas, sobre todo en su extremo hacia Ichaqueo y Tumbisca.

Morelia se localiza en el valle Morelia – Queréndaro rodeada por los cerros del Punhuato, San Andrés, El Quinceo y La Loma de Santa María; las pendientes varían incluso dentro del área urbana hasta más del 30 % como en las colonias Obrera, La Loma, Lomas del Punhuato entre otras.

Las barreras naturales han dificultado la expansión urbana al norponiente de la ciudad, no así al sur donde la loma de Santa María ha sido rebasada por la mancha urbana. Las zonas poniente y suroeste rumbo a las comunidades de Capula y Tiripetío, presentan condiciones topográficas favorables para el crecimiento de la ciudad.

1.10.- POBLACIÓN

La población total del municipio es de 729, 279 habitantes, de los cuales más de las tres cuartas partes se concentran en la ciudad de Morelia. (INEGI, 2010).



CAPITULO 2

HISTORIA DE LAS INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MORELIA

El cambio climático y los problemas de inundaciones derivados de esta, se están incrementando de forma paralela al crecimiento poblacional y económico en las ciudades, lo que ocasiona un incremento en las condiciones de vulnerabilidad y los costos de un desastre (Fokkens, 2005).

Entre 1991 al 2005 el 25 % de los desastres ocurridos en el mundo se atribuyeron a las inundaciones. De ahí la importancia de estudiar este tipo de evento ya que la recurrencia de estos es muy elevada. En Norteamérica es el segundo tipo de peligro más recurrente. Lo que permite afirmar que las inundaciones se presentan como uno de los tipos de desastre que afecta con mayor frecuencia a nuestras sociedades. La mayoría de las veces están asociadas a fenómenos mayores de carácter regional o incluso global y sus impactos en los asentamientos humanos han sido muy elevados. (ISDR/UN, 2007).

En la ciudad de Morelia desde su fundación (principios del siglo XVI) ha presenciado diferentes episodios de inundaciones, sin embargo, en los últimos diez años la problemática se ha magnificado a tal grado que las comunidades han sido incapaces de sufragar su afectación. Estas circunstancias se asocian a la rápida conformación de asentamientos humanos sobre terrenos irregulares, mismos que han sido producto de invasiones y/o negociaciones clandestinas. Bajo este escenario, la periferia de la ciudad presenta una dinámica y presión más fuerte que la ciudad central, consolidando espacios que hasta hace unos años eran dedicados a las actividades del sector primario (agricultura, ganadería y forestal).

Por lo tanto, el proceso de urbanización se extendió hacia tierras de cultivo y antiguas haciendas que bordeaban la ciudad, lo que favoreció la negociación y especulación del suelo, en especial, sobre la periferia urbana (Ávila, 2007). En base a ello, diversos asentamientos se situaron sobre los límites naturales de los principales ríos (río Grande, río Chiquito, dren Itzúcaros, dren Barajas, dren Arroyo de Tierras), antiguas ciénegas (desechadas debido a la falta de saneamiento, proliferación de enfermedades e



inundaciones) y depresiones naturales de captación de agua. Cabe destacar que una gran mayoría de estos asentamientos periféricos conformaron enclaves de pobreza y precariedad, caracterizados por la deficiente calidad de la vivienda, carencia de servicios (drenaje, agua potable y luz eléctrica) e irregularidad en la tenencia del suelo. Con base en lo mencionado, el río Grande y el río Chiquito que atraviesan la ciudad de Morelia y sus respectivos afluentes (entre ellos dren Itzúcaros, dren Barajas, dren Arroyo de Tierras, entre otros presente en los temporales de lluvias) son considerados peligrosos debido a sus constantes desbordes. (Silva y Arreygue, 2005; Arreygue *et al.*, 2005).

Debido a la ocupación de las franjas de terreno inmediatas a los cauces de los ríos, la acumulación de desechos sólidos, la construcción de muros junto a cauces de ríos, la existencia de alcantarillas y puentes con dimensiones menores a la de sus avenidas máximas, la deforestación histórica, la urbanización de las cuencas por el crecimiento de las ciudades imperante en nuestros tiempos, junto con otros factores, han contribuido de forma decidida en aumentar la vulnerabilidad de nuestra sociedad a este tipo de fenómeno.

En la ciudad de Morelia, la expansión urbana ha hecho que áreas con condiciones caracterizadas como de alto grado de peligrosidad hidrológica e hidráulica fueran objeto de una indiscriminada urbanización, en particular extensas zonas sujetas a inundaciones (Arreygue-Rocha, 2004). La rectificación de los ríos Grande y Chiquito (Vargas, 1995), a finales de los años treinta, así como, la posterior construcción de la presa de Cointzio y la implementación del sistema de riego San Bartolo Queréndaro, impulsan el desarrollo agrícola y aumentan la capacidad de dotar de agua potable a mayor cantidad de habitantes. Situación que, entre otras, propicia el crecimiento urbano y el comienzo de un caótico y desmesurado crecimiento a principios de los setenta. Dentro de las inundaciones que han afectado seriamente a la ciudad de Morelia destaca la ocurrida en el 2002, como consecuencia de tormentas severas, dejando pérdidas de aproximadamente 4 millones de dólares. Sin embargo, el evento de inundación registrado en septiembre de 2003, producto también de tormentas rigurosas y el desfogue de la presa Cointzio, ha sido considerado como el segundo en mayores proporciones. Para el año de 2005 se presentaron las mayores inundaciones



registradas, dañando viviendas e infraestructura, suspensión de servicios, así como disposición de albergues para los pobladores de distintas colonias, en el primer plano y periferia de la ciudad.

Los antecedentes obtenidos muestran que la mala localización de asentamientos, el aumento del área urbana, la calidad de la vivienda, las precipitaciones de gran intensidad y magnitud, así como las condiciones de la población, han incrementado el riesgo de desastre por inundaciones en la periferia de la ciudad en los últimos años.

Revista de Geografía Norte Grande, 47: 45-62 (2010).

El tema de las inundaciones en la ciudad de Morelia ha ido trabajado desde distintas perspectivas y por diversas instituciones e investigadores. La información derivada de dichas investigaciones constituye el insumo básico para establecer el escenario de susceptibilidad a inundaciones. A efectos de presentar una revisión sistemática, se presentan los principales aportes en tres grandes apartados: Artículos científicos, documentos oficiales y reportes de protección civil.

2.1.- ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

2.1.1.- Eventos excepcionales e inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán (2004). (Arreygue-Rocha, 2004a)

Maneja un apartado denominado riesgo hidrogeológico que se enfoca en un análisis hidráulico del cauce del río chiquito. Presenta un comparativo del crecimiento urbano de la ciudad sobre cauces y sus márgenes y fallas geológicas, debido a que estas áreas tienen ventajas en cuanto a la accesibilidad y condiciones físicas que aparentemente son factibles para urbanizar.

Esto es sustentado con un comparativo de la expansión de la ciudad de Morelia respecto a la distribución de los ríos, canales y fallas geológicas, concluyendo que se ha presentado una indiscriminada urbanización, en particular extensas zonas sujetas a inundaciones como es el caso de las colonias El Realito, Prados Verdes, Ventura Puente, Molino de Parras, Camelinas, etc. (Arreygue-Rocha, 1998). Aunque no se maneja el componente de vulnerabilidad como tal, es evidente la condición de exposición de los terrenos urbanizados.



Otra sección del documento es denominada peligrosidad hidrológica, cuya cobertura es la cuenca del río Chiquito desde los parteaguas situados al sur de la ciudad de Morelia, hasta su confluencia con el río Grande, considerando tanto la configuración hidrológica como la hidráulica en el interior de la ciudad. Se realizan cálculos de: flujo meteórico y flujo superficial, tomando en cuenta la información de cuatro estaciones meteorológicas: Morelia (1917-1996), Zona Militar (1975-1996), Jesús del Monte (1941-1996) y San Miguel del Monte (1964-1986). Generando información de: precipitación media anual de 974.22 mm., Temperatura media anual de 17.3 °C y evapotranspiración de 638.1 mm, para concluir calculando que el gasto máximo anual de 11,739.72 m³. El valor de gasto máximo anual es propuesto como un insumo básico para determinar la cantidad de agua que aporta el río Chiquito al río Grande.

En la configuración de la red hidráulica menciona el importante papel que juega la construcción de puentes que fungen como obstáculo para el escurrimiento natural de las aguas superficiales. Esta arquitectura, en conjunción con fuertes precipitaciones que en ocasiones se presentan en la ciudad, ha traído consigo un incremento en los elementos de peligrosidad.

El análisis se enfoca en el modelado de las características morfológicas del canal del río Chiquito, se establece que su longitud aproximada es de 20 km. Alimentado por una cuenca de 81.21 km². El cauce del río fue rectificado en 1937 y las secciones fueron dimensionadas para un gasto máximo de proyecto de 125 m³ /s.

Las características morfológicas de la sección urbana del cauce (Disminución de la pendiente respecto a las secciones de aguas arriba de la cuenca, principalmente), la hacen susceptible a ser depositaria de fuertes cantidades de sedimentos, y la posibilidad de desarrollar espesa cobertura vegetal. Estas condiciones coadyuvan a la reducción del área hidráulica a 70 m³/s (registradas en 1985) y un aumento de la peligrosidad de inundaciones en las zonas inmediatamente adyacentes al curso del agua, estos datos son emitidos sin considerar las reducciones del área hidráulica distribuidas a lo largo del cauce en cada uno de los puentes.

En este apartado se presenta la “Carta de áreas inundables de la ciudad de Morelia” (Ver figura 2.1) que presenta una distribución irregular en los márgenes de los ríos: Grande, Chiquito y La Hoya, y una de las depresiones topográficas más importantes



tipificada como área de Reserva Ecológica Urbana situada al norte de la ciudad en la salida a Salamanca (PDUCPM, 2004: IV; 14).

Se concluye que los valores de 70 m³/s relativos al canal sin puentes tienen un periodo de retorno de 20 años, valores de gasto de 50 m³/s (que son suficientes para poner en crisis el sistema), están caracterizados en periodos de retorno de 10 años, de acuerdo con el método de Weibull el gasto de 74.62 m³/s (gasto máximo histórico) tiene un periodo de retorno de 60 años y el gasto de 50 m³/s entre 4 y 5 años.

Los cálculos establecen que el puente Camelinas constituye la primera barrera para el flujo de agua que corre por el río Chiquito, reduciendo la capacidad hidráulica hasta 47.7 m³/s, actuando como dique y consecuentemente desbordar el cauce en esa sección inundando las colonias aledañas.

El estudio concluye afirmando que, mientras no se controle el gasto de los ríos o por lo menos se mantenga la capacidad hidráulica con un constante mantenimiento y se sigan construyendo puentes cuyas características reduzcan la área de paso para flujo del agua, el fenómeno de las inundaciones se presentara con mayor frecuencia afectando a los moradores de las colonias adyacentes a los cauces.

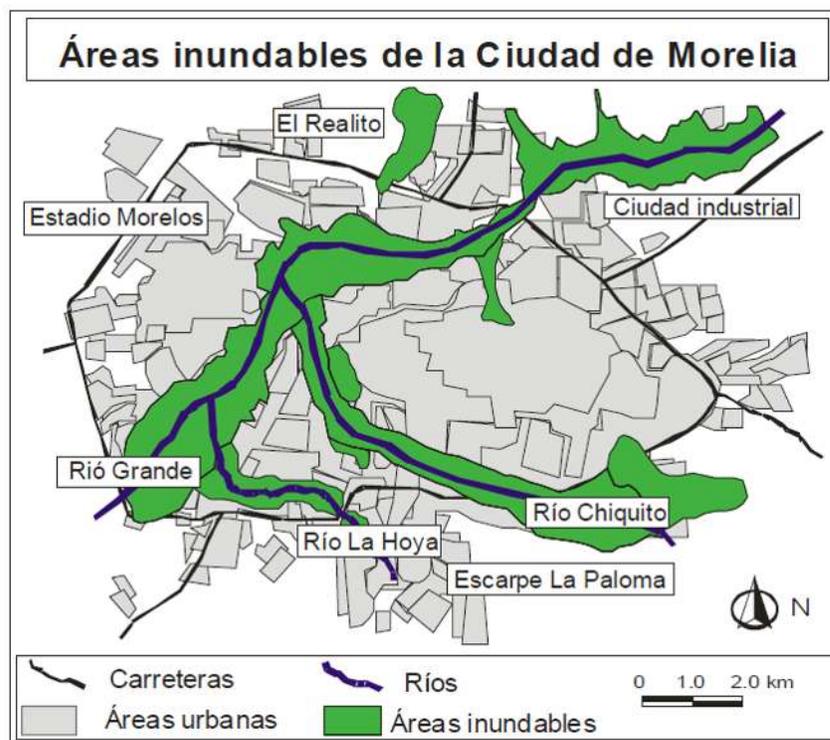


Figura 2.1: Zonas potencialmente inundables de la ciudad de Morelia. Fuente: Arreygue.Rocha, 2004^a.



2.1.2.- Inundaciones históricas y potenciales en la ciudad de Morelia relacionadas con el río Chiquito (Arreygue-Rocha, 2004b)

Efectúa el análisis de las precipitaciones con respecto a los escurrimientos, se señala que julio es el mes con mayores precipitaciones, sin embargo los escurrimientos en el mes de septiembre son más intensos, es decir, que en el periodo de enero a mayo se tiene poca infiltración, pero en los meses de junio y julio aumenta por la presencia de las lluvias, y en los meses de agosto a noviembre se tiene un fuerte escurrimiento lo cual se debe a que el suelo está completamente saturado, por lo que no permite más infiltración, provocando que toda el agua que llueve en este periodo tienda al escurrimiento superficial.

2.1.3.- Evaluación de las constantes inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México (Arreygue-Rocha, 2007)

Amplía el área de estudio y el espectro temporal a cuatro subcuencas que alimentan el río Grande, la subcuenca del río Chiquito (SE), La de Cointzio (S), Itzícuaros (SE) y la Zona Urbana (sección de río Grande que Atraviesa la Ciudad). Esta superficie es cubierta con 8 estaciones meteorológicas que aportan datos de más de 40 años.

Lo interesante es que integra los valores de gasto y capacidad de las secciones de los cauces con varios escenarios para encontrar los valores de capacidad de las secciones de los canales de los ríos Grande y Chiquito. El análisis de este modelo permite identificar las secciones del cauce que provocan remansos y/o desbordamientos. Se incluye un gráfico en el que se representan los eventos de inundación por año, desde 1950 hasta el 2004 (Ver Figura 2.2), en donde se señala que es a partir de 1970 que se comienzan a incrementar los eventos de inundaciones en la ciudad, pero es en los últimos 10 años cuando los escenarios más severos se han presentado. Esto se debe al acelerado y mal planeado crecimiento urbano y las modificaciones en las cuencas hidrográficas. Que van de la mano con la estructuración de la red hidráulica de la ciudad como respuesta a las presiones de la constante reconfiguración de la mancha urbana.



Figura 2.2: Grafico de inundaciones históricas en Morelia (1955-2004).

Fuente: Datos de inundaciones graficados por mes y por año, según una recopilación hemerográfica del diario "La Voz de Michoacán" disponible desde 1950, (año en que se funda el periódico).

Aunque el gráfico sólo muestra la cantidad de eventos, sin mencionar la severidad de estos o los impactos a la población, es un buen referente para indicar que la problemática va en asenso.

Producto de un análisis de los datos de las estaciones meteorológicas, se afirma que la precipitación media anual varía entre 700 y 900 mm, presentándose las mayores precipitaciones en los meses de julio a septiembre, causadas por la invasión de masas de aire cálido y húmedo provenientes de las costas de Michoacán. En los meses de invierno se presenta un periodo de secas con precipitaciones asociadas a fenómenos extraordinarios o a las masas de aire frío provenientes del norte, el régimen de lluvias es predominantemente continental. En el análisis de los datos de precipitación de 40 años se observa que las precipitaciones mayores a 1000 mm tienen un periodo de recurrencia de 10 años.

Para el análisis de las capacidades hidráulicas de los ríos Grande y Chiquito se efectuó un modelado en el software Hec-Ras, considerando los tramos del cauce que están dentro de la mancha urbana. Para el análisis del río Grande se ingresaron tres valores de gasto de proyecto; 50, 75 y 90 m³/s. con el último gasto se comprobaron que la mayoría de los puentes no tiene el claro necesario para soportar estas cargas, produciendo inundaciones en las colonias aledañas a estos.



Para los periodos de retorno en caudales se aplicaron los métodos de valores extremos de Gumbel y de Weibull utilizando los gastos máximos históricos registrados en cada estación de monitoreo. Los resultados obtenidos para el río Grande es que para un gasto de 70 m³/s, la recurrencia sería entre 25 y 30 años, para un gasto de 80 m³/s la recurrencia sería entre 70 y 75 años. En el caso del río Chiquito para un gasto de 50 m³/s, la recurrencia será entre 5 y 7 años, para un gasto de 60 m³/s, se presentaría cada 12 años y para un gasto de 75 m³/s, se tendrá cada 30 años aproximadamente. Cabe recalcar que este último gasto analizado tendría que ser sin ninguna obra estructural que interfiera la escorrentía en el río.

2.2.- DOCUMENTOS OFICIALES

Como documentos oficiales solo existen dos referentes: el Atlas de Riesgos de Morelia (ARM) y el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Morelia (PDUCPM).

Respecto al ARM, la información derivada fue publicada en la Web en un sistema denominado Sistema de Integral de Información de Riesgos (SIIR por sus siglas), se publicó en el mes de Junio de 2005 en un proyecto denominado en ese entonces “Sistema de Información de Riesgos del Estado de Michoacán”. Esta iniciativa la presentan conjuntamente el Gobierno del Estado, La Dirección General de Protección Civil y El Centro Estatal de Tecnologías de Información y Comunicaciones Michoacán. En ese momento el informe ya contempla no solo el modelo conceptual, sino que ya se presentan algunos productos terminados; la Integración cartográfica del estado, la captura y clasificación de los elementos de peligro, la captura y clasificación de infraestructura y el diseño de 122 fichas de elementos. En este informe ya se presentan las áreas de potencial inundación que posteriormente serían publicadas en el Atlas de Riesgos de Morelia, por lo tanto la coincidencia espacial y por ende geométrica de los polígonos “inundables” es total.

Uno de los productos del ARM es un modelo de inundaciones en función de las cotas altimétricas tomando como línea base la cota de 1855 msnm. Se calculó a cada 25 cm hasta llegar a la cota 1885 (Ver Figura 2.3). Con este modelo se estima la distribución de la lámina del agua en los bordes del río Grande. Esta estimación y los valores



altimétricos solo tienen validez para las llanuras de inundación del cauce antes mencionado, debido a que los valores altimétricos sobre los que se extiende el río Chiquito son superiores. Esto es evidente al hacer un análisis hipsométrico, estableciendo los rangos con valores de 30 metros partiendo de la cota 1855 a 1885, para resaltar el piso altimétrico del cauce en cuestión y diferenciarlo del correspondiente al río Chiquito, la interface altimétrica entre estas es ocasionada por la Falla “Central Camionera”-Con orientación NE-SW.

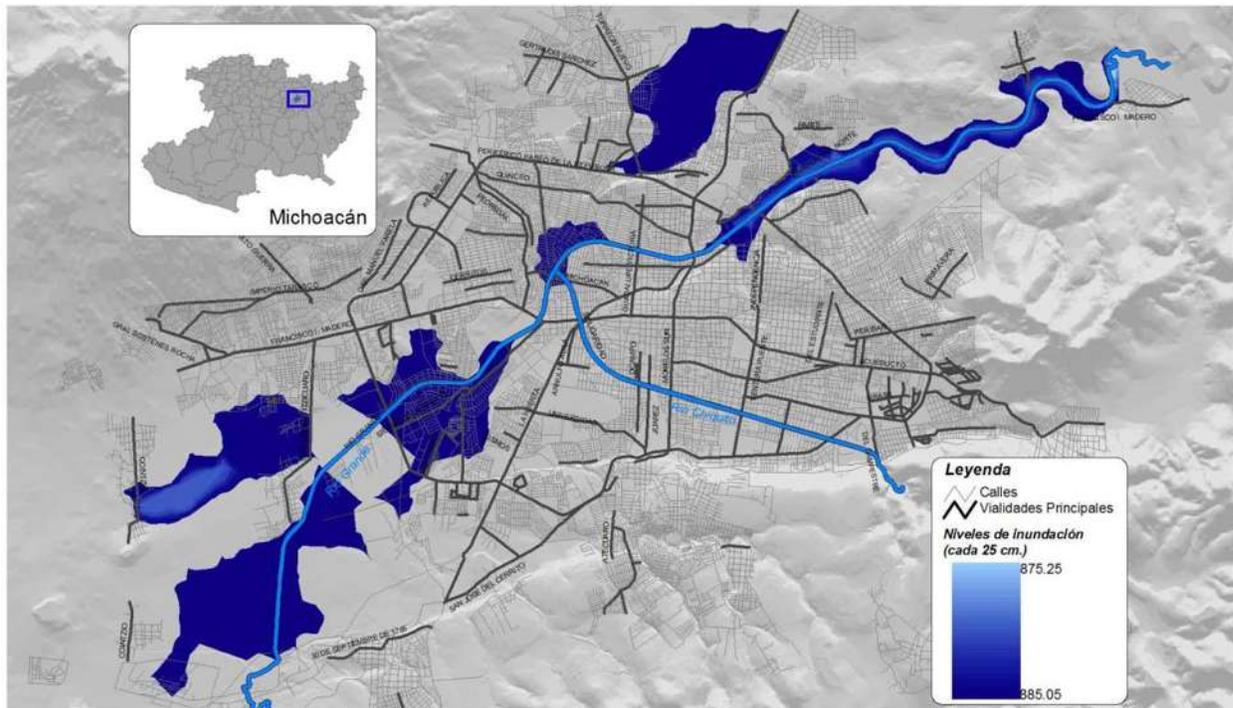


Figura 2.3: Modelo de distribución de la lamina de agua a cada 25 cm.
Fuente: Atlas de Riesgos de Morelia.

Estas condiciones altimétricas son controladas por la actividad geológica del valle de Morelia, en la figura 2.4 se representa el mapa Hipsométrico con las fallas geológicas.

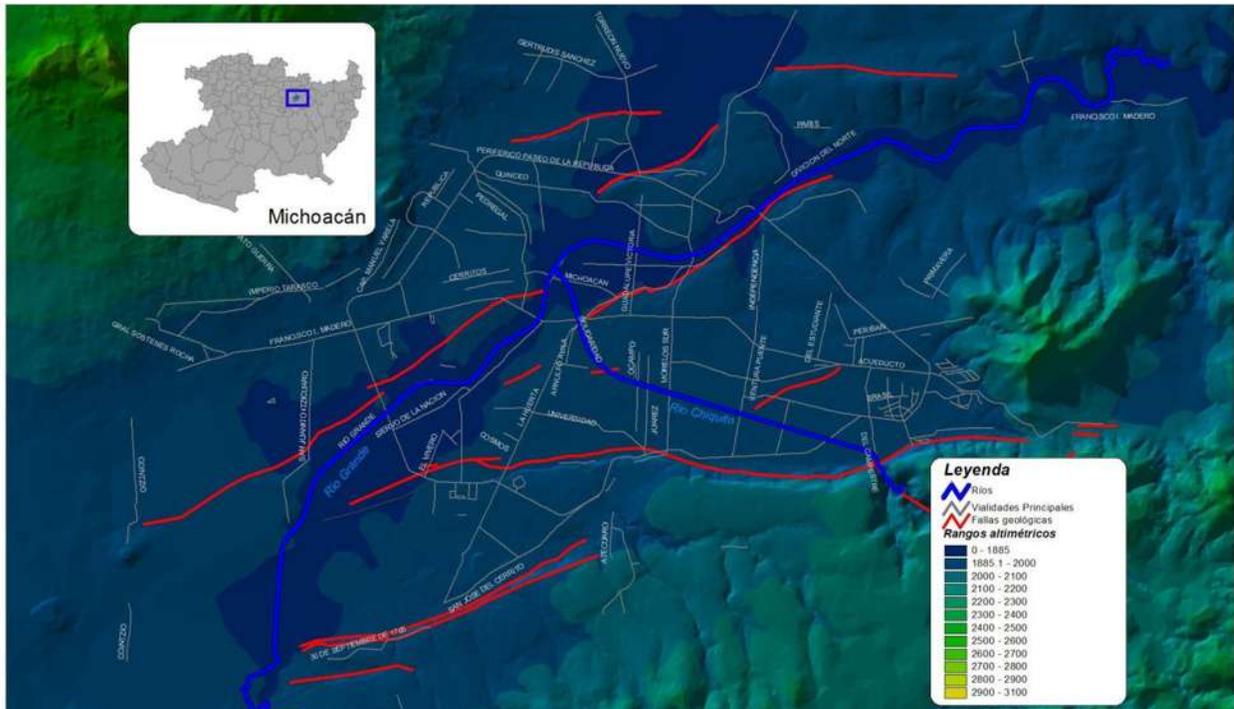


Figura 2.4: Modelo hipsométrico y fallas geológicas de la ciudad de Morelia.
Fuente: Atlas de Riesgos de Morelia.

Respecto al PDUCP, en su carácter legal de instrumento legítimo para la planeación del desarrollo de la ciudad, contempla la utilización del territorio de acuerdo a la vocación de las unidades de suelo en función de una misión y una visión con miras al desarrollo urbano sustentable (PDUCPM, 2010).

En el apartado de diagnóstico presenta una relación de las causas y sitios de la ciudad propensos a sufrir inundaciones, donde tipifica las inundaciones en el plano D-3 VULNERABILIDAD Y RIESGOS (Figura 2.5). Las categorías que maneja son:

- **Perímetro Inundable.** Definido por las condiciones topográficas del lugar y por su cercanía a ríos y canales. Las secciones aledañas al río Grande corresponde casi en su totalidad a las planteadas en el modelo de riesgos por inundaciones, calculado a 25 cm, publicado en el Atlas de Riesgos de Morelia.
- **Predios baldíos sujetos a inundaciones.** Terrenos que en algún momento fueron reportados como áreas inundadas y por consiguiente existe un registro de haber sido invadidos por una lámina de agua. A esta escala de detalle es el único documento que integra estas unidades prediales.



- **Zonas de alto riesgo para inundación.** Los polígonos correspondientes a estas áreas, son aquellos que resultaron afectados en la tormenta severa registrada el 16 de Noviembre del 2003.

Respecto a las causas de las inundaciones refiere que las condiciones topográficas e hidrográficas, así como la falta de una red adecuada de drenaje y alcantarillado pluvial propician problemas de inundaciones en la época de lluvias, que afectan colonias ubicadas principalmente en las márgenes de los ríos y canales. Son tipificadas por sus causas en los siguientes tipos de inundaciones (PDUCPM, 2010):

- **Por desbordamiento de ríos y canales:** Zona de oficinas de la Procuraduría General de Justicia del Estado y las Instalaciones de Policía y Tránsito, colonia Carlos Ma. Bustamante, colonia Torremolinos, parte posterior de la estación del ferrocarril, parte poniente de colonia General P. Ma. Anaya, zona denominada Los Olivos, colonia Industrial y en la ribera de las colonias Félix Ireta, Ventura Puente, Estrella, Electricistas y Nueva Chapultepec, colonia Medallistas Olímpicos, Gertrudis Sánchez, entre otras.
- **Por depresiones Topográficas:** Colonias Barrio Alto, La Soledad, El Realito 2da Etapa, Popular Progreso, La Joya, Lomas de Tecnológico, Jardines del Quinceo, colonia General P. Anaya, Manantiales, Instalaciones de Policía y Tránsito e Ignacio Zaragoza.
- **Por insuficiencia de drenaje pluvial:** Colonias: Obrera, Independencia, Vasco de Quiroga, 5 de Diciembre, Terrazas Campestre, Chapultepec Sur, Nueva Chapultepec, Electricistas, Del Empleado, Estrella, C.F.E, Félix Ireta, Centro Comercial Camelinas, Ventura Puente, Juárez, fraccionamiento Virreyes, Industrial y Prados Verdes.

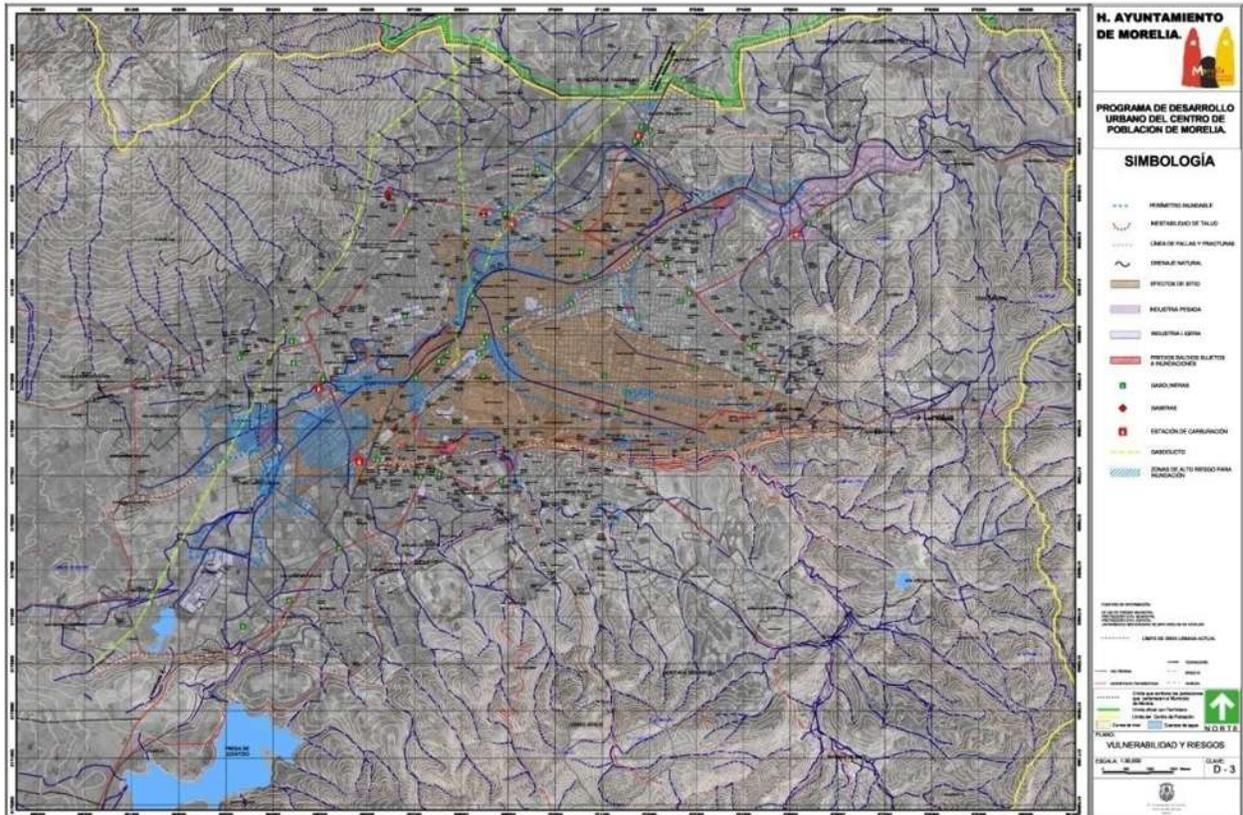


Figura 2.5: Plano D-3 vulnerabilidad y riesgos.
Fuente: PDUCPM 2004.

Este listado de colonias con el atributo de las causas asociadas a la inundación fueron graficadas en el plano de colonias de la ciudad de Morelia, con la finalidad de hacer una comparación con el resto de las fuentes de información consultadas. Cabe hacer mención, que no en todos los casos la colonia es afectada en el total de su superficie, (Ver Figura 2.6). Como se puede apreciar, en este mapa no hay correspondencia en su totalidad con la superficie que establece el perímetro inundable del plano D-3 (Figura 2.5). Una de las causas puede estar en la omisión que se hace en el primer grupo de colonias, inundadas por desbordamientos en ríos y canales, específicamente en la parte final, y las colonias que faltan estén en el grupo de “entre otras”.

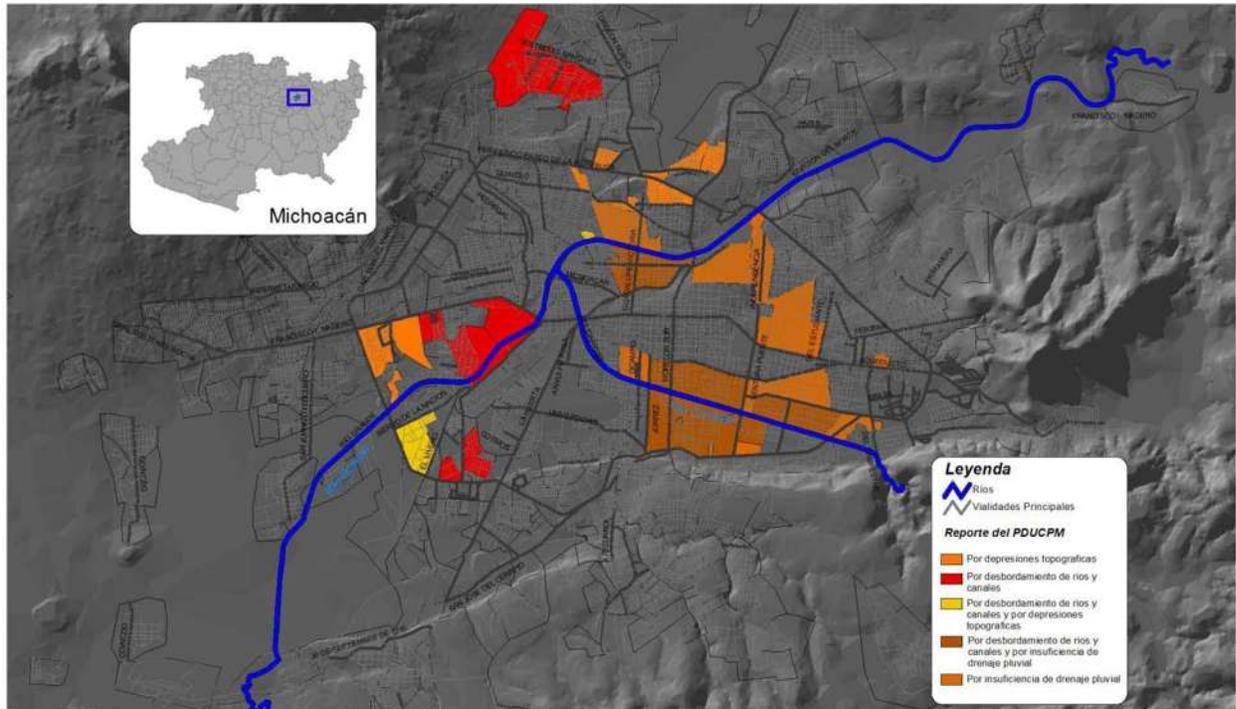


Figura 2.6: Colonias con problemas de inundación.
Fuente: Atlas de Riesgos de Morelia.

2.3.- OFICINAS DE GOBIERNO MUNICIPAL

2.3.1.- PROTECCIÓN CIVIL DEL MUNICIPIO DE MORELIA

La Dirección Municipal de Protección Civil y Bomberos del Municipio de Morelia, constituye otra de las fuentes de información a revisar para la definición de las áreas susceptibles a inundaciones. De acuerdo a los casos atendidos en temporal de lluvias, la oficina de protección civil construyó un listado de las colonias afectadas, según el grado de afectación. No se tienen claros los parámetros mediante los cuales se hace una diferenciación a dichos grados de afectación (Cuadro 2.1).



AFECTACIONES ALTAS	AFECTACIONES MEDIAS A ALTAS
Agustín Arriaga Rivera	Ampliación Torreón Nuevo
Álamos I y II	Del Empleado
Ampliación de Arboledas del Río Grande	Jardines de Santiaguito (Fovisste, Indeco)
Ampliación Gertrudis Sánchez	Las Margaritas (Ampliación las Margaritas)
Arboledas del Río Grande	AFECTACIONES MEDIAS
Benito Juárez	Camelinas
Campestre Los Manantiales	Chapultepec Sur
Canchas de Policía y Tránsito	Doctor Miguel Silva
Carlos Salazar	Electricistas
Ejidal Tres Puentes	Hacienda Tinijaro
Guadalupe Victoria Norte	Jardines del Quinceo
Ignacio Zaragoza	Prados Verdes
Jaime Nunó	Morelos
Jaujilla	Ventura Puente
La Soledad II	Molino de Parras
Las Higueras	Nueva Chapultepec
Lirios	La Industrial
Los Sauces	AFECTACIONES MEDIAS A BAJAS
Medallistas Olímpicos	Felicitas del Río
Pastor	Félix Ireta (Estrella, Condominio Planetario, Conjunto Habitacional Félix Ireta)
Primo Tapia Poniente	
Sentimientos de La Nación (OFICINAS DE PYT)	
Solidaridad	
Tres de Agosto	
Tres Puentes	
Unión Tabiqueros	
Villas del Real Norte	

Cuadro 2.1: Lista de colonias inundadas agrupadas por grado de afectación.
Fuente: Protección Civil del Municipio de Morelia.

En la figura 2.7 se presenta la distribución espacial de las colonias enlistadas en el cuadro 2.1. En él se incluyen las colonias afectadas por diferentes tipos de inundaciones.

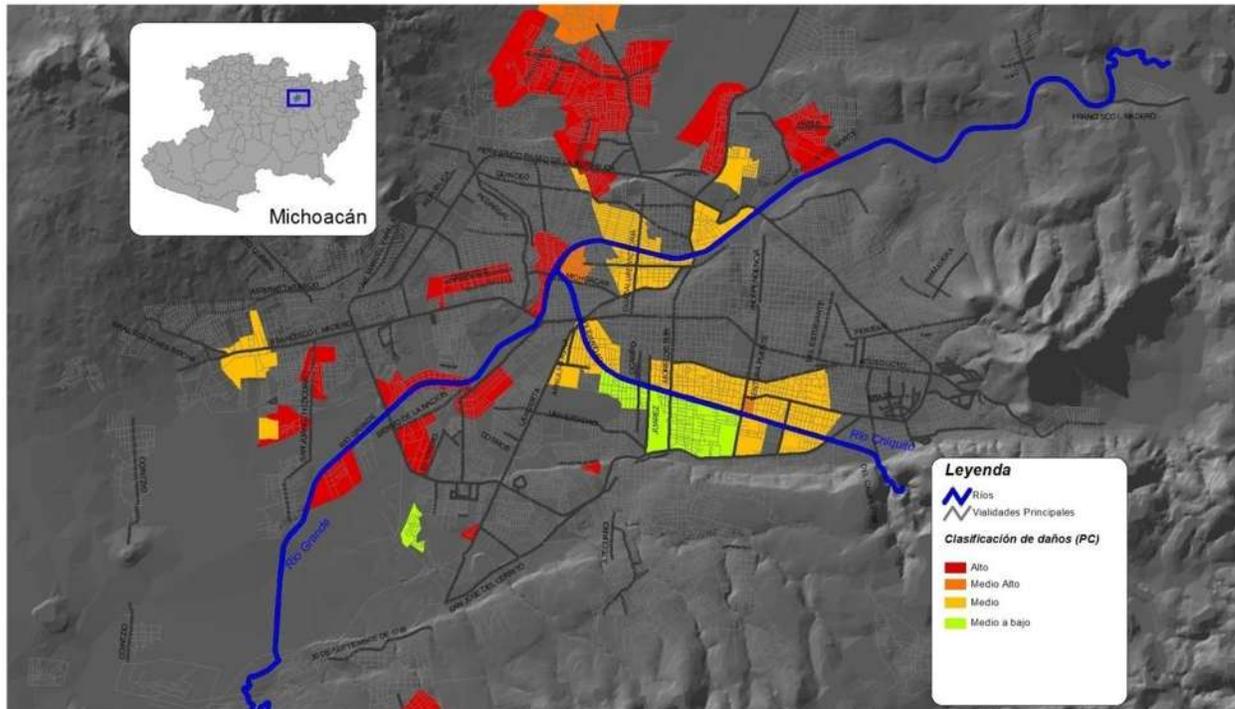


Figura 2.7: Colonias según grado de afectación por inundaciones.
Fuente: Atlas de Riesgo de Morelia.

2.4.- INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MORELIA (NOTA PERIODÍSTICA)

La revisión del PDUCP permitió documentar la postura “oficial” respecto al problema de las inundaciones en la ciudad de Morelia. Por otro lado se obtuvieron los trazos de las zonas inundables en las distintas categorías que establece el diagnóstico de Vulnerabilidad y Riesgos. De los insumos más importantes es la delimitación de las áreas de Riesgo Alto a Inundaciones, debido a que esta delimitación corresponde con una de las inundaciones con mayores afectaciones presentadas en la ciudad. Por lo tanto responden a una zonificación real que se estableció al momento de brindar el apoyo a las familias afectadas durante y después de las inundaciones.

Además de los archivos cartográficos y los datos técnicos presentados en los documentos revisados. En notas periodísticas se identificaron dos de los momentos más críticos que han afectado a la ciudad; la inundación del 16 de septiembre 2003 (Rincón, 2008) y la del 4 de septiembre del 2005.

En septiembre 16 del 2003, en la ciudad de Morelia se registraron 75 mm de lluvia, más que el promedio histórico registrado hasta esa fecha. Como consecuencias provocó



severas inundaciones en la ciudad durante los días 15,16 y 17. Cabe señalar que el mayor valor registrado de la precipitación para el mes de julio en estos últimos cinco años, corresponde al valor histórico promedio registrado hasta la fecha. Esto quiere decir que la magnitud de la precipitación en la estación Cointzio, aumentó en los últimos cinco años y que su variación temporal se refleja más en los meses de mayo, agosto y septiembre.

El 4 de septiembre de 2005, más de diez mil damnificados, mil viviendas afectadas, vehículos varados y pérdidas por varios millones de pesos, fue el saldo que dejó el desbordamiento de los ríos Grande y Chiquito de Morelia cuando el nivel del agua subió hasta cuatro metros e inundó calles y avenidas en 35 colonias de la capital Michoacana. Incluso el Ejército Mexicano aplicó el Plan DN-III para desastres naturales. Bastaron 90 minutos para que gran parte de la ciudad se viera afectada por las severas inundaciones.

Hasta este momento el año de 2005 ha sido el año con la temporada de lluvias excepcionales más fuertes, provocando daños en las viviendas, infraestructura y en la vialidad, lo que trae como consecuencia el perjuicio a la ciudadanía en general, debido a la suspensión de servicios provocados por las fuertes lluvias (Arreygue-Rocha, 2007). Para ambos casos el escenario en el que se presenten precipitaciones iguales o mayores a 75 mm, en periodos de tiempo inferiores a 2 horas, con lluvias consecutivas cuando menos en 10 días anteriores, dentro del temporal de lluvias y con volúmenes acumulados que se retengan en la presa y que la llenen por lo menos al 80% de su capacidad serán considerados como condiciones potencialmente generadoras del peligro de inundaciones.



2.5.- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA)

El Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la ciudad de Morelia (OOAPAS), con el apoyo técnico de la Gerencia Estatal de Michoacán de la Comisión Nacional del Agua (CNA); encomendaron al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) llevar a cabo un diagnóstico del funcionamiento actual del sistema de drenaje pluvial de la ciudad de Morelia y su zona conurbada. Proyecto denominado “ESTUDIO DEL MANEJO DE AGUAS PLUVIALES EN LA ZONA METROPOLITANA DE MORELIA (ZMM), ESTADO DE MICHOACAN”.

Dentro de este estudio integral, la parte hidrológica es de gran importancia para concebir las soluciones y por consiguiente; los proyectos que pueden mitigar los daños por inundación.

Este documento tiene por objetivo principal identificar las acciones a realizar en el corto plazo, así como proponer infraestructuras que permitan un mejor funcionamiento del sistema de drenaje pluvial de la Zona Metropolitana de Morelia.

2.5.1.- RECAPITULACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La red de drenaje pluvial de la ciudad de Morelia y de su Zona Metropolitana (ZMM), está constituida por la red hidrográfica “natural” de la cuenca urbana. El cauce principal es el denominado río Grande y en el que confluyen dos cauces principales. El primero, es el dren Los Itzícuaros, el segundo el denominado río Chiquito cuyos aportes escurren en una superficie sensiblemente inferior a la del dren Los Itzícuaros. El río Grande posee además varios afluentes que confluyen en la zona peri urbana y urbana. Por tanto, tres cauces principales conforman la red de drenaje pluvial de la ZMM. Sus cuencas tributarias respondiendo de diferente manera, inducen un funcionamiento hidráulico particularmente complejo. Primeramente, los afluentes poseen cuencas tributarias con superficies sensiblemente diferentes implicando tiempos de concentración, también, diferentes. Por lo tanto, para una lluvia uniforme, el río Chiquito descarga sus escurrimientos al río Grande más rápido que los escurrimientos provenientes del dren Los Itzícuaros.

Tomando en cuenta que la confluencia del río Chiquito está situada aguas abajo que aquella del dren Los Itzícuaros, se puede inducir que en ese punto se genera un “tapón”



hidráulico, provocando remansos en los tres cauces. Así, en el instante en que los escurrimientos del dren Los Itzícuaros se vierten al río Grande el sistema está ya saturado. Aunado a eso, el funcionamiento del sistema se ve afectado, entre otros, por la política de operación de las obras especiales, por las características morfológicas de los cauces, por la presencia de vegetación y de árboles (tanto en los taludes como en los lechos) y también , por el estrangulamiento de las secciones en donde existen pasos vehiculares y ferroviarios. Estas dos situaciones son las que generan los encharcamientos y las inundaciones en la ZMM.

Un primer diagnóstico muestra que el sistema de drenaje pluvial de la ZMM no se autorregula, por lo que es necesario establecer medidas estructurales y no estructurales para proporcionar elementos que le permitan aumentar sus capacidades, con el fin de proveerle mayor potencial de autorregulación.

Diferentes obras han sido propuestas en este capítulo. Tales obras tienen por particularidad de estar situadas aguas abajo de los cauces que conforman el sistema global de drenaje (a excepción de las obras propuestas en el río Chiquito que representan de manera estricta medidas no estructurales). Estas obras han sido jerarquizadas en función de las observaciones hechas durante los recorridos y a partir de los análisis realizados hasta ahora. Su explicación es presentada en la sección siguiente.

2.5.2.- DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES PROPUESTAS

Con el fin de establecer un programa de diseño y ejecución de obras, se definen tres niveles de prioridad. Dichos niveles son: Nivel I o nivel de urgencia; Nivel II o nivel de reestructuración. Nivel III o nivel de autonomía. Es importante recalcar que tales niveles, no toman en cuenta el crecimiento de la mancha urbana, por lo que las soluciones propuestas resuelven el problema actual, proveyendo una cierta capacidad (de regulación) del sistema (autonomía) para absorber los efectos de una parte del dinamismo urbano durante un lapso de tiempo relativamente corto.



OBRA	OBRA PROPUESTA
NIVEL DE PRIORIDAD I	
I.1	Laguna de regulación del dren Los Itzícuaros
I.2	Presas de regulación sobre el río Chiquito
I.3	Reestructuración del puente de la av. Michoacán sobre el río Grande
NIVEL DE PRIORIDAD II	
II.1	Laguna de regulación aguas arriba de los puentes de la Av. Madero Reestructuración del paso ferroviario sobre el río Chiquito aguas arriba de la confluencia con el río Grande
II.2	Rectificación del río Chiquito en la zona de la confluencia con el río Grande
II.3	Laguna de regulación en la Unidad Deportiva Cuauhtemoc
II.4	Laguna de infiltración aguas arriba de la zona de los filtros
II.5	
NIVEL DE PRIORIDAD III	
III.1	Laguna de regulación Carlos Salazar
III.2	Laguna de regulación "La Mintzita"
III.3	Obras contra encharcamientos de la zona de "Las Palomas"

Tabla 2.1. Lista de obras propuestas.

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2004.

El nivel I en teoría deberá disminuir considerablemente los problemas que se presentan año con año, resolviendo así la problemática actual. Para ello, se proponen tres obras. Si se consideran tiempos iguales de concentración y un único punto de confluencia, con las primeras dos obras (ver tabla 2.1) se pretende controlar un gasto máximo para un periodo de retorno de 5 años equivalente a $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (según los primeros resultados del estudio hidrológico: $26 \text{ m}^3/\text{s}$ de la cuenca de Los Itzícuaros y $44 \text{ m}^3/\text{s}$ de la cuenca del río Chiquito) de los casi $95 \text{ m}^3/\text{s}$ que fueron estimados en la confluencia del río Chiquito y el río Grande. Este análisis simplificado, permite por lo tanto observar la necesidad de controlar los cauces antes mencionados.

La tercera obra de este primer nivel corresponde a aquella que es percibida por la población de Morelia, como una de las causantes de los problemas de inundación y encharcamientos. Sin haber evaluado el rol de esta obra sobre el disfuncionamiento del sistema, se ha decidido incorporarla a este nivel, sabiendo que pudiera existir un estudio susceptible de eliminar esta tercera solución. Esto, con el fin de evitar dualidad de acciones entre diversos organismos de servicios públicos de la ciudad Morelia.

En el nivel II fueron propuestas 5 diferentes obras que permitirán principalmente, regular los cauces afluentes al río Grande. Algunas de estas obras, poseen un gran



volumen de regulación y su construcción permitirá disminuir considerablemente los volúmenes que arriban al río Grande. El conjunto de obras del nivel en cuestión y del precedente, representa una modificación mayor del sistema.

Las obras propuestas en el nivel III corresponden a aquellas que permitirán regular el 100% de la red de cauces que conforma al sistema de drenaje pluvial y cuya importancia pudiera ser, a primera vista, despreciable pero necesaria.

Es importante recalcar que varias opciones de solución tienen una componente arquitectónica. Dicha componente ha sido introducida con el fin de integrar, al paisaje urbano, las modificaciones del sistema de drenaje en cuestión. Además, esta integración permitiría establecer las bases para incorporar las medidas no estructurales no consideradas en este proyecto (técnicas alternativas de drenaje, políticas de ordenamiento urbano, reforestación, etc.) necesarias para que los futuros asentamientos urbanos no afecten, de manera importante, el funcionamiento del sistema de drenaje actual.

2.5.3.- DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO A MODELAR

El proyecto consiste en la construcción de dos lagunas artificiales de regulación delimitadas por un terraplén perimetral, cuyo objeto es impedir las inundaciones durante las épocas de lluvia. Se podrían construir en los predios conocidos como: Los Itzícuaros y Unidad Deportiva Cuauhtémoc. El embalse de cada laguna de regulación estará contenido por un terraplén que servirá como represa por periodos cortos, ya que opera exclusivamente en la época de lluvias, teniendo un tiempo de almacenamiento máximo de un día.

Estos dos sitios tienen características similares en cuanto a su topografía y estratigrafía, destacando la presencia de una depresión topográfica de -1 m (aproximadamente), de un estrato compresible de turba de 1.50 a 2.0 m de espesor. Se consideraron como premisas de diseño que los embalses estarán sometidos a llenado y vaciado rápido, que permanecerán llenos menos de 24 horas y que la altura promedio de los bordos serán 2 m, por lo que se diseñaron con una altura máxima de 2.5 m y mínima de 1.5 m, si los embalses se dejaban durante tiempos prolongados se provocarían asentamientos excesivos en el terraplén del bordo.



CAPITULO 3

SELECCIÓN DE LA ZONA PARA MODELACIÓN

La selección de la zona que va hacer representada mediante un modelo a escala y construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, llamado “Modelo físico para el estudio de alternativas de solución para el control de inundaciones”, se eligió la parte suroeste de la ciudad de Morelia, debido a su gran vulnerabilidad para ser inundada por los continuos desbordamientos de los ríos y canales, presentándose este fenómeno cada temporada de lluvias.

La selección de esta área se hizo con ayuda de mapas y registros de Protección Civil y de H. Ayuntamiento de Morelia, Atlas de Riesgo de Morelia, Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010 y mapas elaborados por Néstor Corona Morales en su trabajo de tesis de maestría titulado “Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a Inundaciones”.

3.1.- ÁREAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES

A continuación vamos a observar y analizar algunos mapas relacionados a las inundaciones de la ciudad de Morelia, estos mapas nos van ayudar para la selección de la zona o los tramos de los cauces que vamos a modelar en el laboratorio.

3.1.1.- PLANO CON PELIGRO DE INUNDACIÓN

En la figura 3.1 se muestra las zonas más susceptibles a ser inundadas, las áreas de tonalidades que van del marrón al naranja, son las que se refieren a la inundación sufrida el 16 de septiembre de 2003, estas son las superficies que mayor consistencia tienen en zonas inundables, estas fueron delimitadas durante y después de los operativos de atención del evento de dicha fecha.

En el caso de las áreas marcadas en tonalidades de amarillo hasta verde oscuro, se aprecia una coincidencia espacial entre el perímetro de inundación marcado en el PDUCPM y las áreas bajas o depresiones topográficas que son potencialmente inundables.



Se puede apreciar en el mapa, la zona que he seleccionado para el estudio de modelación física, encerrada en un círculo, en esta área se localizan la confluencia de los drenes Itzícuaros y Barajas al río Grande, se encuentra en una de las depresiones topográficas de la ciudad y además tiene un grado de vulnerabilidad para ser inundada muy alto.

Esta área seleccionada abarca colonias con un alto grado de afectación por inundaciones, como son: Arboledas del Río Grande, Campestre Los Manantiales, Canchas de Policía y Tránsito, Ejidal Tres Puentes, Sentimientos de la Nación (Secretaria de Educación en el Estado, Policía y Departamento de Transito del Estado), Unión Tabiqueros, etc. Todas estas colonias se encuentran marcadas de color rojo (peligro de inundación alto), dentro del círculo de la zona seleccionada, como se muestra en la figura 3.1.

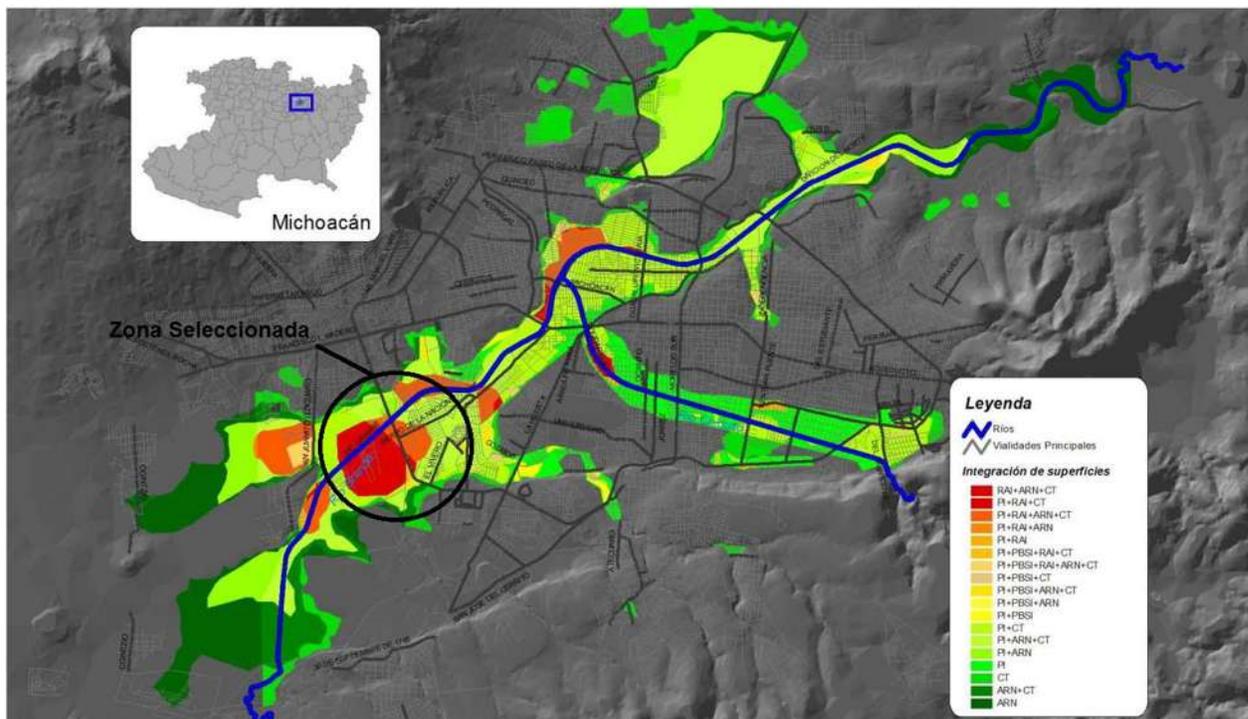


Figura 3.1: Plano de la integración espacial de áreas con alguna categoría de peligro de inundación. Fuente: PDUCPM, ARM, caracterización topográfica y mapa de colonias del Ayuntamiento.



3.1.2.- PLANO DE PERÍMETRO DE INUNDACIÓN

En la figura 3.2 se puede apreciar de mejor manera el perímetro de inundaciones con la línea de color azul claro, marcando además las superficies de las colonias con algún reporte de afectación por inundaciones, La línea de color rojo marca las superficies dañadas por las inundaciones ocurridas el 16 de septiembre del 2003, definidas como de alto riesgo.

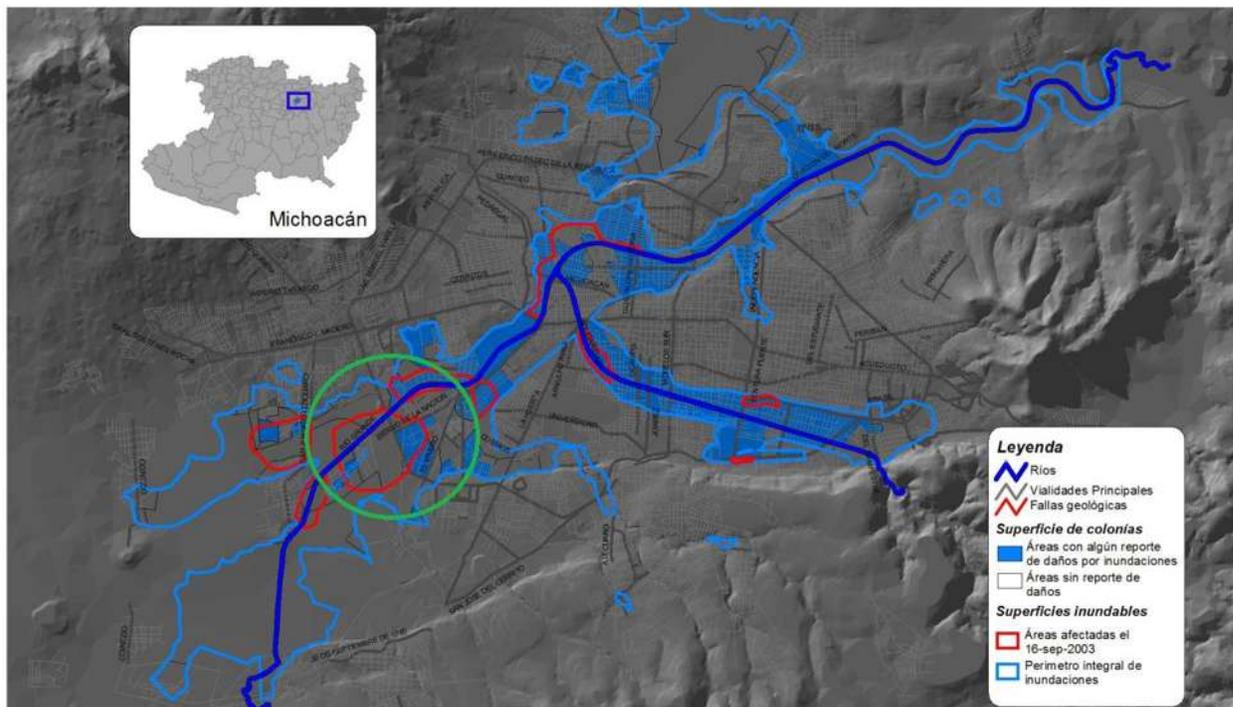


Figura 3.2: Plano de integración espacial de áreas con alguna categoría de peligro e índice de colonias con problemas de inundación.

Fuente: PDUCPM, ARM, Caracterización topográfica y mapa de colonias del Ayuntamiento.

3.1.3.- PLANO DE SUSCEPTIBILIDAD A INUNDARSE

Todos los mapas anteriormente vistos, los podemos relacionar en el mapa elaborado por Néstor Corona Morales en su trabajo de tesis de maestría titulado “Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a Inundaciones” donde se muestra el mapa (figura 3.3) de peligro a inundación la ciudad de Morelia.



Se observa en la parte encerrada con el círculo azul, es la zona que escogimos para efectuar la modelación, siendo esta parte de la ciudad la más peligrosa a sufrir inundaciones.

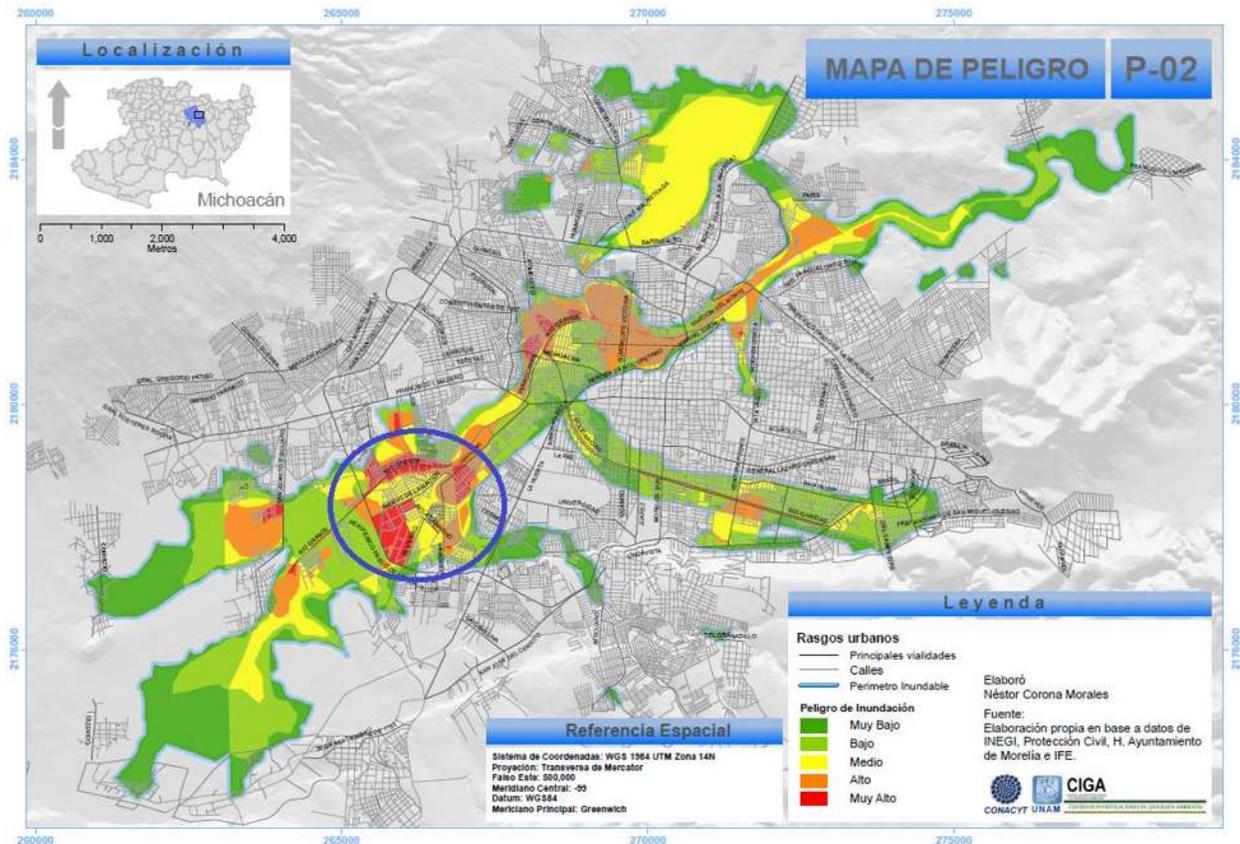


Figura 3.3: Mapa de susceptibilidad a inundaciones.
Fuente: Néstor Corona Morales (Tesis de maestría titulado “Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a Inundaciones”).

3.1.4.- MAPA DE SUJETOS DE VULNERABILIDAD

En este mapa (figura 3.4) de sujetos de vulnerabilidad se muestra que la Población, Vivienda e Infraestructura son las que sufren mayor daño en la zona a estudiar, encerrada con un círculo.

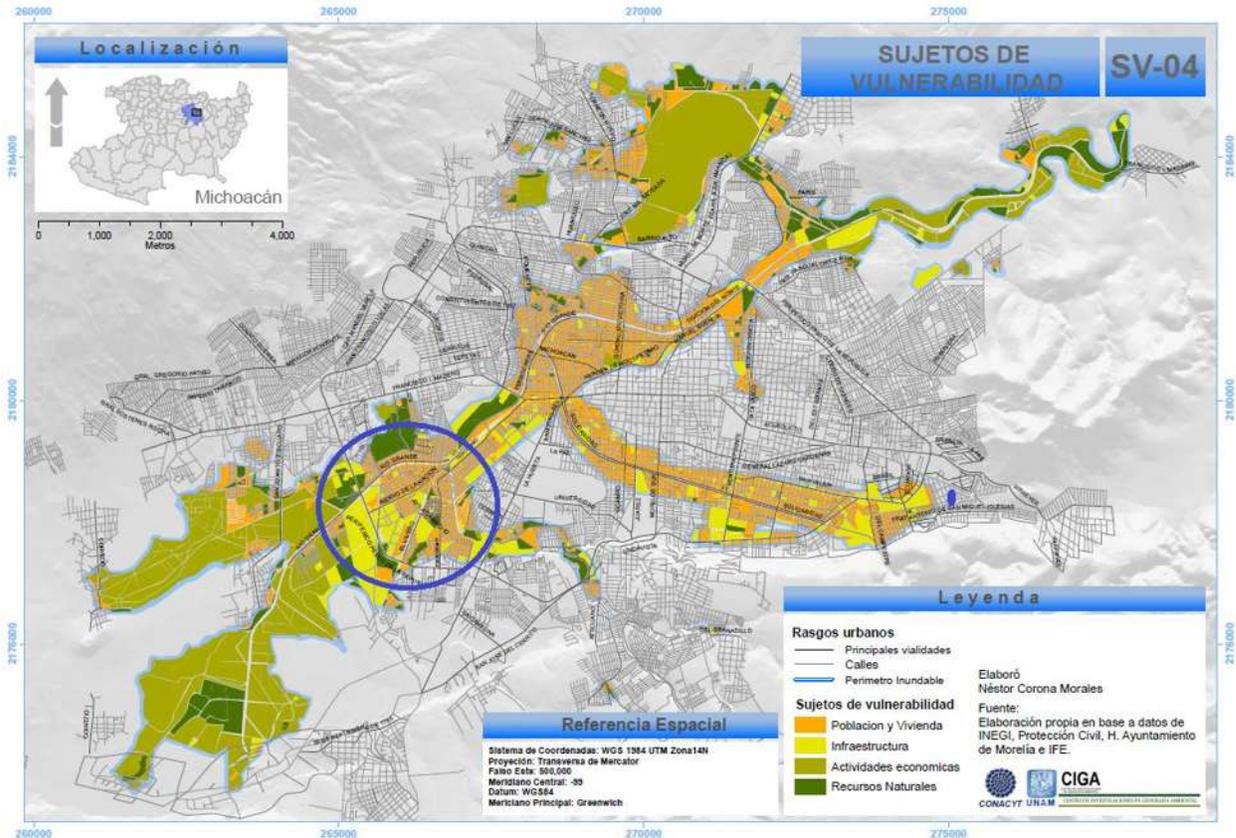


Figura 3.4: Mapa de sujetos de vulnerabilidad.

Fuente: Néstor Corona Morales (Tesis de maestría titulado “Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a Inundaciones”).

3.1.4.1.- COLONIAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES

Protección Civil emite un listado de 52 colonias con algún grado de afectación en los temporales de lluvia. Mientras que el PDUCPM enlista un total de 38 entre las cuales incluye algunos puntos de la ciudad como afectados. El total de colonias con algún registro de afectación o exposición a inundaciones es de 75, existe una coincidencia entre ambos listados de 15 colonias. En el cuadro se enuncian las colonias que han sido afectadas por inundaciones y el grado y/o causa del evento según ambas fuentes oficiales.

Las colonias marcadas de color azul corresponden a las colonias que sufren un daño de inundación en los tramos de los ríos que se están modelando. Como se puede apreciar el grado de afectación de todas las colonias de acuerdo a los registros de Protección Civil y Ayuntamiento de Morelia, corresponden a un grado de afectación alto,



y las causas de las inundaciones corresponden en su mayoría a desbordamientos de ríos y canales, y depresiones topográficas de acuerdo al Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010.

#	NOMBRE	GRADO DE AFECTACION *	CAUSA DE LAS INUNDACIONES **
1	3 de Agosto	Alto	Sin Reporte
2	5 de Diciembre	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
3	Agustín Arriaga Rivera	Alto	Sin Reporte
4	Ampliación Arboledas Río Grande	Alto	Sin Reporte
5	Ampliación Gertrudis Sánchez	Alto	Sin Reporte
6	Ampliación las Margaritas	Medio Alto	Sin Reporte
7	Ampliación Torreón Nuevo	Alto	Sin Reporte
8	Arboledas Río Grande	Alto	Sin Reporte
9	Barrio Alto	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
10	Benito Juárez	Alto	Sin Reporte
11	Camelinas	Medio	Sin Reporte
12	Campestre los Manantiales	Alto	Sin Reporte
13	Carlos Ma. Bustamante	Sin Reporte	Por desbordamiento de ríos y canales
14	Carlos Salazar	Alto	Sin Reporte
15	Chapultepec Sur	Medio	Por insuficiencia de drenaje pluvial
16	Club Campestre La Huerta	Medio a bajo	Sin Reporte
17	Comisión Federal de Electricidad	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
18	Condominio Planetario	Medio a bajo	Sin Reporte
19	Del Empleado	Medio Alto	Por insuficiencia de drenaje pluvial
20	Dr. Miguel Silva	Medio	Sin Reporte
21	Ejidal Tres Puentes	Alto	Sin Reporte
22	Electricistas	Medio	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial
23	El Realito 2da Etapa	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
24	Estrella	Medio a bajo	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial
25	Felicitas Del Río	Medio a bajo	Sin Reporte
26	Félix Ireta	Medio a bajo	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial
27	Félix Ireta Conjunto hab.	Medio a bajo	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial
28	FOVISSTE Santiaguito	Medio Alto	Sin Reporte
29	General P. Ma. Anaya	Sin Reporte	Por desbordamiento de ríos y canales - Por depresiones Topográficas
30	Gertrudis Sánchez	Sin Reporte	Por desbordamiento de ríos y canales
31	Guadalupe Victoria	Alto	Sin Reporte



MODELO FISICO PARA EL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE
SOLUCION PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES



32	Hacienda Tinjaro	Medio	Sin Reporte
33	Ignacio Zaragoza	Alto	Sin Reporte
34	INDECO Santiaguito	Medio Alto	Sin Reporte
35	Independencia	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
36	Industrial	Medio	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial
37	Jaime Nunó	Alto	Sin Reporte
38	Jardines De Santiaguito	Medio Alto	Sin Reporte
39	Jardines Del Quinceo	Medio	Por depresiones Topográficas
40	Jaujilla	Alto	Sin Reporte
41	Juárez	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
42	La Soledad	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
43	La Joya	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
44	La Soledad II	Alto	Sin Reporte
45	Las Higueras	Alto	Sin Reporte
46	Las Margaritas	Medio Alto	Sin Reporte
47	Lirios	Alto	Sin Reporte
48	Lomas de Tecnológico	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
49	Los Álamos	Alto	Sin Reporte
50	Los Sauces	Alto	Sin Reporte
51	Manantiales	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
52	Medallitas Olímpicos	Alto	Por desbordamiento de ríos y canales
53	Molino de Parras	Medio	Sin Reporte
54	Morelos	Medio	Sin Reporte
55	Nueva Chapultepec	Medio	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial
56	Obrera	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
57	Pablo Galeana	Alto	Sin Reporte
58	Pastor Manuel Sánchez Camarena	Alto	Sin Reporte
59	Popular Progreso	Sin Reporte	Por depresiones Topográficas
60	Prados Verdes	Medio	Por insuficiencia de drenaje pluvial
61	Primo Tapia Poniente	Alto	Sin Reporte
62	Sentimientos de la Nación	Alto	Por desbordamiento de ríos y canales - Por depresiones Topográficas
63	Solidaridad	Alto	Sin Reporte
64	Terrazas Campestre	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
65	Torremolinos	Sin Reporte	Por desbordamiento de ríos y canales
66	Tres Puentes	Alto	Sin Reporte
67	Unión De Tabiqueros	Alto	Sin Reporte
68	Vasco De Quiroga	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
69	Ventura Puente	Medio	Por desbordamiento de ríos y canales - Por insuficiencia de drenaje pluvial



70	Virreyes	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial
71	Villas del Real	Alto	Sin Reporte
72	Parte posterior de la estación del ferrocarril (Adolfo López Mateos, Ferrocarril y Nicolás Bravo (Los Ejidos))	Sin Reporte	Por desbordamiento de ríos y canales
73	Los Olivos	Sin Reporte	Por desbordamiento de ríos y canales
74	Centro comercial Camelinas	Sin Reporte	Por insuficiencia de drenaje pluvial

*Clasificación de afectaciones sufridas en las colonias, de acuerdo a los registros de Protección Civil y Ayuntamiento de Morelia.

**Relación de colonias con categoría de inundables, según la causa de la inundación, de acuerdo al Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010.

3.1.5.- MAPA DE VULNERABILIDAD TOTAL DE LAS VIALIDADES

En el mapa (figura 3.5) de Vulnerabilidad total de las vialidades se distingue los segmentos de vía de mayor criticidad en el sistema vial urbano de la ciudad, los cuales requieren atención inmediata para evitar contingencias en caso de que se vuelva a presentar una inundación como en el año 2003, y que corresponde a las vialidades:

- Periférico Paseo de la República. Del tramo de Manantial la Escondida a Ignacio Aldama.
- Río Grande. Del tramo de Periférico Paseo de la República hasta su entronque con el cauce del Río Grande.
- Siervo de la Nación. Toda la avenida, siendo el tramo más crítico el tramo de Onofre Portugal a Periodismo José Tocaven Lavin (Periodismo).
- Junta de Jaujulla. Del tramo de Liberales de México hasta Onofre Portugal.
- Declaración de Independencia. Prácticamente toda la vía.
- Teodoro Gamero. Prácticamente toda la vía.
- Periodismo José Tocaven Lavin (Periodismo). Toda la avenida, siendo el tramo más crítico el de Fray Servando Teresa de Mier hasta Ramón Esparza.

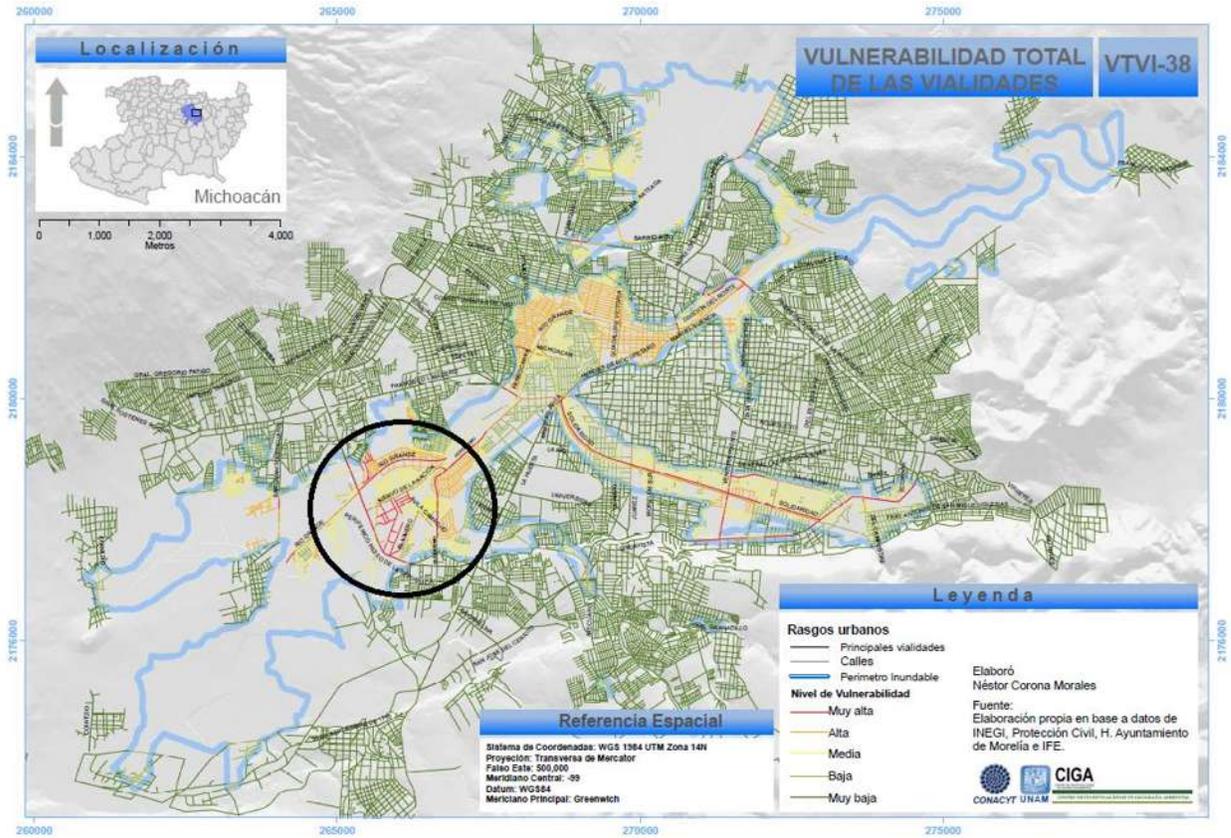


Figura 3.5: Mapa de vulnerabilidad total de las vialidades.

Fuente: Néstor Corona Morales (Tesis de maestría titulado “Vulnerabilidad de la ciudad de Morelia a Inundaciones”).

Comparando todos los mapas expuestos anteriormente, concluimos que la zona seleccionada, encerada con el círculo, es una de la más propensa a las inundaciones.



3.2.- LOCALIZACIÓN DE LAS LAGUNAS

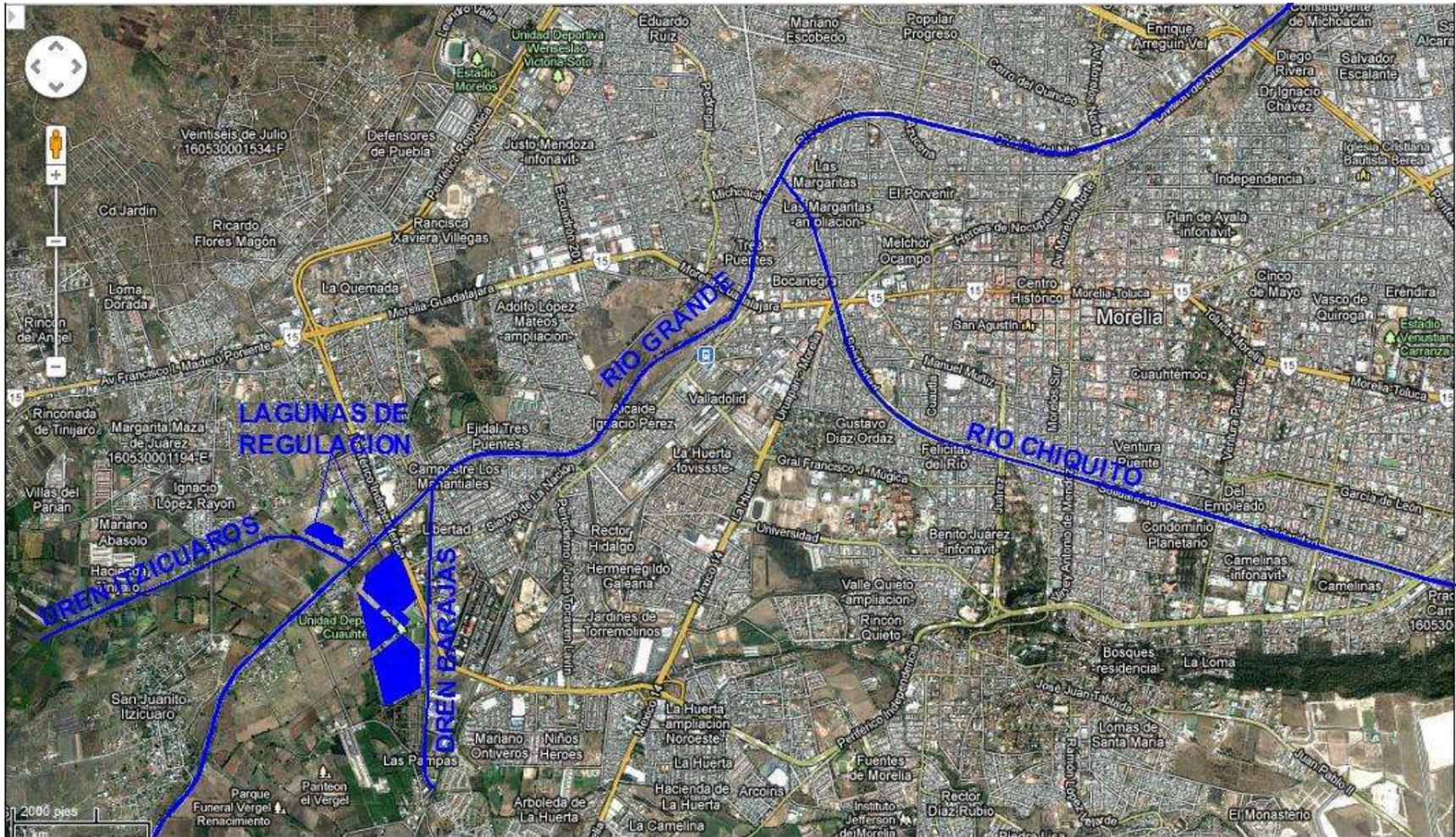


Figura 3.6: Mapa de localización de ríos, drenes y lagunas de regulación.



CAPITULO 4

TEORÍA DE MODELOS

4.1.- CONCEPTO DE MODELO HIDRÁULICO

Cada vez que el ingeniero se enfrenta al problema de diseñar una estructura tiene que resolver armoniosamente un compromiso entre los aspectos de eficiencia, seguridad y costo, lo que implica establecer con un razonable grado de confianza la relación entre la estructura proyectada y el medio circundante.

Los fenómenos hidráulicos, como expresión del mundo natural, son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente. Sólo podemos hacerlo parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos de que se dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la Naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante los modelos numéricos y los modelos físicos. Ambos se complementan.

Un modelo, físico o numérico, es una representación simplificada de un aspecto de la Naturaleza y, en muchos casos, de las obras construidas en ella. La construcción de modelos no sólo es un método admitido, sino que es el que ha permitido el progreso de la ciencia. Hacer ciencia es construir modelos. (Arturo Rocha Felices. Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico. Febrero del 2004).

Todo esto resulta muy claro a partir del siglo XVII con la introducción del método científico. Galileo creó un modelo para describir la caída de los cuerpos. Newton creó un modelo para describir la atracción de los cuerpos. Kepler creó un modelo para describir las órbitas planetarias. Bohr creó un modelo para describir la estructura atómica. Las fórmulas de la Hidráulica son modelos creados para una realidad muy simplificada y esquematizada.

La palabra “modelo” no es exclusiva de la hidráulica, por lo tanto, no debe entenderse únicamente con el significado restringido que ella tiene. Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones más o menos idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones, en verdad deformaciones, de la realidad. Tanto los



modelos matemáticos como los modelos físicos representan esquematizaciones del mundo natural.

4.2.- MODELOS NUMÉRICOS VS MODELOS FÍSICOS

Los avances de las dos últimas décadas en materia de computación han precipitado un auge extraordinario en la simulación numérica de sistemas hidráulicos e hidrológicos. Toda agrupación profesional, docente o de investigación en las diferentes ramas de la ciencia hidráulica cuenta con modelos matemáticos para resolver los más diversos problemas. Compañías petroleras simulan el comportamiento de torres, tanques y plataformas bajo la acción de olas, mareas y corrientes marinas; planificadores seleccionan alternativas de desarrollo basándose en modelos multivariados de generación sintética; hidrólogos predicen caudales y escurrimientos utilizando complejos modelos estocásticos. La disponibilidad de avanzados métodos numéricos para el análisis de problemas relacionados con la mecánica de los fluidos ofrece importantes ventajas a ingenieros e investigadores.

Los modelos numéricos de confiabilidad comprobada tienden a ser flexibles y adaptables, y generalmente producen soluciones rápidas y exactas. Un modelo que simula la estratificación térmica de un embalse, por ejemplo, puede utilizarse con buenos resultados en represas con diferentes características geológicas e hidrológicas. Ingenieros diseñando sistemas de tubería, por otra parte, pueden con mínimo esfuerzo optimizar sus parámetros de diseño utilizando métodos numéricos de análisis.

Los modelos matemáticos, por virtud de su adaptabilidad y eficiencia son altamente valorados por profesionales de la hidráulica, pero su alcance es limitado.

Los métodos numéricos de análisis pueden ser utilizados solo cuando la estructura matemática del fenómeno en cuestión está perfectamente definida. Esta es una limitación importante, ya que un gran número de los problemas de interés comprenden fenómenos hidráulicos de carácter tridimensional, cuya representación matemática se desconoce aún. El acarreo y depósito de sedimentos, el efecto de olas y corrientes sobre estructuras portuarias, la efectividad de disipadores de energía y las características del flujo supercrítico no uniforme son ejemplos de algunos de los



problemas difíciles de analizar matemáticamente. Los modelos numéricos actualmente disponibles en estas aéreas tienen un alcance limitado.

Las soluciones confiables a problemas en estos y otros campos requieren estudios experimentales en modelos físicos.

Los modelos de instalaciones hidráulicas a escala reducida tienen una larga y distinguida trayectoria, y siguen representando el método más seguro, eficaz y económico de analizar los más complicados problemas hidráulicos. Los modelos físicos permiten el estudio de fenómenos hidráulicos cuyo planteamiento teórico no se encuentra lo suficientemente desarrollado para establecer su estructura matemática. Tal es el caso de diversos problemas costeros y estuarios, donde la superposición de olas, corrientes, mareas y vientos dificulta sobremanera el análisis numérico. El carácter tridimensional de estos fenómenos puede apreciarse en modelos físicos. La visualización de los procesos de flujo, una de las grandes ventajas de los modelos físicos, da al experimentador soluciones tangibles y un entendimiento práctico de los fenómenos bajo estudio.

Las limitaciones de los modelos físicos son escasas. Una gran mayoría de las investigaciones hidráulicas conciernen estructuras o procesos que se presentan a la reducción a escala. Mientras los experimentadores manejen debidamente el análisis dimensional y sepan interpretar la mecánica del flujo en el modelo, los resultados obtenidos serán representativos de las condiciones en el prototipo.

4.3.- NUEVOS HORIZONTES EN LA SIMULACIÓN DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS

El estudio experimental de la hidráulica aumenta su grado de complejidad en la medida que los adelantos tecnológicos lo permiten y nuevos campos de la investigación lo requieren. Los avances en la precisión de instrumentos de medición hacen posible hoy la simulación a pequeña escala de todo tipo de fenómenos, desde el rompimiento de una presa hasta las fuerzas ejercidas por un buque sobre un muelle. Los instrumentos electrónicos y ópticos disponibles actualmente permiten medir con un alto grado de exactitud niveles de agua, temperatura, humedad, salinidad, fuerzas de impacto, etc. Los modelos físicos pueden ser contruidos de distintos metales, plásticos, maderas,



concreto, etc., permitiendo la reproducción fiel de rugosidades, información topográfica y todo detalle estructural. Los equipos electrónicos pueden ser adaptados para registrar e interpretar un gran número de datos en forma simultánea. El perfeccionamiento de los métodos numéricos de análisis complementa también la capacidad de simulación de los profesionales de la hidráulica.

La investigación hidráulica abarca muchas aéreas, no todas asociadas con el aprovechamiento de los recursos hídricos.

La optimización del diseño de plataformas y torres flotantes para la explotación petrolera es un ejemplo. El estudio de la interrelación entre hielo y estructuras es otro, estimulado por la construcción de numerosas instalaciones civiles y militares cerca de los polos. Los investigadores hidráulicos estudian también los efectos sobre el medio ambiente de estructuras tales como planta nucleares, que tienden a cambiar las características del flujo y de los fluidos mismos en diversos sistemas ecológicos.

Pero la experimentación hidráulica puede aplicar sus horizontes aun sin recurrir a nuevos campos. Estudios tradicionalmente realizados por profesionales de la hidráulica pueden multiplicarse gracias a los avances tecnológicos ya mencionados. El bajo costo de los modelos físicos y las indiscutibles ventajas que estos ofrecen a ingenieros hidráulicos deben generalizar el uso de tan importante recurso. El diseño de obras de captación, derivación, conducción, bombeo, y en general de toda estructura hidráulica puede optimizarse sin aumentar significativamente los costos totales de las obras.

4.4.- TEORIA SE LA SIMILITUD

La Hidráulica tiene la gran ventaja de poder representar físicamente, a escala, la mayor parte de sus modelos. Para lo cual se ha desarrollado una disciplina específica que es la Teoría de Modelos, la que consiste básicamente en aceptar el principio de similitud, llamado también de semejanza. El principio de similitud consiste en aceptar que las conclusiones obtenidas del análisis de un fenómeno son aplicables a otro fenómeno. Por ejemplo, del estudio del salto hidráulico que ocurre en un modelo se pueden obtener conclusiones aplicables al salto hidráulico que ocurre en la naturaleza. Cuando esto es cierto se dice que entre ambos fenómenos hay similitud.



El modelo no puede ser simplemente una imitación de la naturaleza. Tampoco puede ser la representación física de un modelo matemático. El modelo debe participar de alguna de las cualidades del prototipo que trata de representar. Así por ejemplo, en el modelo antes mencionado de un salto hidráulico, la participación está en la igualdad del Número de Froude, en la existencia en el modelo de un grado aceptable de turbulencia, y además, por cierto, en la similitud geométrica.

Una de las grandes ventajas, y a la vez dificultad, de la investigación en modelos reside en el hecho de que, por ejemplo, el modelo de un vertedero es un vertedero, el modelo de un río es a su vez un río. Es decir, que el modelo tiene existencia hidráulica propia, independientemente de lo que representa. Un modelo no es una maqueta.

La aplicación de un criterio de similitud es lo que nos permite obtener resultados que puedan ser extrapolados al prototipo. Si no se cumple el criterio de similitud adecuado, el modelo no participará de las cualidades del prototipo cuya reproducción nos interesa. En este caso el modelo no sólo sería inútil, sino, además, engañoso.

Los modelos, para que reúnan la cualidad que les permita transferir las observaciones, resultados y conclusiones a su prototipo deben ser mecánicamente similares. Para cumplir con este requisito deben satisfacerse, desde el punto de vista hidráulico, con tres condiciones de similitud:

- Similitud geométrica
- Similitud cinemática
- Similitud dinámica

La comprensión del significado de estas tres similitudes se facilitara notablemente si se suponen dos esquemas de flujo, uno de los cuales corresponde al modelo del otro.

4.4.1.- SEMEJANZA GEOMETRICA

Hay semejanza geométrica entre modelo y prototipo si el cociente de longitudes correspondientes (homologas) es el mismo.

Así, la relación de tirantes, anchos, distancias, etc., correspondientes debe ser constante, es decir existirá similitud geométrica si



$$\frac{X_p}{X_m} = \frac{H_p}{H_m} = \frac{P_p}{P_m} = \text{CONSTANTE}$$

O bien, en forma general

$$\frac{L_p}{L_m} = \text{CONSTANTE}$$

Donde:

L_p = Longitud del prototipo

L_m = Longitud, correspondiente, del modelo

La relación constante se conoce con el nombre de escala de longitudes, y se denota

$$L_e = \frac{L_p}{L_m}$$

Y, en general, se usa el subíndice "e" que se lee escala de... para indicar el cociente de cualquier característica del prototipo entre la característica correspondiente del modelo.

En ocasiones, por necesidades de funcionamiento o de construcción, generalmente cuando las magnitudes horizontales son muy grandes comparadas con las verticales, como es el caso de los modelos marítimos fluviales, no se conservan esta condición de similitud ya que se adopta una escala para dichas magnitudes horizontales y otra para verticales, denominándose entonces a este tipo de modelos "Distorsionados", donde la escala de líneas horizontales es mayor que las verticales, o sea

$$X_e > Y_e$$

Y el cociente

$$\Delta = \frac{X_e}{Y_e}$$

Es el grado de distorsión del modelo

4.4.2.- SEMEJANZA CINEMATICA

Hay semejanza cinemática si los vectores de la velocidad, de todos los puntos correspondientes, son semejantes geoméricamente.

Es decir, si se cumple con la similitud geométrica y además

$$\frac{V_p}{V_m} = V_e$$



$$\frac{a_p}{a_m} = a_e$$

Donde:

V_p = Velocidad en el prototipo

V_m = Velocidad, correspondiente, en el modelo

V_e = Escala de velocidades

a_p = Aceleración en el prototipo

a_m = Aceleración, correspondiente, en el modelo

a_e = Escala de aceleraciones

4.4.3.- SIMILITUD DINAMICA

Finalmente, existe semejanza dinámica si los polígonos de fuerza, de todos los puntos correspondiente, son semejantes geométricamente.

Es decir, se cumple que

$$\frac{F_p}{F_m} = F_e$$

Donde:

F_p = Fuerza en el prototipo

F_m = Fuerza en el modelo

F_e = Escala de fuerza

Para determinar este último concepto es necesario determinar que fuerzas actúan.

4.5.- CONDICIONES DE SIMILITUD PARA MODELOS DISTORSIONADOS

Debido a que hay problemas en que las distancias horizontales son de un orden de magnitud mayor que las distancias verticales, por ejemplo: ríos, playas, estuarios; se usan modelos distorsionados donde la escala de longitudes horizontales es mayor que las verticales, o sea

$$X_e > Y_e$$

Y el cociente

$$\frac{X_e}{Y_e} = \Delta$$



Se denomina distorsión del modelo y es el índice de la mayor o menor deformación geométrica del modelo. Se recomienda que el valor de Δ sea menor que 8, aunque este no es un límite rígido.

Otras causas que conducen a la distorsión son:

- Cuando la rugosidad necesaria en el modelo es tan pequeña que físicamente es imposible conseguirla. Al distorsionar el modelo y tener una escala vertical menor que la horizontal, se tendrán pendientes mayores y para contrarrestar o más bien para compensar el efecto de estas en el escurrimiento, se deberá tener rugosidades mayores en el modelo, las cuales ya podrán proporcionarse prácticamente.
- Cuando no se puede conseguir el mismo tipo de escurrimiento en modelo que en prototipo (esta es una condición que siempre deberá tenerse presente: que el escurrimiento en el modelo tenga turbulencia parecida al prototipo).
- Por razones de espacio. Cuando el modelo es demasiado grande y no cabe en el lugar que se tenga disponible o que resulten tirantes de agua demasiado pequeños en los que no puedan apreciarse ciertas magnitudes por no poder efectuarse mediciones o que resulten dominados por otros factores (por ejemplo la tensión superficial), etc.
- Existen distorsiones en otras magnitudes que intervienen en los fenómenos hidráulicos, por ejemplo en las escalas de masas específicas, ya que puede haber una para líquidos y otra para determinados sólidos colocados dentro de la corriente; una para el diámetro del material sólido que transporta una corriente y otra para las magnitudes lineales, etc.

De manera general se puede decir que existe distorsión en los modelos hidráulicos cuando existe más de una escala para una misma magnitud dimensional.

4.5.1.- LEY DE SIMILITUD DE FROUDE PARA MODELOS DISTORSIONADOS

Se establecerán a continuación las escalas que gobiernan a un modelo distorsionado en el que se estudia un fenómeno en el que domina la fuerza de gravedad.



En los fenómenos hidráulicos regidos por la gravedad, las magnitudes lineales verticales son muy importantes por que dichos fenómenos dependen de gran parte de ellas.

Es por ello que el número de Froude para modelos distorsionados adopta la forma

$$F = \frac{V}{\sqrt{gY}} \quad (1)$$

En donde "Y" es una magnitud lineal vertical característica.

Ahora, la expresión fundamental de la condición de Froude para modelos distorsionados es

$$V_e = Y_e^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Y a partir de ella se infieren las otras relaciones de escala.

4.5.1.1.- EJEMPLO ESCALA DE GASTOS

Por definición

$$Q_e = A_e V_e \quad (3)$$

Donde

$$A_e = X_e Y_e \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en la (3) y haciendo operaciones algebraicas se obtiene la escala de gastos para modelos distorsionados.

$$Q_e = X_e Y_e^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

En la tabla (4.1) se muestran las nuevas relaciones que se deben satisfacer.



Características	Ley de Froude
Longitud horizontal	X_e
Longitud vertical	Y_e
Área	$X_e Y_e$
Volumen	$X_e^2 Y_e$
Tiempo	$\frac{X_e}{(g_e Y_e)^{\frac{1}{2}}}$
Velocidad	$(g_e Y_e)^{\frac{1}{2}}$
Aceleración	$\frac{g_e Y_e}{X_e}$
Gasto	$X_e (g_e Y_e^3)^{\frac{1}{2}}$
Masa	$\rho_e X_e^2 Y_e$
Fuerza	$\gamma_e X_e Y_e^2$
Presión	$\gamma_e Y_e$
Energía y Trabajo	$\gamma_e X_e^2 Y_e$
Potencia	$\gamma_e X_e (g_e Y_e^5)^{\frac{1}{2}}$
Pendiente	$\frac{Y_e}{X_e}$

Tabla 4.1: Valores de las escalas para la condición de Froude en Modelos Distorsionados.

4.5.2.- LEY DE SIMILITUD DE REYNOLDS PARA MODELOS DISTORSIONADOS

No es posible establecer las escalas para el caso en que las fuerzas que dominen sean las de viscosidad, puesto que en este caso, la forma es muy importante, como sucede en un estudio de un perfil aerodinámico o de un submarino (se estudia de hecho, la forma más conveniente) y por tal motivo se está obligado a conservar la similitud geométrica.



El criterio de similitud escogido, la selección de escalas, la determinación de los límites del modelo y la consideración de los efectos de escala son de primerísima importancia para interpretar adecuadamente los resultados del modelo.

4.5.3.- VENTAJAS DE LOS MODELOS

Un punto a tenerse en cuenta para tomar una decisión es la importancia de la estructura que se está estudiando. Si se trata de una estructura de gran costo y complejidad, cuya falla acarrearía graves consecuencias debemos pensar necesariamente en una investigación en modelo. Pero, si se tratase de una estructura pequeña, fácilmente reparable y cuya destrucción o colapso no tuviese consecuencias graves, podría no requerirse un estudio en modelo hidráulico.

Una investigación en modelo se presenta cuando la teoría requerida para el diseño es incompleta, inaplicable o inexistente. Este es un caso muy frecuente.

Como se ha señalado anteriormente las fórmulas de la Hidráulica corresponden en su mayor parte a situaciones idealizadas en un mundo bidimensional. Pero, hay también consideraciones de otro tipo como la posibilidad de introducir un ahorro importante en el costo de las obras. La experiencia demuestra que determinadas estructuras pueden ser igualmente eficientes y seguras, a un menor costo. El modelo permite la comprobación, o, a veces, el descubrimiento de este hecho.

Elevar el grado de seguridad de la estructura. La investigación en modelo físico, es decir, la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones permite observar y, a veces, intuir problemas que no habían sido imaginados durante el diseño en el gabinete.

Con las siguientes preguntas y respuestas se justifica totalmente la construcción del modelo físico.

¿Cuánto cuesta un modelo?

La respuesta es sencilla: muy poco si lo comparamos con el costo del diseño, casi nada si se le compara con el costo total de la obra, algo interesante si se piensa en el ahorro probable y prácticamente nada si se le compara con la seguridad adicional obtenida.



¿Cómo se justifica técnicamente la investigación en un modelo hidráulico?

Son varias las razones. Una de las más importantes es la tridimensionalidad. En un modelo el flujo es tridimensional. Esta es una gran diferencia con respecto a la mayor parte de las fórmulas que se emplea en la Hidráulica, las que corresponden a modelos bidimensionales. Adicionalmente, el modelo permite apreciar el funcionamiento de la estructura en tres dimensiones. Un modelo permite también el estudio de diversas condiciones de diseño y operación. Se puede variar los caudales, la cantidad de sólidos y otras características del escurrimiento con gran facilidad.

¿En qué momento del estudio debe realizarse la investigación en modelo?

A veces se piensa erróneamente que la investigación en modelo es un ensayo adicional, complementario, para perfeccionar algunos detalles y que puede hacerse a la finalización del diseño definitivo. Sin embargo, nuestra opinión es diferente. Cuando la investigación en modelo es necesaria debe formar parte del estudio definitivo y realizarse simultáneamente con él.

Adicionalmente las ventajas para los modelos distorsionados son las siguientes:

- Los tirantes, alturas de ola y pendientes se exageran facilitando su medición.
- Ayuda a reducir el tamaño del modelo.
- En modelos de fondo móvil se facilita el transporte de partículas.

4.5.4.- DESVENTAJAS PARA MODELOS DISTORSIONADOS

- Se distorsiona la semejanza dinámica.
- El escurrimiento puede ser diferente que en el prototipo, por ejemplo en modelos de oleaje.
- Su interpretación es más compleja.
- En ocasiones presenta un efecto psicológico desfavorable al que lo observa.



4.6.- SELECCIÓN DE ESCALAS

4.6.1.- RESTRICCIONES DE LABORATORIO

Para la selección de las escalas del modelo, el parámetro principal que se tiene, es el espacio disponible que existe para su construcción. En el laboratorio se encuentra un espacio de 8 m de ancho por 11 m de largo como se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1: Espacio disponible en el laboratorio.

4.6.2.- DATOS DEL PROTOTIPO

El propósito de este proyecto es poder modelar los tramos de río más largos que se puedan, pero debido al espacio en el laboratorio y a los recursos económicos disponibles para la construcción, esto no es posible, por esta razón solamente modelaremos la parte de confluencia de los drenes Itzícuaros y Barajas al río Grande como de muestra en la figura 4.2. La longitud del río grande a modelar es de 1,704 m, el dren Itzícuaros 492 m y el dren Barajas 1,732 m. Estos tramos de ríos y zonas aledañas son las que tienen un mayor peligro de desbordamiento e inundación como se menciono anteriormente.

En la información topográfica (planta y secciones transversales) de los drenes de descarga al Río Grande en el tramo que va de la Presa de Cointzio hasta la planta de



aguas residuales Atapaneo, además planta y secciones transversales del Río Grande en dicho tramo, que fueron proporcionados por el Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Ciudad de Morelia (OOAPAS) se delimito el área de la zona que va a ser representada en forma física y a escala en el laboratorio, como se puede observar en la figura 4.2.

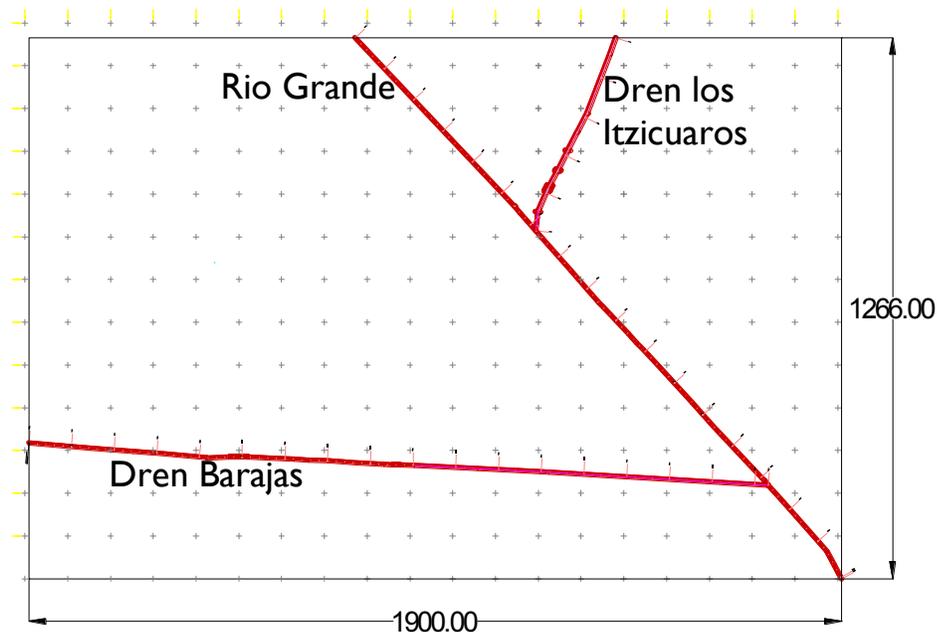


Figura 4.2: Espacio representado en el modelo.

4.6.3.- ESCALA HORIZONTAL Y VERTICAL

Aplicando las ecuaciones de la tabla 4.1 para las ecuaciones de longitud horizontal y longitud vertical se obtienen las escalas correspondientes.

Escalas de líneas horizontales:

$$X_e = \frac{X_p}{X_m} = \frac{1900}{12} = \mathbf{158.33}$$

Se propone un grado de distorsión $\Delta = 3$

Escala de líneas verticales:

$$Y_e = \frac{X_e}{\Delta} = \frac{158.33}{3} = \mathbf{52.77}$$



En la figura 4.3 se muestra la sección del río Grande correspondiente a la estación 0+993.15 m, a una escala de 1:158.33 en lo horizontal y en lo vertical.

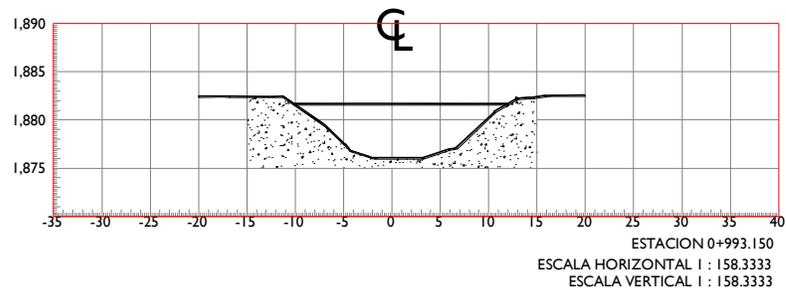


Figura 4.3: Sección transversal del río sin distorsión.

En la figura 4.4 se muestra la sección del río Grande correspondiente a la estación 0+993.15 m, a una escala horizontal de 1:158.33 y a una escala vertical de 1:52.77.

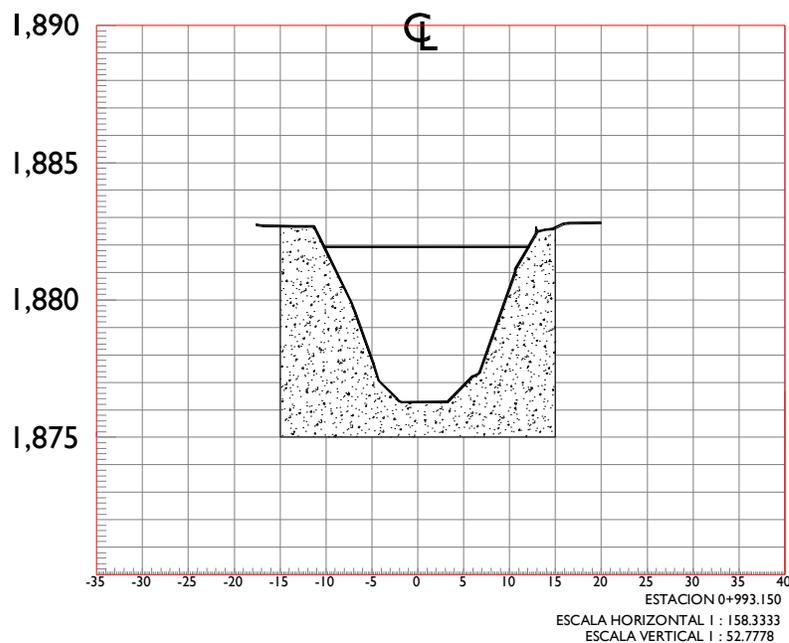


Figura 4.4: Sección transversal del río con distorsión vertical de 3.

En las dos figuras anteriores se observa claramente la diferencia de una sección transversal que no está distorsionada y otra que tiene una distorsión vertical de 3, para nuestro proyecto se utiliza secciones distorsionadas verticalmente.



En la tabla 4.2 se muestran los valores correspondientes a los diferentes tipos de escala utilizando la condición de Froude en modelos distorsionados (tabla 4.1), estas escalas las utilizamos para interpretar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

Características	Ley de Froude (factor de escala)
Longitud horizontal	$X_e = 158.3333$
Longitud vertical	$Y_e = 52.7778$
Área	$(158.33)(52.78) = 8,356.48$
Volumen	$(158.33)^2(52.78) = 1,323,109.56$
Tiempo	$\frac{158.33}{(52.78)^{\frac{1}{2}}} = 21.79$
Velocidad	$(52.78)^{\frac{1}{2}} = 7.26$
Aceleración	$\frac{52.78}{158.33} = 0.33$
Gasto	$(158.33)(52.78)^{\frac{3}{2}} = 60,708.45$
Masa	$(158.33)^2(52.78) = 1,323,109.57$
Fuerza	$(158.33)(52.78)^2 = 441,064.38$
Presión	52.78
Energía y Trabajo	$(158.33)^2(52.78) = 1,323,109.57$
Potencia	$(158.33)(52.78)^{\frac{5}{2}} = 3,204,325.87$
Pendiente	$\frac{52.78}{158.33} = 0.33$

Tabla 4.2: Valores de las escalas para la condición de Froude en Modelos Distorsionados.

Si se usa el mismo liquido en el modelo y prototipo las siguientes propiedades se igualan a 1

Peso específico del agua $\gamma = 1,000 \frac{kg}{m^3}$

Densidad del agua $\rho = 101.97 \frac{kgseg^2}{m^4}$

Aceleración de la gravedad $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$



4.6.4.- PLANO

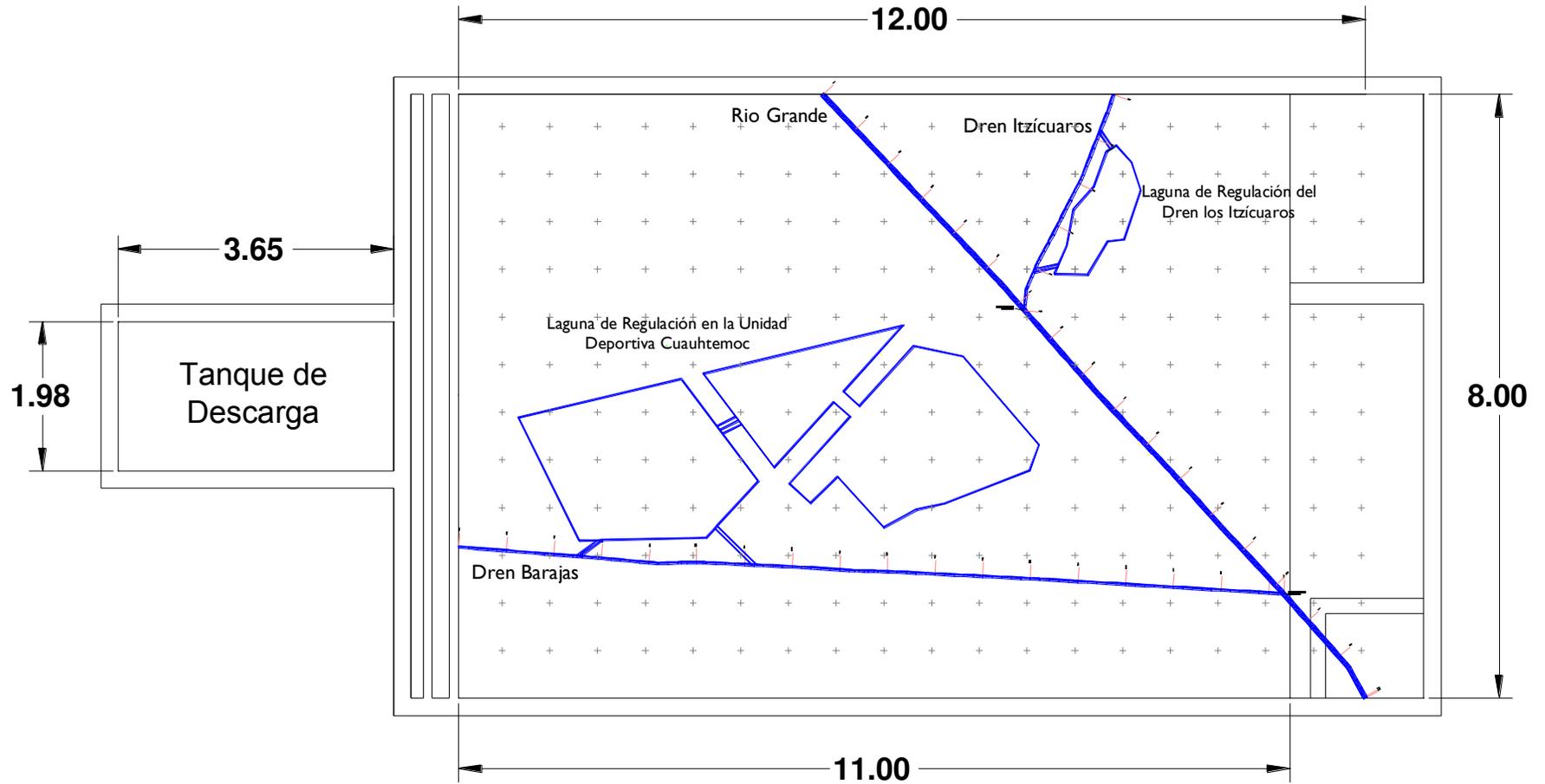


Figura 4.5: Plano de ríos y lagunas a construir.



CAPITULO 5

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La construcción del modelo es una de las etapas del proyecto más importante, porque se va a plasmar en forma física todo lo planteado anteriormente.

Después de haber generado los planos a escala correspondientes del Río Grande, lo Drenes Itzícuaros y Barajas, y además las lagunas de regulación correspondientes de cada dren, continuamos con la construcción del modelo.

La construcción se realiza en diferentes etapas, las cuales son:

- Limpieza y adecuación de la zona disponible para construir el modelo.
- Trazo y sellado de muro.
- Colocación perimetral de ladrillo y plantilla de nivel.
- Detallado de las secciones transversales del río y los drenes.
- Lagunas de regulación.
- Pintura y limpieza.
- Instrumentación y equipo.

Ahora describiremos el desarrollo de cada una de estas actividades:

5.1.- LIMPIEZA Y ADECUACIÓN DE LA ZONA DISPONIBLE A CONSTRUIR EL MODELO

Se realizó una limpieza general en toda la zona que abarca el área disponible para la construcción del modelo, retirando todos aquellos objetos que estuvieran obstruyendo el espacio, hasta conseguir una superficie limpia y libre.

Adicionalmente tuberías de acero existentes se cortaron y se retiraron, otras tuberías se tuvieron que reparar por que se encontraban muy dañadas y se colocaron algunos accesorios en el tanque de descarga para evitar fugas de agua.



En la figura se muestra las condiciones en que se encontraba el área del laboratorio destinada para la construcción del modelo.

Figura 5.1: Limpieza y adecuación de la zona disponible para construir el modelo.

5.2.- TRAZO Y SELLADO DE MURO

Se trazo una cuadrícula, con una separación de líneas de 0.6316 m, esto corresponde a 100 m de las líneas referenciadas con coordenadas UTM correspondientes a la ciudad de Morelia, la escala horizontal que estamos manejando es de 1:158.33, visto anteriormente. Teniendo ya trazada la cuadrícula se trazan los ejes correspondientes al río Grande, dren Barajas, dren Itzícuaros y lagunas de regulación.



La cuadrícula se marco para facilitar el trazo de los ejes correspondientes del río, drenes y lagunas de regulación.

Figura 5.2: Trazo de la cuadrícula.

Posteriormente se continuó con el sellado del muro, esto se hizo para evitar el escurrimiento del agua que vierte del tanque de descarga hacia la superficie a construir, no olvidemos que anteriormente las instalaciones disponibles pertenecían al modelo



“Mesa de Arena” y por esta razón se realizaron varias adecuaciones a las instalaciones existentes.



Figura 5.3: Trazo y sellado de muro.

En toda la longitud del muro se rellenaron los espacios abiertos con una mezcla de mortero, se aplano interior y exteriormente y finalmente se le aplico un terminado fino para evitar fugas de agua.

5.3.- COLOCACIÓN PERIMETRAL DEL LADRILLO Y PLANTILLA DE NIVEL

El ladrillo es colocado en ambos lados del trazo del río y drenes con una separación de de 20 cm formando una especie de cajón para que posteriormente sea colocado el molde que va ir delineando la forma de la sección transversal de los ríos.



Figura 5.4: Colocacion perimetral de ladrillo.

Los ladrillos son colocados en forma de canto siguiendo la forma longitudinal del río.

El Río Grande y los drenes Itzícuaros y Barajas por la escala que se está manejando es imposible darle pendiente o desniveles, por esta razón lleva una plantilla de cemento para poder anivelar y regular las imperfecciones del suelo firme ya existente.



La plantilla de nivelación que se aplicó es una mezcla de cemento y arena y tiene un espesor de 2 cm.

Figura 5.5: Plantilla de nivel.

5.4.- DETALLADO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL RÍO Y LOS DRENES

En esta etapa de la construcción le damos forma a la sección del río, utilizando moldes de lámina, elaborados a escala con la forma exacta de la sección del río, se colocaron estos moldes de lámina dentro del cajón que forma el ladrillo, alineados sobre el eje del río, a una distancia de 65 cm, en cambios de dirección del río o en cambios de sección transversal, esto se realizó para que se pudiera plasmar la sección del río natural lo más semejante posible a la realidad.

En el río Grande se hicieron cinco cambios de sección en los tramos: 0+000.00 – 0+619.28 que corresponde al inicio del río Grande que comenzamos a modelar hasta la confluencia del dren Itzícuaros al río Grande, 0+619.28 – 0+993.15 corresponde de la confluencia del dren Itzícuaros al río Grande hasta el puente del Periférico Paseo de la República, 0+993.15 – 1+023.25 tramo que abarca el puente del Periférico Paseo de la República, 1+023.25 – 1+424.76 del puente del Periférico Paseo de la República hasta



la confluencia del dren Barajas al río Grande, 1+424.76 – 1+704.00 de la confluencia del dren Barajas al río Grande hasta el final del tramo modelado.

Para los drenes Itzícuaros y Barajas solamente se utilizó una sección tipo para todo su tramo, ya que estos drenes su sección es muy constante en todo el trayecto que modelamos.



Figura 5.6: Colocación del los moldes de lamina.

Los moldes de lamina se colocan y se figan utilizando mezcla de mortero, el espacio que queda entre sección y sección es rellenado de mezcla de mortero, para ir dando forma a la sección.



Se le da forma a la sección transversal del río, utilizando los moldes de lámina como base y empleando una pequeña regla de acero que va delineando los tramos que quedan entre una sección y otra sección.

Figura 5.7: Detallado de la sección transversal del río y drenes.

Para la construcción de la sección transversal del río se utilizó la mezcla de mortero de cemento y arena, esta mezcla proporciona la rugosidad necesaria que requiere el modelo.



Finalmente la sección queda terminada, con un acabado áspero, esto es para proporcionar la rugosidad necesaria.

Figura 5.8: Sección transversal terminada.

5.5.- LAGUNAS DE REGULACIÓN

Las lagunas de regulación se construyeron después de haber terminado con el río y drenes, estas lagunas se construyeron de forma semejante a los ríos, primero se colocó ladrillo en forma de canto en toda la periferia del eje trazado, se realizó un relleno de arena para proporcionarle el nivel necesario, posteriormente se hizo un colado utilizando concreto y finalmente se aplicó una lechada para darle el terminado.



En la figura se muestra la colocación del ladrillo en forma de canto en toda la periferia de las lagunas.

Figura 5.9: Colocación de ladrillo.



Figura 5.10: Lagunas de regulación terminada.

Finalmente las lagunas quedan con un terminado de concreto.

5.6.- PINTURA Y LIMPIEZA

Finalmente se hizo una limpieza general, quitando todo el desperdicio de materiales que se generó, se limpió con agua para dejar una superficie libre de polvo para poder aplicar la pintura en los costados de los ríos, lagunas de regulación y además en el muro perimetral que encierra el área de construcción.



Figura 5.11: Construcción terminada.

En la figura se muestra la construcción de los ríos y lagunas, lista para aplicar la pintura.



En la figura se muestra a los cauces y lagunas pintadas.

Figura 5.12: Construcción pintada.

5.7.- INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPO

Se construyeron compuertas para ser colocadas en las entradas y salidas de las lagunas de regulación, con el fin de poder controlar la entrada y salida del agua. También se colocaron compuertas en la confluencia de los drenes Itzícuaros y Barajas al río Grande, esto es para impedir la entrada de agua del río Grande a los drenes.

Se instalo un equipo de bombeo de 0.5 HP en la parte donde se une el dren Itzícuaros al río Grande y otro equipo de bombeo de 0.5 HP donde se une el dren Barajas al río Grande. Estos equipos de bombeo van a representar los cárcamos de bombeo localizados en estas partes.



En la figura se observa la colocación de la compuerta, así como el equipo de bombeo y todo su dispositivo que modela el cárcamo de bombeo.

Figura 5.13: Compuerta y equipo de bombeo.



Un tubo de PVC de 1 ½ " es instalado para alimentar al río Grande y el dren Itzícuaros, se coloco una válvula en los dos tanques de descarga.

Adicionalmente se instalaron letreros en tovicel blanco de 3mm, con medidas de 25x20 cm., rotulados con vinil depilado negro para indicar los nombres de río, drenes y lagunas.

Finalmente un tubo redondo de 1 ¼ ", de 1 m de largo con calcomanía impresa graduada en centímetros se coloco en un costado del tanque de descarga, con el objetivo de poder medir de forma exacta la altura del agua sobre el vertedor y poder tener controlado el gasto que está vertiendo.



En la figura se observa en forma general toda la colocación de compuertas, letreros, válvulas y equipos de bombeo.

Figura 5.14: Instalación completa de toda la instrumentación y equipo.



CAPITULO 6

PRUEBAS REALIZADAS

A continuación se presenta una descripción de las pruebas realizadas y de los resultados obtenidos en el modelo físico, estas pruebas se hicieron con diferentes gastos asociados a diferentes periodos de retorno, esto con el propósito de conocer la capacidad máxima de operación de todas las estructuras de regulación propuestas.

6.1.- LAGUNA DE REGULACIÓN DREN LOS ITZÍCUAROS

La laguna de regulación del dren Los Itzícuaros está localizada en la margen izquierda del dren Los Itzícuaros aguas arriba de la confluencia con el río Grande.

Tiene como objetivo regular el gasto de aportación tanto de la cuenca propia como evitar el desbordamiento del río Grande ocasionando un remanso hacia las partes bajas de Los Itzícuaros.

La superficie propuesta para su construcción es de 135,000 m², para un volumen de regulación de 200,000 m³ para la cuenca propia que drena 276 km² (superficie urbanizada de la cuenca 12 km²), con un gasto máximo de 26 m³/s. En un periodo de retorno de 5 años, así mismo podrá cumplir con el control de salida una vez que sean controlados los niveles del río Grande.

El cárcamo de bombeo del dren Los Itzícuaros cuenta con 4 equipos de bombeo, cada uno de ellos tiene una potencia de 125 HP, con capacidad de bombeo de 1 m³/s. Este cárcamo tiene una capacidad máxima de desalojo de agua de 4 m³/s.

Las pruebas en el Dren Itzícuaros se plantean los escenarios más críticos que pueden presentarse en la temporada de lluvias, en todos estos escenarios se emplean los gastos máximos, siendo estos los que se presentaron en las inundaciones ocurridas el 16 de septiembre del 2003.



6.1.1.- ESCENARIOS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS

Escenario 1

El flujo del dren Itzícuaros conduce un gasto máximo de $26 \text{ m}^3/\text{s}$, sin ningún tipo de obstrucción, con la descarga libre al río Grande (el río Grande no lleva flujo de agua), no funcionan laguna de regulación.

El tirante de agua que alcanza el dren es de 1.319 m.



Figura 6.1: Dren Itzícuaros, escenario 1.

En la figura se observa, el tirante de agua no alcanza la superficie de los bordos del dren, evitando con esto las inundaciones. Pero este escenario es imposible que se presente, porque siempre se va a tener un tirante de agua en el río Grande, esto provoca un obstáculo en la descarga, creando remansos aguas arriba, el nivel del agua se eleva y se generan los desbordes.

Escenario 2

El dren Itzícuaros conduce el gasto máximo de $26 \text{ m}^3/\text{s}$, ningún equipo del cárcamo de bombeo funciona, la compuerta de la laguna de regulación está abierta.

El tiempo que se puede controlar el flujo sin que se desborde el dren y almacenando toda el agua en la laguna de regulación es de 77.95 minutos.



Figura 6.2: Dren Itzícuaros, escenario 2.

En la figura se observa, con ayuda de la laguna de regulación se puede mantener controlado el tirante de agua de este dren, toda el agua que está entrando en la laguna se almacenara momentáneamente, después de algunas horas esta agua se desaloja.

Escenario 3

El dren Itzícuaros conduce un gasto máximo $26 \text{ m}^3/\text{s}$, el cárcamo de bombeo esta funcionando a su máxima capacidad, la laguna de regulación no están funcionando.

El tiempo que tarda en desbordar el dren es de 41.58 minutos.

Este fenómeno ocurre en cada periodo de lluvias, esta forma de regular el flujo en los drenes y cárcamos de bombeo es la que usan hasta el día de hoy.



En esta figura se observa lo que sucede cuando se presentan precipitaciones mayores a 75 mm, el cárcamo de bombeo es insuficiente para desalojar el agua, las compuertas se mantienen cerradas para evitar que las aguas del río Grande se introduzcan al dren. Esto produce que el agua se almacene e incremente sus niveles ocasionando graves inundaciones en las zonas aledañas.

Figura 6.3: Dren Itzícuaros, escenario 3.

6.1.2.- ESCENARIO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS

Se modelara un gasto máximo de 45 m³/s. Y un volumen de regulación de 889,400 m³ que corresponden a un periodo de retorno de 50 años.

Escenario 4

El flujo del dren Itzícuaros conduce un gasto máximo de 45 m³/s, sin ningún tipo de obstrucción, con la descarga libre al río Grande (el río Grande no lleva flujo de agua), no funcionan laguna de regulación.

El tirante de agua que alcanza el dren es de 1.742 m.

Escenario 5

El dren Itzícuaros conduce el gasto máximo de 45 m³/s, ningún equipo del cárcamo de bombeo funciona, la compuerta de la laguna de regulación está abierta.



El tiempo que se puede controlar el flujo sin que se desborde el dren y almacenando toda el agua en la laguna de regulación es de 30.09 minutos.

NOTA: el río comenzó a desbordarse cuando habían transcurrido 22 minutos sin estar completamente llena la laguna de regulación, esto es ocasionado porque la estructura de entrada de la laguna es muy pequeña en comparación al gasto manejado.

Escenario 6

El dren Itzícuaros conduce un gasto máximo 45 m³/s, el cárcamo de bombeo esta funcionando a su máxima capacidad, la laguna de regulación no están funcionando.

El tiempo que tarda en desbordar el dren es de 20.66 minutos.

6.2.- LAGUNA DE REGULACIÓN UNIDAD DEPORTIVA CUAUHTÉMOC

La laguna de regulación del dren Barajas está localizada en la Unidad Deportiva Cuauhtémoc.

Tiene como objetivo regular el gasto de aportación tanto de la cuenca propia como evitar el desbordamiento del río Grande ocasionando un remanso hacia las partes bajas.

La superficie propuesta para su construcción es de 367,370 m², para un volumen de regulación de 500,000 m³ para la cuenca propia que drena 22.4 km² (superficie urbanizada de la cuenca 4 km²), con un gasto máximo de 44 m³/s. En un periodo de retorno de 5 años, así mismo podrá cumplir con el control de salida una vez que sean controlados los niveles del río Grande.

El cárcamo de bombeo del dren Barajas tiene 3 equipos de bombeo, cada uno de ellos tiene una potencia de 125 HP, capacidad de bombeo de 1 m³/s. Este cárcamo tiene una capacidad máxima de desalojo de agua de 3 m³/s.

Las pruebas en el Dren Barajas se plantean los escenarios más críticos que pueden presentarse en la temporada de lluvias, en todos estos escenarios se emplean los gastos máximos, siendo estos los que se presentaron en las inundaciones ocurridas el 16 de septiembre del 2003.



6.2.1.- ESCENARIOS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 5 AÑOS

Escenario 1

El flujo del dren Barajas conduce un gasto máximo de $44 \text{ m}^3/\text{s}$, sin ningún tipo de obstrucción, con la descarga libre al río Grande (el río Grande no lleva flujo de agua), sin que funcionen laguna de regulación.

El tirante de agua que tiene es de 2.322 m.



Figura 6.4: Dren Barajas, escenario 1.

En la figura se observa, el tirante de agua no alcanza la superficie de los bordos del dren evitando con esto las inundaciones. Pero este escenario es imposible que se presente, ya que siempre se va a tener un tirante de agua en el río Grande, esto provoca un obstáculo en la descarga, creando remansos aguas arriba, el nivel del agua se eleva y se generan los desbordes.

Escenario 2

El dren Barajas conduce el gasto máximo de $44 \text{ m}^3/\text{s}$, ningún equipo del cárcamo de bombeo funciona, la compuerta de la laguna de regulación está abierta.

El tiempo que se puede controlar el flujo sin que se desborde el dren y almacenando toda el agua en la laguna de regulación es de 230.61 minutos.



NOTA: tienen que estar las dos compuertas abiertas de las lagunas (la de entrada y salida) para que tengan la capacidad de drenar todo el gasto.



En la imagen se observa, con ayuda de la laguna de regulación se puede mantener controlado el tirante de agua de este dren, toda el agua que está entrando en la laguna se almacenara momentáneamente, después de algunas horas esta agua se desaloja.

Figura 6.5: Dren Barajas, escenario 2.

Escenario 3

El dren Barajas conduce un gasto máximo $44 \text{ m}^3/\text{s}$, el cárcamo de bombeo esta funcionando a su máxima capacidad, la laguna de regulación no están funcionando.

El tiempo que tarda en desbordar el dren es de 57.67 minutos.



Figura 6.6: Dren Barajas, escenario 3.

En esta imagen se observa lo que sucede cuando se presentan precipitaciones mayores a 75 mm, el cárcamo de bombeo es insuficiente para desalojar el agua, las compuertas se mantienen cerradas para evitar que las aguas del río Grande se introduzcan al dren. Esto produce que el agua se almacene e incremente sus niveles ocasionando graves inundaciones en las zonas aledañas.

6.2.2.- ESCENARIOS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS

Escenario 4

El flujo del dren Barajas conduce un gasto máximo de $65 \text{ m}^3/\text{s}$, sin ningún tipo de obstrucción, con la descarga libre al río Grande (el río Grande no lleva flujo de agua), sin que funcionen laguna de regulación.

El tirante de agua que tiene es de 3.167 m.

Escenario 5

El dren Barajas conduce el gasto máximo de $65 \text{ m}^3/\text{s}$, ningún equipo del cárcamo de bombeo funciona, la compuerta de la laguna de regulación está abierta.

El tiempo que se puede controlar el flujo sin que se desborde el dren y almacenando toda el agua en la laguna de regulación es de 132.54 minutos.



Escenario 6

El dren Barajas conduce un gasto máximo 65 m³/s, el cárcamo de bombeo esta funcionando a su máxima capacidad, la laguna de regulación no están funcionando.

El tiempo que tarda en desbordar el dren es de 19.99 minutos.

6.3.- RÍO GRANDE

Escenario 1

En este escenario se plantea que la presa de regulación Cointzio descarga a través de su obra de toma y las compuertas un gasto de 20 m³/s, y cada una de las cuencas aporta su gasto pico el cual fue calculado por escurrimiento directo pero restándole el gasto almacenado en cada uno de los tramos donde se sitúan las lagunas de almacenamiento.

El aporte del dren Barajas al río Grande es de 0.0 m³/s y del Dren Los Itzícuaros es de 0.0 m³/s.

Numero	Altura del tirante de agua (m)
1	1.583
2	2.269
3	1.636
4	1.953

Cuadro 6.1: Alturas de tirantes, escenario 1.

Las alturas de tirante de agua se determinaron en los tramos centrales de cambio de sección del río Grande como se muestra en la figura 6.7. Siendo estos puntos los más críticos para desbordamientos.

El bordo del río Grande con la altura de 4.86 m, es el que registra menor altura y está localizado en el tramo de sección numero 2.

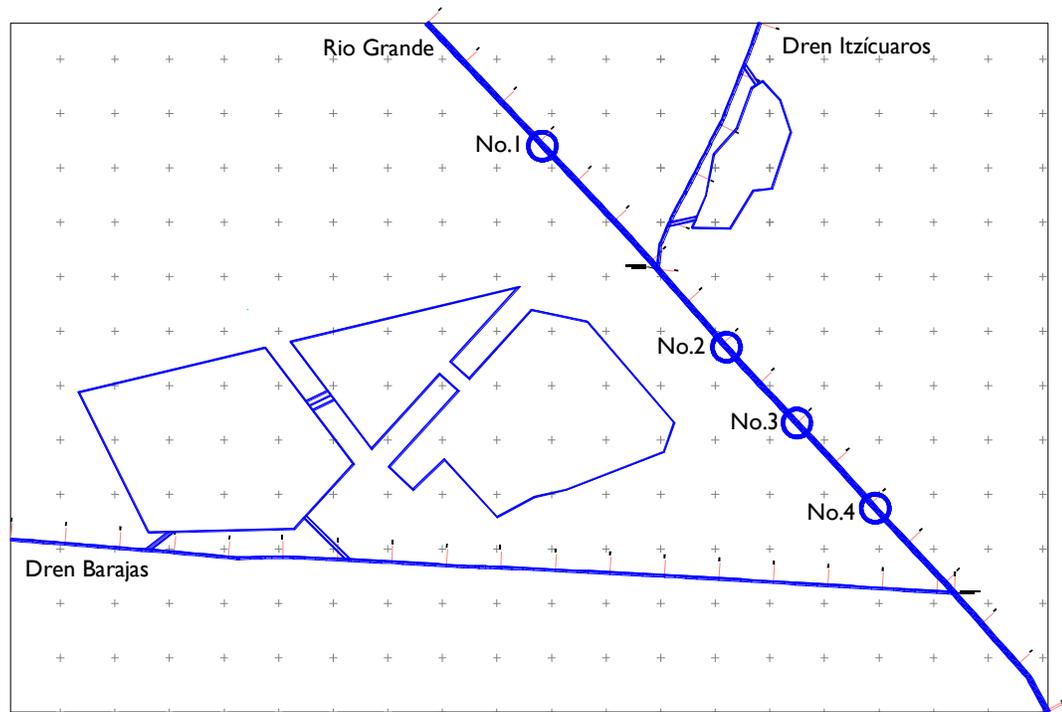


Figura 6.7: Localización de puntos críticos en el río Grande.

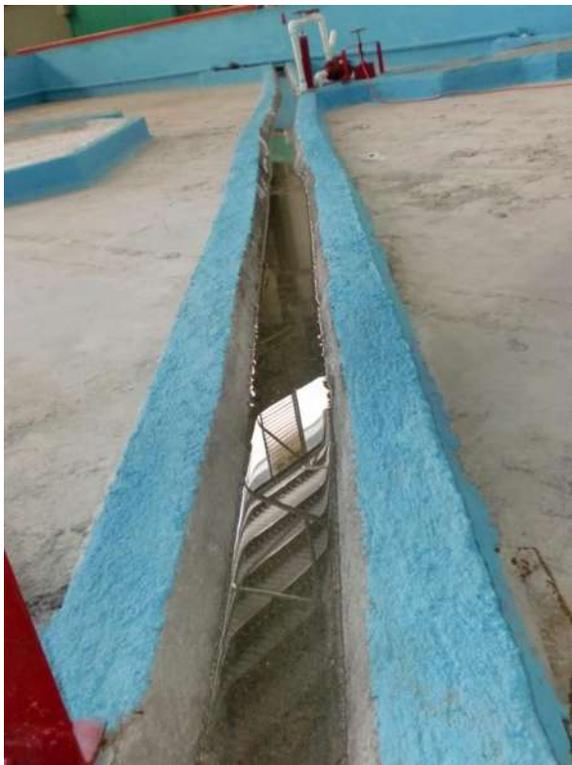


Figura 6.8: Río Grande, escenario 1.

En la figura se observa la elevación del tirante de agua dentro del río, en este caso los cárcamos de bombeo el Itzicuaros y Barajas no están funcionando, toda el agua procedente de estos drenes se está almacenando en las lagunas de regulación, ocasionando que los niveles del río Grande se mantengas bajo mientras transcurre la avenida máxima.



Escenario 2

En este escenario se plantea que la presa de regulación Cointzio descarga a través de su obra de toma y las compuertas un gasto de $7 \text{ m}^3/\text{s}$, y cada una de las cuencas aporta su gasto pico el cual fue calculado por escurrimiento directo pero restándole el gasto almacenado en cada uno de los tramos donde se sitúan las lagunas de almacenamiento.

El aporte del dren Barajas al río Grande es de $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ y del Dren Los Itzícuaros es de $0.00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Numero	Altura del tirante de agua (m)
1	0.844
2	1.267
3	0.739
4	1.108

Cuadro 6.2: Alturas de tirantes, escenario 2.



Figura 6.9: Río Grande, escenario 2.

En esta figura se muestra que los niveles del tirante de agua del río Grande se mantienen bajos por la implementación de las lagunas de regulación en los drenes Itzícuaros y Barajas.

Los escenarios 1 y 2 correspondientes al río Grande, son los más viables ya que con estos se evitan desbordamientos en los cauces tanto del río Grande como de los drenes que aportan al mismo.



Es ampliamente recomendable la construcción de lagunas de regulación ya que estas nos permiten bajar los gastos picos escurridos en el sistema río Grande - río Chiquito.

Escenario 3

En este escenario se plantea que la presa de regulación Cointzio descarga a través de su obra de toma y las compuertas un gasto de 20 m³/s, y cada una de las cuencas aporta su gasto pico el cual fue calculado por escurrimiento directo. Los cárcamos de bombeo Itzícuaros y Barajas operan a su máxima capacidad.

El aporte del dren Barajas al río Grande es de tan solo 3 m³/s y del Dren Los Itzícuaros es de 4 m³/s.

Numero	Altura del tirante de agua (m)
1	3.431
2	4.433
3	3.747
4	4.011

Cuadro 6.3: Alturas de tirantes, escenario 3.



Figura 6.10: Río Grande, escenario 3.

Al estar funcionando los cárcamos de bombeo de los drenes Itzícuaros y Barajas se incrementa de manera notable los niveles del tirante de agua en el río Grande.



Escenario 4

En este escenario se plantea que la presa de regulación Cointzio descarga a través de su obra de toma y las compuertas un gasto de $7 \text{ m}^3/\text{s}$, y cada una de las cuencas aporta su gasto pico el cual fue calculado por escurrimiento directo. Los cárcamos de bombeo Itzícuaros y Barajas operan a su máxima capacidad.

El aporte del dren Barajas al río Grande es de tan solo $3 \text{ m}^3/\text{s}$ y del Dren Los Itzícuaros es de $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Numero	Altura del tirante de agua (m)
1	2.423
2	3.589
3	2.850
4	3.114

Cuadro 6.4: Alturas de tirantes, escenario 4.



En esta figura se observa la manera de operar esta área del sistema fluvial de la ciudad de Morelia, los cárcamos de bombeo trabajando a su máxima capacidad, los niveles de agua del río grande se incrementan hasta el punto del desbordamiento y esto evita que todas las descargas de alcantarillas que están conectadas la río Grande no puedan descargar libremente, provocando tapones hidráulicos, inundando calles y viviendas aledañas al cauce.

Figura 6.11: Río Grande, escenario 4.



Las escenarios más críticos que se pueden presentar en el río Grande, son cuando la presa de regulación Cointzio descarga a través de sus compuertas gastos que van desde los 7 hasta los 20 m³/s y estén funcionando los cárcamos de bombeo de los diferentes drenes a su máxima capacidad, esto sin duda provocara severas inundaciones en las zonas aledañas a estos cauces.

Pero con la construcción de lagunas de regulación en los drenes Itzícuaros y Barajas, se disminuyen 7 m³/s, al disminuir este gasto en el río Grande, provoca que disminuyan los tirantes de agua, evitando desbordamientos e inundaciones.



CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.- CONCLUSIONES

Los modelos de instalaciones hidráulicas a escala reducida tienen una larga y distinguida trayectoria, y siguen representando el método más seguro, eficaz y económico de analizar los más complicados problemas hidráulicos. Para nuestro caso el “Modelo físico para el estudio de alternativas de solución para el control de inundaciones”, se pueden modelar diferentes escenarios que permitan disminuir los niveles de agua en el río Grande, esto aparte de evitar desbordamientos del río, se disminuyen problemas de inundación en todo el perímetro inundable, permitiendo la descarga libre de todas las alcantarillas (pluviales y sanitarias) que existen en el trayecto del río.

Una de las grandes ventajas de utilizar modelos físicos es poder visualizar tridimensionalmente los fenómenos que ocurren en la naturaleza, dando con ello soluciones tangibles y un entendimiento práctico de estos fenómenos.

En las pruebas que se realizaron utilizando gastos asociados a un periodo de retorno de 5 años, los resultados muestran, que la construcción de las lagunas de regulación en los drenes Itzícuaros y Barajas son muy necesarias para prevenir inundaciones, por lo menos en la zona suroeste de la ciudad de Morelia. La función de estas lagunas es almacenar toda el agua generada por una tormenta, después que los niveles del río Grande disminuyan, esta agua almacenada será desalojada hacia el río.

Las pruebas realizadas utilizando gastos asociados a un periodo de retorno de 50 años, muestran que las estructuras de regulación para el dren los Itzícuaros son insuficientes para evitar las inundaciones, el tiempo que puede controlar el flujo es muy pequeño.

De igual manera en el dren Barajas se puede mantener un control de flujo de agua de mayor tiempo que los Itzícuaros, pero estas lagunas no fueron diseñadas para almacenar el volumen de agua asociadas a este periodo de retorno, por tanto después



que transcurra el tiempo de almacenamiento de agua, estos drenes se desbordaran, porque es demasiado volumen para regular.

7.2.- RECOMENDACIONES

La laguna de regulación del dren los Itzícuaros es insuficiente para almacenar el agua producto de una tormenta asociada a un periodo de retorno de 5 años, solo pude controlar el flujo aproximadamente 77 minutos, para este caso se necesita que tenga capacidad de regular el flujo 130 minutos, por tanto el tamaño de esta laguna se tiene que incrementar para proporcionale más capacidad, actualmente hay espacio disponible para hacerlo.

La laguna de regulación del dren Barajas, tiene la capacidad de almacenar el gasto de agua producto de una tormenta asociada a un periodo de retorno de 5 años, pero la estructura que tiene de entrada del dren hacia la laguna es insuficiente para transportar esta cantidad de agua, por tal motivo se recomienda colocar una estructura de entrada más para no tener problemas.

El río Grande llega alcanzar una altura máxima en la condición mas critica de 4.43 metros, esta altura es todavía inferior a la del bordo más bajo de 4.86 metros, estas pruebas que se realizaron no toman en cuenta las aportaciones de las descargas del drenaje y alcantarillado pluvial en todo este tramo, por tal motivo pueden provocarse desbordamientos, pero con la implementación de las lagunas nos podemos olvidar de este problema.

Por otro lado es recomendable la realización del modelo físico de todo el sistema fluvial de la ciudad, en el que se puedan estudiar distintos escenarios y obras de protección y control.



Bibliografía

Gilberto Sotelo Avila.- Hidráulica Fundamental, editorial Limusa.

Gilberto Sotelo Avila.- Hidráulica de Canales, editorial Limusa.

Francisco Javier Aparicio Mijares.-Hidrología Superficial, editorial Limusa

ERIC.-Extractor de datos meteorológicos.- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Eduardo Martínez Marín.-Hidráulica Fluvial, editorial Bellisco.

Marta González del Tánago, Diego García de Jalón.-Restauración de Ríos, Ministerio de Medio Ambiente, España.

Diez Herrero, L. Lain Huerta y M. Llorente Isidro.-Mapas de Peligrosidad por Avenidas e Inundaciones, Ministerio de Educación y Ciencia, España.

Fernando Ojeda Torres.-Introducción a los Modelos Hidráulicos, Series del Departamento de Hidráulica No. 1.

Miguel A. Vergara S.- Técnicas de Modelación en Hidráulica, editorial Alfaomega.

Néstor Corona Morales.-Vulnerabilidad de la Ciudad de Morelia a Inundaciones, Tesis de Maestría en Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

ESTUDIO DEL MANEJO DE AGUAS PLUVIALES EN LA ZONA METROPOLITANA DE MORELIA (ZMM), ESTADO DE MICHOACA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2004.

Información topográfica (planta y secciones transversales) del rio Grande. Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Ciudad de Morelia (OOAPAS).

Arreygue-Rocha E., *et al.*, 2004a, Eventos excepcionales e inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán: Ciencia Nicolaita, Morelia, [s.n.], 12-15.

Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Morelia (PDUCPM), 2010.