



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

**APLICACIÓN DE UN MODELO ACOPLADO FLUJO-DRENAJE EN LA CUENCA
URBANA DEL RÍO HONDO**

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

PRESENTA:
FRANCISCO JAVIER CASTILLO GUERRERO

TUTOR PRINCIPAL
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INST. DE INGENIERÍA DE LA UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INST. DE INGENIERÍA DE LA UNAM
DR. OSCAR POZOS ESTRADA, INST. DE INGENIERÍA DE LA UNAM
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, INST. DE INGENIERÍA DE LA UNAM
DR. JOSÉ AGUSTÍN BREÑA NARANJO, INST. DE INGENIERÍA DE LA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES

Secretario: DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

Vocal: DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

1^{er.} Suplente: DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

2^{do.} Suplente: DR. JOSÉ AGUSTÍN BREÑA NARANJO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM,
CIUDAD DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

FIRMA

*"La vida no se trata de sobrevivir
a una tempestad, se trata de bailar
bajo la lluvia"*
DESCONOCIDO

Agradecimientos

Doy gracias principalmente a mi madre por todo su apoyo que me ha dado, por estar conmigo en los momentos bueno, malos y en los difíciles, gracias por todo su esfuerzo y paciencia para que yo pueda lograr mis metas y convertirme en el hombre que soy.

Gracias a mi padre, aunque falleció al inicio de mis estudios profesionales, siempre está presente y sus enseñanzas me han ayudado a enfrentar la vida y seguir adelante. No hay forma de decir lo agradecido y orgulloso que estoy de mis padres porque sin ellos no estaría aquí y no sería lo que soy hoy.

A mi hermana Melina, por su incondicional apoyo que me ha dado y apoyándonos hemos salido adelante. A mi amiga, compañera y novia Arely juntos empezamos este viaje, gracias por creer en mí y motivarme a seguir adelante y estar a mi lado. A mis familiares y amigos por apoyarme y extender su mano cuando los necesité.

Mis agradecimientos al Dr. Adrián Pedrozo Acuña por la dedicación y apoyo brindado a este trabajo y aceptarme en su equipo de trabajo, así mismo al Dr. Laurent Guillaume Courty por su ayuda y asesoramiento.

A mi comité tutorial el Dr. José Agustín Breña, Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, Dr. Oscar Pozos Estrada y el Dr. Óscar Fuentes Mariles por su ayuda y consejo para desarrollar éste trabajo.

Agradezco a la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas y darme la oportunidad de desarrollarme académicamente, y vivir todas las experiencias que ofrece esta gran institución. Al Instituto de Ingeniería lugar donde desarrolle mi trabajo de investigación y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado. Al proyecto Agua Inteligente, Ciudad Inteligente financiado por la Secretaría de Ciencia Tecnología e Innovación de la Ciudad de México SECITI/113/2017.

Muchas Gracias a todos.

Índice general

I	Primera parte	1
1.	Introducción	2
1.1.	Problemática	3
1.2.	Justificación	4
1.3.	Objetivo	4
2.	Estado del Arte	6
3.	Programas	10
II	Segunda Parte	13
4.	Modelo ITZĪ	14
5.	Modelo SWMM (Storm Water Management Model)	17
6.	Modelo Acoplado Flujo-Drenaje	20

6.1. Intercambio de masa	21
6.2. Acople del modelo	24
III Tercera Parte	25
7. Aplicación del modelo a un caso real	26
7.1. Metodología	26
7.2. Caso de estudio	27
7.3. Zona de estudio	27
7.4. Sitio de interés	29
7.5. Información de entrada para el modelo	29
7.6. Simulación	38
7.7. Resultados	42
7.8. Conclusiones	49
Bibliografía	51

Índice de cuadros

7-1. Valor de RSR en la comparación de SACMEX-GPM.	34
7-2. Altura del agua (m), en el jardín de acuerdo al coeficiente de fricción y el % de sedimentos.	43
7-3. Parámetros constantes en las simulaciones.	44
7-4. Niveles del agua (m).	44
7-5. Niveles del agua (m) (tapón y tubería al 50 % de su capacidad).	47
7-6. Tiempo de simulación (Número de nodos de la red 34, número de celdas modelo superficial 617701 de 5x5 m, maquina con sistema Ubuntu 18.04.1 LTS 16 Gb de memoria RAM Procesador Intel Core i7-4770 CPU@3.40Ghzx8).	51

Índice de figuras

3-1. Imágenes procesadas en GRASS.	11
4-1. Malla y variables usadas en la resolución numérica	15
5-1. Reservorio idealizado en SWMM.	18
6-1. Criterio para ecuaciones de vertedor	23
6-2. Criterio para ecuaciones de vertedor sumergido y orificio	23
7-1. Inundación Interlomas.	27
7-2. Localización de la cuenca de estudio	28
7-3. Red de drenaje	29
7-4. Sitio de interés	30
7-5. (a) Imagen satelital (Copernicus Sentinel 2017), (b) Modelo digital de elevaciones (INEGI 2017).	30
7-6. Comparación de precipitación	32
7-7. Mapa de estaciones Pluviométricas	33

7-8. Localización de la red de drenaje	34
7-9. Visita al sitio.	35
7-10. Características de la red de drenaje	36
7-11. Nivel aproximado del agua.	37
7-12. Red de drenaje en SWMM	37
7-13. Alcance del agua en el jardín	38
7-14. (13 y 12) Unión entre el cauce y el drenaje (Imagen adaptada de Google Earth).	39
7-15. Croquis de la unión física entre el drenaje y el cauce.	39
7-16. Croquis de la unión propuesta en el modelo SWMM.	40
7-17. Archivo de configuración Itzi	42
7-18. Niveles en el jardín $n = 0.019$	43
7-19. Comparación de gastos de entrada entre SWMM e Itzi (nodo 15)	45
7-20. Niveles obtenidos con el modelo acoplado.	46
7-21. Tapón generado por la basura	47
7-22. Niveles obtenidos con el modelo acoplado (Tapón en las entradas de la red y tuberías al 50 % de su capacidad.	48
7-23. Intercambio de flujos entre el superficial y el drenaje.	50

Prólogo

La motivación que llevó a este trabajo, es la necesidad de conocer el comportamiento del flujo superficial con la red de drenaje. El diseño de las redes de drenaje siempre se ha realizado con base en desalojar todo el flujo de una zona, a un punto de salida en el cual no ocasione daños, pero a lo largo de la historia hemos visto como la ciudad de México se ha visto afectada por las inundaciones debido a las fallas o insuficiencias de la red de drenaje.

En la CDMX y la zona conurbada he visto como año con año en época de lluvias, la ciudad se ve colapsada cuando la red de drenaje no es capaz de desalojar el flujo ocasionado por las precipitaciones, esto provoca un gran congestionamiento vial, pérdidas económicas y algunas veces pérdida de vidas humanas.

La implementación de un modelo que sea capaz de reproducir la interacción de los flujos superficiales con las redes de drenaje es necesario para la evaluación de las redes de drenaje y así proponer una operación eficaz de manera que los flujos en la red no desborden y ocasionen daños.

“Aplicación de un modelo acoplado flujo-drenaje en la cuenca urbana del río Hondo”

by

Francisco Javier Castillo Guerrero

Abstract

In urban areas, coupled models (surface flow-drainage) have become important because there is a need to know the response of the drainage system to the events of heavy precipitation and surface runoff. The present research introduces the application of a coupled flood model that simulates the interaction between surface flows and the drainage system in an urban basin of the Valley of Mexico. This tool is made up of two models; Itzi a quasi-two-dimensional hydrological and hydraulic model developed at the Institute of Engineering (UNAM), integrated with the flow solution in the drainage by means of the 1D solution of the SWMM model (Storm Water Management Model), developed by the protection agency environmental of the United States. Itzi integrates SWMM with a partial surface inertia model. The interactions of the drainage network and the surface flow are carried out in the nodes that represent the drainage network, with orifice and weir equations, according to the level heights of the water at every step of time. The coupled model was used for the reproduction of the levels reached by the water during the event that occurred on July 18, 2016 in Interlomas, Huixquilucan, State of Mexico. The simulations show that the model has the ability to reproduce the interaction of drainage with surface flows. The topography of the site was entered into the numerical model by means of a Digital Elevation Model (DEM) based on laser beam altimetry, which provides sufficient quality information for the calculation of flows in urban areas. Notably, the model used is available openly and free to the public, which makes it a very useful tool for the development of urban hydraulic problems in Mexico.

“Aplicación de un modelo acoplado flujo-drenaje en la cuenca urbana del río Hondo”

por

Francisco Javier Castillo Guerrero

Resumen

En zonas urbanas, los modelos acoplados (flujo–drenaje) han tomado importancia debido a que existe la necesidad de conocer la respuesta del sistema de drenaje ante los eventos de precipitación intensa y los escurrimientos superficiales. La presente investigación introduce la aplicación de un modelo de inundación acoplado que simula la interacción entre los flujos superficiales y el sistema de drenaje en una cuenca urbana del Valle de México. Esta herramienta está constituida por dos modelos; Itzi un modelo hidrológico e hidráulico cuasi-bidimensional desarrollado en el Instituto de Ingeniería (UNAM), integrado con la solución del flujo en el drenaje por medio de la solución 1D del modelo SWMM (Storm Water Management Model), desarrollado por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos. Itzi integra a SWMM con un modelo de inercia parcial de superficie, la interacción de la red de drenaje y el flujo de superficie se realizan en los nodos que representan la red de drenaje, con ecuaciones de orificio y vertedor, según las alturas del nivel del agua a cada paso de tiempo. Se utilizó el modelo acoplado para la reproducción de los niveles que alcanzó el agua durante el evento ocurrido el 18 de Julio del año 2016 en Interlomas, Huixquilucan, Estado de México. Las simulaciones demuestran que el modelo tiene la capacidad de reproducir la interacción del drenaje con los flujos superficiales. La topografía del lugar fue ingresada al modelo numérico por medio de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con base en altimetría por rayo láser, lo que provee con información de calidad suficiente para el cálculo de flujos en zonas urbanas. De forma notable, el modelo utilizado está disponible de forma abierta y gratuita al público, lo cual lo convierte en una herramienta muy útil para el desarrollo de problemas de hidráulica urbana en México.

Parte I

Primera parte

Capítulo 1

Introducción

De acuerdo con Eckstein *et al.* (2018), entre los años 1997 y 2016, más de 524,000 personas en todo el mundo murieron a causa de los fenómenos meteorológicos extremos, estos fenómenos ocasionaron una pérdida de \$ 3.16 mil millones de dólares en paridad de poder adquisitivo (PPA). Las inundaciones son el fenómeno natural que cada año afecta a más personas y que ocasiona más pérdidas a nivel mundial, 2.3 mil millones de personas fueron afectadas y el impacto económico que ocasionaron asciende a un trillón de dólares entre los años 1995 y 2015. En México se pierden 230 mdd por inundaciones cada año y 22 millones de personas están expuestas a inundaciones (Forbes México, 2017).

En todo el mundo las áreas urbanas han sido afectadas por los crecientes impactos de las inundaciones, los efectos en estas áreas son más graves y costosas, los asentamientos urbanos contienen la mayor parte de los activos económicos y sociales del país, lo cual se traduce en daños que van más allá de los niveles del agua y en consecuencias más severas para la sociedad (Jha y Bloch, 2011).

Las ciudades al pasar de los años se han convertido en una forma de tener una mejor calidad de vida y mejores posibilidades de desarrollo, ya que en ellas se encuentran recursos económicos, oportunidades de trabajo, estudio y oferta de bienes y servicios (Jiménez Cisneros, 2014). Se estima que para el periodo 2017-2050 la población llegue de los 7 000 millones de habitantes

a entre 9 400 a 10 200 millones de habitantes de los cuales dos terceras partes de la población vivirán en las ciudades (Koncagül *et al.*, 2018).

En los últimos años las inundaciones en zonas urbanas han aumentado, principalmente por la reducción de áreas permeables, la reducción de estas áreas en zonas urbanas, reduce los procesos de infiltración del flujo subterráneo, disminuye la evapotranspiración por pérdida de la vegetación natural, provocando un aumento en el flujo de la escorrentía superficial, el cual recae en los sistemas de drenaje (Boletín UNAM-DGCS-577, 2017), conduciendo a un aumento en la probabilidad de sobrecarga de las redes de drenaje.

Dentro de este contexto las inundaciones urbanas se están volviendo más peligrosas y más costosas por el tamaño de la población expuesta y los sectores a los cuales afecta (Jha y Bloch, 2011).

1.1. Problemática

La necesidad de la gente por tener una mejor calidad de vida, estabilidad económica, seguridad, oportunidades de trabajo, estudio y mejores posibilidades de desarrollo hacen que en los centros urbanos se concentre la población, donde existe un nivel de vida más moderno, exigiendo una demanda de vivienda y de infraestructura para satisfacer sus necesidades. Sin embargo, la creación de la infraestructura y vivienda necesaria para la población genera una urbanización con un proceso acelerado que no cuenta con una planificación adecuada, provocando un cambio inadecuado en el uso de suelo, con ello surgen asentamientos irregulares en áreas inundables, aumento de la pavimentación y pérdidas de zonas permeables, esto incrementa el flujo superficial que va al sistema de drenaje. Si la infraestructura del drenaje es antigua o con un mantenimiento inadecuado se intensificará el número e impactos de las inundaciones.

Por otro lado, el cambio climático ya es un reto que tiene impactos en los riesgos de inundación, los cambios en los patrones meteorológicos, los patrones de lluvia locales y el cambio en la frecuencia y duración de los episodios de precipitación tienen el potencial de provocar inundaciones con más impactos dentro de las zonas urbanas (Jha y Bloch, 2011). Un reto presente

en las ciudades y en especial la Ciudad de México es que cada día es más complejo y costoso proveer servicios (Jiménez Cisneros, 2014).

Por otro lado, el hecho de satisfacer a las ciudades de grandes cantidades de agua para la demanda de la población, hace necesario manejar grandes volúmenes de agua contaminada (UN-Habitat, 2011).

1.2. Justificación

La interacción que tiene el flujo superficial con el drenaje puede cambiar el alcance de una inundación, debido a las características de la red (diámetros, geometría, operación, etc.), subestimando o sobrestimando el volumen que puede transportar la red de drenaje. Así mismo la probabilidad de sobrecarga de las redes de drenaje por la precipitación y el aumento del escurrimiento, ocasionan que la red sea incapaz de desalojar el volumen de agua, incrementando el riesgo de colapso y ruptura de elementos estructurales de la red de drenaje. Por lo cual se presenta la utilización de una herramienta capaz de modelar la interacción de la red con el flujo superficial, y así reproducir un evento en el cual se presentó la sobrecarga de la red ocasionando una inundación.

1.3. Objetivo

El objetivo de esta tesis es modelar el evento ocurrido el 18 de Julio del año 2016 en Interlomas, Huixquilucan, Estado de México, a través de la reproducción de los niveles que alcanzó el agua como resultado de la lluvia mediante el modelo acoplado y determinar si la utilización de este modelo puede simular situaciones reales.

1.3.1. Metas

1. Generar los niveles de alcance del agua en la zona de estudio.

2. Lograr una calibración adecuada del modelo.
3. Mostrar la utilización de estos modelos para que en un futuro se puedan usar para diseño, operación y evaluación de las redes de drenaje.

Capítulo 2

Estado del Arte

En la literatura se hace referencia a la importancia de un modelo acoplado 1D-2D por la necesidad de conocer la interacción de la red de drenaje con los flujos de inundación, y evitar daños provocados por las inundaciones que ocasionan las fallas o sobrecargas de la red, en las zonas urbanas (Nanía *et al.*, 2014).

Para el análisis de los sistemas de drenajes se han usado los enfoques unidimensionales por más de 30 años, estos son utilizados para evaluar el rendimiento hidráulico de las redes de drenaje. Las ventajas que tienen estos modelos sobre otros enfoques, es que son relativamente fáciles de instalar, calibrar y explicar, la mayoría de estos modelos determinan la profundidad del nivel del agua en los pozos definidos como las entradas a la red, pero no pueden simular el movimiento del agua en la superficie del suelo, quedando el flujo solamente en la red. Existen diferentes programas que se han desarrollado para este análisis tales como MOUSE, InfoWorks-Cs y SWMM, debido a que SWMM es un programa gratuito es ampliamente utilizado (Chen *et al.*, 2007; Seyoum *et al.*, 2012).

Por otro lado, el flujo superficial está presente en diferentes problemas de ingeniería hidráulica, como canales, desarenadores, bocatomas, puentes, etc., o en flujos naturales como ríos o lagos por eso la necesidad de crear modelos para el estudio del flujo superficial, y que gracias al extraordinario incremento en las capacidades de cálculo de las computadoras, así como la mejora

en los algoritmos computacionales ha llevado a un importante desarrollo de modelos numéricos de simulación de flujo superficial (Alfredo *et al.*, 2003).

Existen tres modelos para el flujo superficial; el primero son los modelos unidimensionales (1D) en el cual se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal. Los segundos son los modelos bidimensionales (2D) los cuales consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Por último los modelos tridimensionales (3D) que representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto aplicables a cualquier caso práctico. Para flujos unidimensionales existe HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System), este “Sistema de Análisis de Ríos” es un modelo numérico para flujo unidimensional sin transporte de sedimentos y con capacidad para trabajar con flujos mixtos subcríticos y supercrítico (Alfredo *et al.*, 2003), para flujo bidimensional existe el programa Iber que consta de un módulo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces (y en consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de vías de intenso), este contiene módulos para la simulación de la turbulencia, transporte de sólidos por arrastre de fondo y en suspensión para la cuantificación de procesos de erosión y sedimentación (IBER, 2018), así como para flujos tridimensionales esta TELEMAC-3D escrito para resolver las ecuaciones de aguas someras en formato 3D contando igualmente con módulos para la simulación de la turbulencia, transporte de sólidos por arrastre de fondo y en suspensión para la cuantificación de procesos de erosión y sedimentación (TELEMAC-3D, 2018). La dinámica del movimiento puede llegar a ser muy compleja y en consecuencia, dependiendo del modelo a usar las simulaciones pueden tomar horas en tener resultados, por otro lado, ningún modelo interactúa con las redes de drenaje para saber el funcionamiento de éstas, y la interacción que existe entre ambos modelos. Existen más modelos numéricos que los mencionados en caso de los modelos 2D los existentes son LISFLOOD-FD, FloodMap, UIM los cuales son parecidos al modelo utilizado en este trabajo.

Varios estudios se han realizado para evaluar el potencial y limitaciones de los modelos 1D y

1D-2D. Estos estudios sugieren que los modelos de superficie 1D son alternativas económicas y fáciles de usar, siempre y cuando el agua permanezca en el perfil del drenaje. Sin embargo, durante la inundación la aproximación 1D puede ser insuficiente, y el uso de modelos 2D para describir los flujos de inundación se vuelve imprescindible (Seyoum *et al.*, 2012).

Diferentes autores han realizado desarrollos de modelos acoplados 1D-2D con dos objetivos en particular, el primero es la necesidad de evaluar de forma más adecuada la interacción flujo-drenaje para predecir posibles daños ocasionados por la inundación y para proporcionar a los tomadores de decisiones, la información necesaria para diseñar las medidas apropiadas. El segundo objetivo es el desarrollo de modelos de inundación 2D que sean capaces de proporcionar mejores predicciones de la magnitud de las inundaciones en relación con las ecuaciones de aguas someras (Seyoum *et al.*, 2012).

El modelo desarrollado por Chen *et al.*, 2007, presenta un acople numérico integrado para el estudio de la simulación de los procesos de escorrentía en las zonas urbanas, donde se aplican los modelos Sipsón, y UIM. Los modelos se ejecutan individualmente y se ligan mediante el intercambio de información obtenida en los puntos y tiempos indicados en el modelo, dependiendo de la altura del agua en los puntos establecidos como nodos de intercambio, se aplican las ecuaciones de orificio o vertedor. Se presentan dos casos, el primero es con el propósito de probar si el modelo describe eficazmente la interacción del flujo de drenaje y los movimientos de los flujos superficiales, mientras que el segundo analiza las consecuencias de un evento pluvial en la región Stockbridge en Keighley (Bradford, Reino Unido), (Chen *et al.*, 2007).

Por otro lado, Seyoum *et al.*, 2012 presentan un modelo que integra el programa SWMM5 y un modelo no inercial que ellos desarrollaron. El modelo acoplado fue probado en una cuenca a lo largo de la calle Sukhumvit en la parte interna de Bangkok, Tailandia. Los resultados del modelo acoplado confirmaron que tiene la capacidad de reproducir la compleja interacción entre el flujo de alcantarillado y el flujo superficial para hacer predicciones razonables del daño de la inundación probable en las zonas urbanas (Seyoum *et al.*, 2012), pero los autores no eliminan el tema de la sincronización de los tiempos.

Aunque en el modelo que se presenta en este trabajo, elimina el problema de los tiempos de

ejecución ya que la interacción de los modelos se da en el mismo paso de tiempo y estos se ejecutan dentro del mismo modelo, aún existen problemas en común entre los modelos, uno de ellos es la resolución de los Modelos Digitales de Elevación. Una baja resolución puede causar resultados poco realistas como las áreas que no son drenadas o la influencia de los edificios que no sean representados con precisión, mientras que la resolución demasiado detallado puede hacer la simulación inaceptablemente lenta (Chen *et al.*, 2007). Así mismo el modelado de la situación física de la red con la situación del modelo debe hacerse con mucho detalle y tratando de representar la realidad de la red ya que los modelos presentan una limitación y es que todas las entradas o salidas de la red se realizan mediante nodos que representan pozos y en la realidad las entradas al drenaje son variadas.

Capítulo 3

Programas

La utilización de programas denominados como Open Source (Código abierto) está creciendo debido a que representan una alternativa de desarrollo de software de bajo costo. El software de código abierto permite al usuario verlo y modificarlo con el fin de ajustar el código del software a las necesidades del usuario. Los programas que se utilizan son de código abierto y gratuitos lo que los hace accesibles para cualquiera persona interesada en ellos, estos son:

GRASS-GIS.

La definición de un GIS (Geographical Information System) es un conjunto de herramientas para almacenar y presentar datos espaciales del mundo que nos rodea (Green, 1988). GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) es un paquete de software de GIS (Geographical Information System) que se utiliza para la gestión y análisis de datos geoespaciales, procesamiento de imágenes, producción de gráficos y mapas, modelado espacial y visualización; el sistema puede soportar información ráster y vectorial (figura 3-1) (GRASS Development Team, 2017).

ITZI.

Es un modelo hidrológico e hidráulico el cual simula:

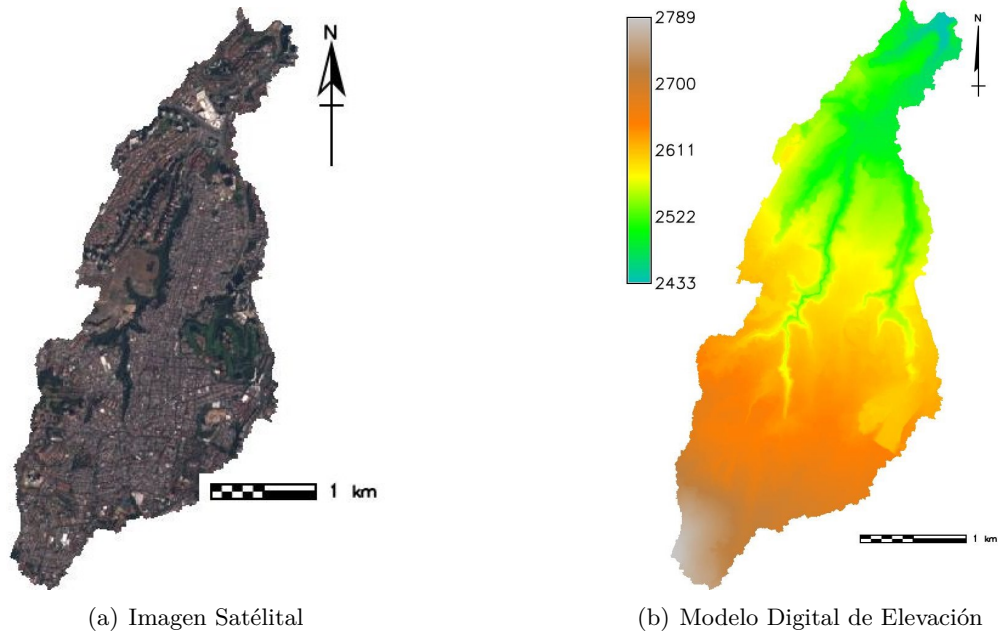


Figura 3-1: Imágenes procesadas en GRASS.

- Procesos hidrológicos como lluvia e infiltración.
- El flujo superficial 2D en una malla regula usando ecuaciones simplificadas de aguas poco profundas.
- Flujo en el drenaje 1D a través del modelo SWMM
- Acopla el modelo superficial 2D con el modelo de drenaje 1D con un modelo bidireccional.

ITZI utiliza la interfaz de GRASS ya que se basa en el código de éste lo que hace que el procesamiento de la información antes y después sea más fácil y simple (Courty *et al.*, 2017; Itzi 2018).

SWMM (Storm Water Management Model).

Modelo más utilizado para la planificación, el análisis y el diseño relacionado con los sistemas de drenaje urbano, en el cual se simula la escorrentía de aguas pluviales, alcantarillas combinadas, sanitaria y otros sistemas de drenaje en áreas urbanas, algunas de sus aplicaciones son:

- Diseño y dimensionamiento de los elementos de una red de drenaje

- El diseño de estructuras de retención y demás componentes empleados para el control de inundaciones y la protección de la calidad de las aguas
- Analizar la evolución de contaminantes en la red

SWMM es muy completo y tienen diversas aplicaciones, pero presenta algunas limitaciones que debemos tener en cuenta.

Parte II

Segunda Parte

Capítulo 4

Modelo ITZİ

El programa Itzi es un módulo del sistema de información geográfica (SIG) GRASS, está codificado en lenguaje de programación PYTHON y emplea las librerías del SIG, PyGRASS y TGRASS, la primera para acceder a las funciones espaciales y la segunda para utilizar el uso de datos dinámicos en el tiempo (Courty *et al.*, 2017).

El modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras de forma simplificada, a través del método de diferencias finitas (De Almeida y Bates, 2013). El cálculo es mediante ecuaciones cuasi-bidimensionales y resuelven el flujo en cada dimensión. La figura 4-1 presenta el diagrama con las variables utilizadas para la solución numérica, siendo y la elevación de la superficie del agua y d la profundidad del agua, las cuales se evalúan en el centro de las celdas, mientras que las variables del flujo de agua q (o celeridad u) se evalúan en los extremos de las celdas.

Cada paso de tiempo Δt se estima por medio de la ecuación 4-1, en donde h_{max} es la profundidad máxima de agua de todo el dominio, g es la aceleración de la gravedad y α el coeficiente para cumplir con la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, el valor por defecto de este es igual a 0.7 (De Almeida y Bates, 2013).

$$\Delta t = \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{g} \times h_{max}} \quad (4-1)$$

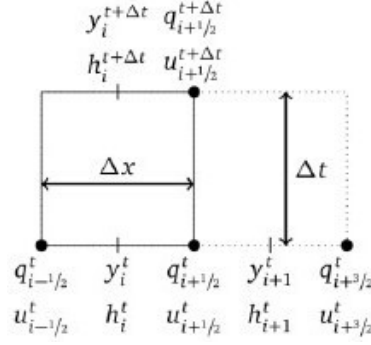


Figura 4-1: Variables usadas en la resolución numérica en la dimensión x . El mismo principio se aplica para la dimensión y (De Almeida y Bates, 2013).

El flujo se calcula con la ecuación 4-2, donde n es el coeficiente de fricción de Manning, S la pendiente hidráulica y Θ un coeficiente que permite el peso relativo de los flujos arriba y debajo del punto considerado. h_f es la profundidad del flujo, calculado como la diferencia entre el nivel máximo de agua y la altitud máxima entre las dos celdas (De Almeida y Bates, 2013).

$$q_{i+1/2}^{t+\Delta t} = \frac{\left(\Theta \cdot q_{i+1/2}^t + (1 - \Theta) \frac{q_{i+1/2}^t + q_{i+3/2}^t}{2} \right) + g h_f \Delta t S}{1 + g \Delta t n^2 \| q_{i+1/2}^t \| / h_f^{7/3}} \quad (4-2)$$

La estimación del valor resultante del flujo, producto de las componentes en cada dirección cartesiana $\| q_{i+1/2}^t \|$, se estima con la ecuación 4-3. Dado que la malla no es centrada 4-1, el flujo en la dimensión y no está calculado en el mismo lugar que el flujo en dimensión x ; de esta manera, el valor resultante se calcula por medio de los cuatro valores de flujo más cercano (De Almeida y Bates, 2013).

$$\| q_{i+1/2}^t \| = \sqrt{q_{x,i+1/2,j}^t + q_{y,i+1/2,j}^t} \quad (4-3)$$

El flujo q en $m s^{-2}$ obtenido de la ecuación 4-4 es convertido a $m^3 s^{-1}$ con la siguiente ecuación.

$$Q_i = q_i \times \Delta y \quad (4-4)$$

En aquellas celdas donde la profundidad del agua queda por debajo de un valor umbral se utiliza una velocidad fija determinada por el usuario, el modelo tiene por defecto el valor determinado de 5 mm para la profundidad del agua y de $0.1m/s$ para la velocidad (Sampson *et al.*, 2013).

La profundidad del agua en cada celda, se calcula mediante la ecuación para el balance de masa 4-5 , donde h_{ext} representa los valores exteriores como lluvia o infiltración y Q los flujos en m^3/s (Courty *et al.*, 2017).

$$h^{t+\Delta t} = h^t + h_{ext}^t + \frac{\sum^4 Q_{i,j}^t}{\Delta x \Delta y} \times \Delta t_{2D} \quad (4-5)$$

Capítulo 5

Modelo SWMM (Storm Water Management Model)

SWMM es un modelo dinámico hidrológico-hidráulico de simulación de lluvia-escorrentamiento el cual se utiliza para eventos únicos o eventos a largo plazo de la cantidad y calidad de escorrentamiento que se genera. El sistema SWMM emplea los principios de conservación de la masa, de la energía y de cantidad de movimiento. Es una herramienta para proyectar sistemas de drenaje, es capaz de simular el movimiento del agua de la precipitación y los contaminantes por el suelo.

Un punto a destacar del modelo es la idealización de las cuencas, éste las modela como superficies rectangulares que tienen una pendiente uniforme y un ancho fijo que drenan a un canal de salida y el flujo por tierra se genera como un almacenamiento no lineal figura 5-1, donde se generan las entradas (precipitación, derretimiento de la nieve) y las salidas (infiltración, evaporación). El cambio en el almacenamiento se determina por el cambio en la profundidad ($d - d_s$) por unidad de tiempo entre las entradas y salidas mediante la conservación de la masa 5-1.

$$\frac{\delta d}{\delta t} = i - e - f - q \quad (5-1)$$

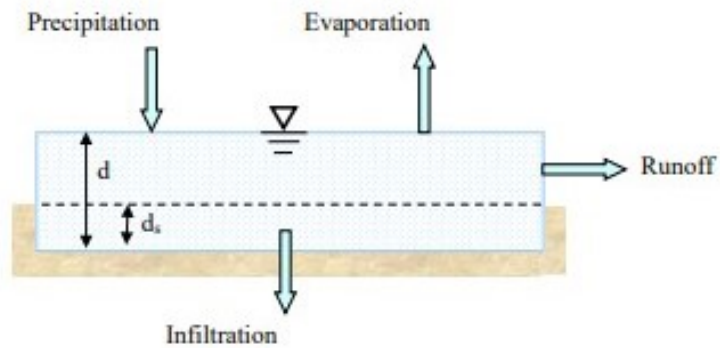


Figura 5-1: Reservorio idealizado no lineal de una cuenca imagen tomada de Rossman *et al.*, 2016.

Donde:

i = lluvia + derretimiento de nieve

e = evaporación

f = infiltración

q = flujo de salida

Las ecuaciones hidráulicas de gobierno que emplea SWMM son la de continuidad 5-2 y la de Momentum 5-3.

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0 \quad (5-2)$$

Donde:

x = distancia

t = tiempo

A = área de la sección transversal

Q = gasto

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta(Q^2/A)}{\delta x} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + gAS_f = 0 \quad (5-3)$$

Donde:

x = distancia

t = tiempo

A = área de la sección transversal

Q = gasto

Estas ecuaciones se resuelven para las características geométricas e hidráulicas de la red que se ingresan en SWMM (Rossman, 2017).

Capítulo 6

Modelo Acoplado Flujo-Drenaje

Se describirán las características para realizar el acople del modelo de drenaje SWMM con el modelo ITZÍ, el modelo acoplado se ha validado comparando los resultados con modelos comerciales y académicos (Courty, 2018; Courty *et al.*, 2017).

Como se menciona con anterioridad los dos modelos que se acoplan son SWMM con ITZÍ, donde solamente se utiliza el modelo SWMM como un modelo que determina el recorrido del flujo en el drenaje y hace el cálculo hidráulico dentro de la red, determinando entradas y salidas de gasto del drenaje.

Lo primero es sincronizar los tiempos en los que cada modelo corren para asegurar que el intercambio de masa se realice al mismo tiempo que la simulación, Itzi tiene diferentes módulos que corren con diferente paso de tiempo, esto son;

- El modelo de infiltración, este utiliza un paso de tiempo fijo que por defecto es de 60 segundos.
- El módulo de escritura de los resultados utiliza un paso de tiempo definido por el usuario.
- El modelo de drenaje utiliza un paso de tiempo tanto fijo como ajustable.
- El flujo superficial con un paso de tiempo dinámico.

Se ajusta el paso de tiempo del modelo de flujo superficial para que éste coincida con los otros modelos, para realizar el ajuste se utiliza la ecuación 6-1.

$$\Delta t = \min \{(t + \Delta t_{2D}), (t + \Delta t_{1D}), (t + \Delta t_{inf})\dots\} - t \quad (6-1)$$

Donde:

Δt = Paso de tiempo general del modelo

Δt_{2D} = Paso de tiempo del modelo de flujo superficial

t = Tiempo de simulación

Δt_{1D} = Paso de tiempo del modelo de drenaje

Δt_{inf} = Paso de tiempo del modelo de infiltración

El modelo de flujo superficial es el único que se ejecuta en un paso de tiempo general. Los otros modelos solamente se ejecutan con un paso de tiempo en general si este es igual al paso de tiempo designado.

$$\Delta t_{2D} = \Delta t \quad (6-2)$$

6.1. Intercambio de masa

El intercambio de flujo ha sido propuesto mediante ecuaciones de orificio o vertedero por Chen *et al.*, 2007. Esta propuesta se ha usado en diferentes investigaciones (Seyoum *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2015). Así también, se han realizado experimentos para demostrar que puede reproducir de manera adecuada los fenómenos físicos reales (Rubinato *et al.*, 2017). Diferentes criterios se han utilizado para aplicar estas ecuaciones, en este sentido Itzi emplea los criterios que se utilizan por Rubinato *et al.*, 2017, ya que se han demostrado experimentalmente para diferentes flujos. Las combinaciones de ecuaciones de vertedor y orificio se presentan a continuación:

1. No existe intercambio mientras la elevación del agua en el nodo y sobre el nivel del suelo este por debajo de elevación de la cresta nodo.
2. Ecuación de orificio si la altura de agua en el pozo de visita h_{pv} es mayor a la elevación del agua en la superficie h_{sup} , ($h_{pv} > h_{sup}$) o $(h_{sup} - Z_{crest}) \geq (A_{pv}/W)$. Esto quiere decir que cuando el drenaje desborda, sólo la ecuación de orificio es usada.
3. Ecuación de vertedor si $h_{sup} > Z_{crest} > h_{pv}$
4. Ecuación de vertedor sumergido si ambos niveles de agua de superficie y pozo de visita están sobre el nivel de cresta y $(h_{sup} - Z_{crest}) < (A_{pv}/W)$.

donde:

Z_{crest} Elevación de cresta del nodo

h_{pv} Elevación del pozo de visita

h_{sup} Elevación del agua del flujo superficial

Las ecuaciones para los diferentes flujos se muestran en (6-3), (Courty, 2018):

$$Q = \begin{cases} 2/3C_{fw}Wd_f^{3/2}, & \text{si } h_{sup} > Z_{crest} > h_{pv} \\ C_{sw}Wd_f\sqrt{2g(h_u - h_d)}, & \text{si } [(h_{sup} - Z_{crest}) < (A_{pv}/W)] \wedge (h_{sup} > h_{pv}) \wedge (Z_{crest} > h_{pv}) \\ C_0A_{pv}\sqrt{2g(h_u - h_d)}, & \text{si } (h_{pv} > h_{sup}) \vee [(h_{sup} - Z_{crest}) \geq (A_{pv}/W)] \end{cases} \quad (6-3)$$

con

$$h_u = \max h_{pv}, h_{sup} \quad (6-4)$$

$$h_d = \min h_{pv}, h_{sup} \quad (6-5)$$

$$d_f = h_u - Z_{crest} \quad (6-6)$$

donde:

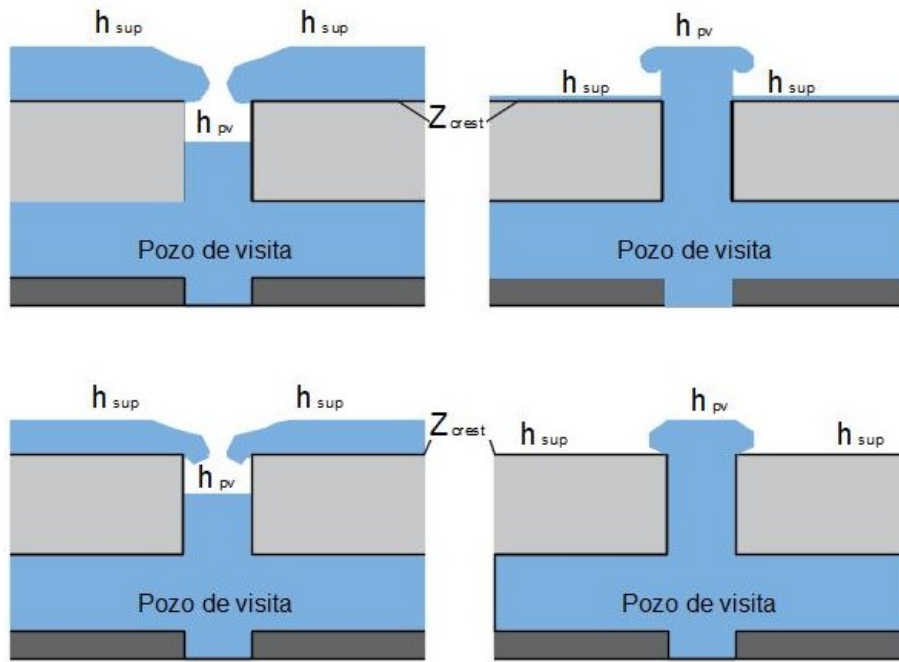


Figura 6-1: Criterio para ecuaciones de vertedor.

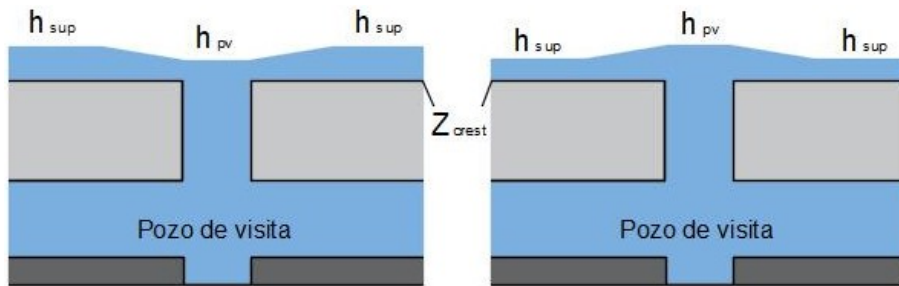


Figura 6-2: Criterio para ecuaciones de vertedor y orificio.

W Ancho del vertedor

A_{pv} Área del pozo de visita

C_0 Coeficiente del orificio

C_{fw} Coeficiente del vertedor

C_{sw} Coeficiente del vertedor sumergido

El signo del gasto Q_e es positivo cuando entra al modelo de superficie y negativo cuando entra a la red de drenaje, la ecuación que lo define es (Courty, 2018):

$$Q_e = Q \frac{h_{pv} - h_{sup}}{|h_{pv} - h_{sup}|} \quad (6-7)$$

6.2. Acople del modelo

La aplicación del código para la realización del acople se realiza en diferentes etapas (Courty, 2018):

- Código de SWMM con funciones API adicionales
- Cython extensión de Python con funciones de C que se aplican a los objetos de la red (Behnel *et al.*, 2011).
- Paquetes de Ctypes para funciones generales de SWMM (Kloss, 2014).
- Conjunto de funciones Cython que resuelven el acople flujo-drenaje.
- Código Python que representa la interfaz del modelo de drenaje para la interacción de Itzi.
- Controlador de la simulación de Itzi, que administra el paso de tiempo de la sincronización.

Se puede consultar más sobre el código para el acople del modelo en Courty, 2018.

Parte III

Tercera Parte

Capítulo 7

Aplicación del modelo a un caso real

7.1. Metodología

- Recopilación de información: Detalles de la red de drenaje, modelo digital de elevaciones, mapa de rugosidad, precipitación del evento, mapa de infiltración. Vídeos, noticias, notas del alcance de la inundación.
- La información recopilada se ingresa y procesa en GRASS para la creación de los mapas que utilizara Itzi para la simulación.
- Se utiliza el modelo Itzi: Los parámetros que se utilizan para la aplicación del modelo son: Modelo digital de elevaciones, mapa de Rugosidad, intensidad de lluvia y mapa de infiltración.
- Creación del archivo .ini que genera SWMM con las características de la red y los parámetros para el cálculo del flujo en el drenaje.
- Representar le red con las características físicas dentro del modelo siendo cuidadoso en cómo se representa la realidad de la red.
- Calibración de la red para alcanzar los niveles de agua.
- Correr la simulación con drenaje.

7.2. Caso de estudio

El modelo se utiliza para reproducir un evento de inundación que se presentó la tarde del día lunes 18 de Julio del 2016, en la zona de Interlomas, Huixquilucan en el Estado de México, la fuerte precipitación provocó el desborde del río la Coyotera y causó daños en los complejos residenciales y en el Hospital Ángeles Lomas ubicado en la Col. Valle de las Palmas, Hacienda de las Palmas Huixquilucan, Estado de México.

El fenómeno produjo severos daños en 14 inmuebles de los complejos residenciales, la inundación del sótano del hospital, cortes de luz, fallas en las líneas telefónicas, el traslado de los pacientes a otros hospitales y un caos vial en la zona (Fernández, 2016; Azteca Noticias, 2016b; Huixquilucan TV Oficial, 2016). Conforme se describa el caso de estudio se irá describiendo el uso del modelo.



(a) Desborde del río e inundación de los complejos residenciales. (Soler, 2016)



(b) Inundación Hospital Ángeles Lomas. (Hoy Estado, 2016)

Figura 7-1: Inundación Interlomas.

7.3. Zona de estudio

La cuenca de la zona de estudio se encuentra en los límites de la Ciudad de México y el Estado de México, la cuenca baja se encuentra en el municipio de Huixquilucan, Estado de México, mientras que la cuenca alta corresponde a la delegación Cuajimalpa de Morelos, CDMX 7-2. Para delimitar la cuenca, el punto de salida de la red de drenaje se determinó como la unión del sistema de drenaje y el cauce del río Hondo en la Colonia Bosque de las palmas en Naucalpan,

Huixquilucan 7-3. Geográficamente Huixquilucan está en la parte media del Estado de México sus coordenadas geográficas son: $19^{\circ} 17'$ - $19^{\circ} 27'$ de latitud norte y $99^{\circ} 14'$ - $99^{\circ} 25'$ de longitud oeste, su altitud se encuentra a una altura aproximada entre los 2 433 y los 2 789 metros sobre el nivel del mar. El municipio de Huixquilucan tiene una superficie de 143.52 km^2 (INEGI, 2015). Según el censo de la INEGI, Huixquilucan cuenta con una población de 267 858 (*Número de habitantes. Estado de México* 2015). Sin dejar de hacer mención que Cuajimalpa de Morelos, CDMX cuenta con una extensión territorial de 80.95 km^2 donde habitan 186,395 habitantes. En Huixquilucan, se presentan las lluvias en verano, con una precipitación que va de 900 a 1,100 mm, (Huixquilucan, 2017).

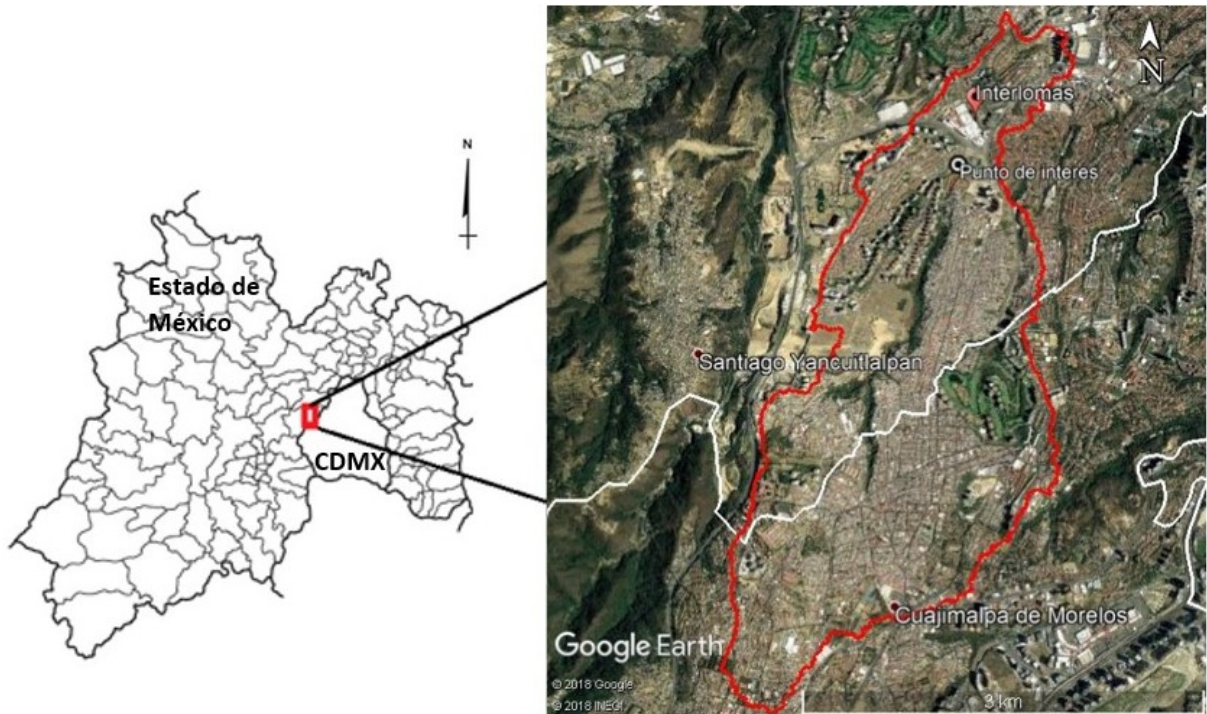


Figura 7-2: Localización de la cuenca de estudio en el Estado de México y la Ciudad de México (Línea roja cuenca de estudio, línea blanca límites del Estado de México y Ciudad de México)(Imagen adaptada de Google Earth ©2017 Google ©2017 INEGI).

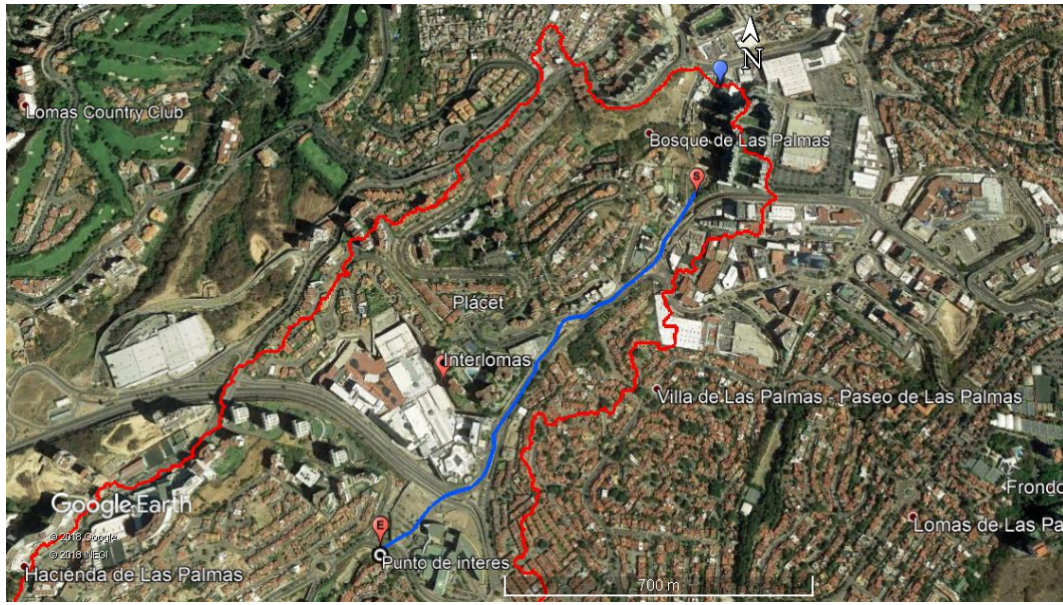


Figura 7-3: Salida de la red de drenaje de la cuenca (punto azul), entrada del drenaje (punto rojo E) y la salida del drenaje (punto rojo S) (Imagen adaptada de Google Earth ©2017 Google ©2017 INEGI).

7.4. Sitio de interés

La zona que interesa modelar es el punto donde el colector fue insuficiente para desalojar el agua, así mismo aguas arriba del colector existe un tramo entubado que corta el cauce del río el cual es un buen elemento para probar el modelo acoplado.

7.5. Información de entrada para el modelo

7.5.1. Modelo Digital de Elevación (MDE)

El modelo Digital de elevación (MDE) de alta resolución (LiDAR), tipo terreno con resolución de 5 m, se descargó de la página de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017), junto con una imagen satelital del área de estudio, para así ubicar el sitio de interés dentro del modelo figura (7-5).



Figura 7-4: Sitio de interés, en blanco tubería que corta el cauce del río, pasando por debajo de un jardín de un conjunto habitacional (Imagen adaptada de Google Earth ©2017 Google ©2017 INEGI).

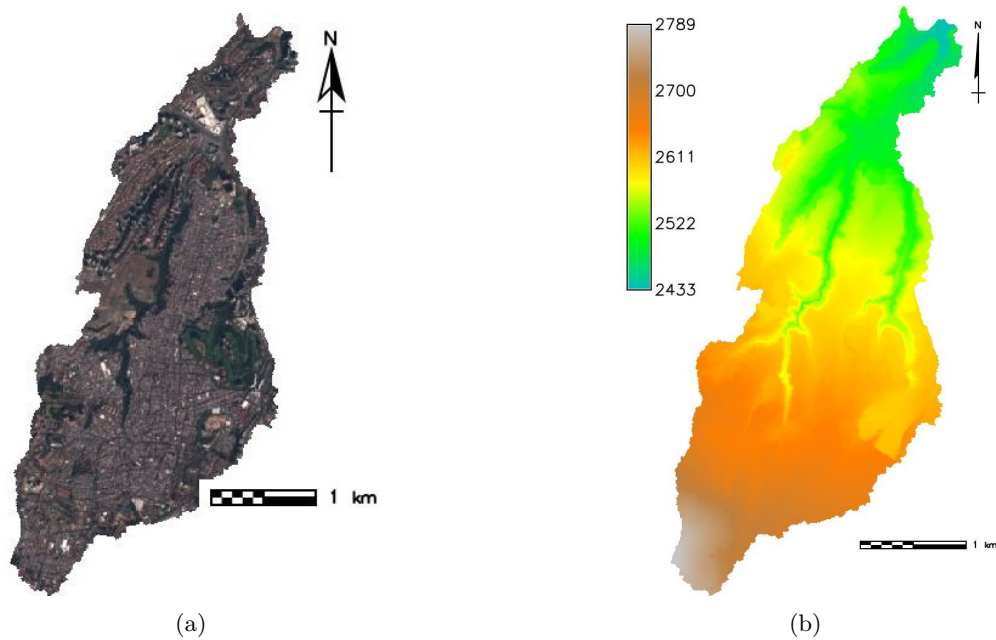


Figura 7-5: (a) Imagen satelital (Copernicus Sentinel 2017), (b) Modelo digital de elevaciones (INEGI 2017).

7.5.2. Infiltración

El parámetro de infiltración se puede realizar de dos maneras, la primera es mediante el uso de la ecuación de Green-Ampt y la segunda definiendo un valor de infiltración en el modelo, esto dependerá de la información disponible, si se cuenta con el valor de infiltración del sitio de estudio se utilizará este valor fijo para la creación del mapa de infiltración, en cambio si no se tiene el valor de ésta, se deberán obtener los parámetros para el uso de la ecuación de Green-Ampt y se crearán los siguientes mapas:

- Mapa de porosidad efectiva
- Mapa de presión capilar
- Mapa de conductividad hidráulica

En este caso la zona es altamente urbana y se tenían registro de lluvias previas al evento, se propone que no hay infiltración en la zona ya que ésta es altamente influenciada por la alta urbanización de la zona.

7.5.3. Rugosidad

Los valores de rugosidad se proponen de acuerdo a los valores típicos determinados por Chow, 1959, con ayuda de imágenes de satélite y visitas a la zona de estudio se determinó el tipo de material y canal para proponer un valor de rugosidad para el modelo superficial. Para el valor de la rugosidad dentro del drenaje se realizó una calibración para establecer el valor adecuado, los resultados de la calibración se presentan más adelante. Para la red de drenaje se tomó en cuenta los valores de Manning para conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos, el material de la red es de concreto, pero no se ve el estado físico de la tubería por lo cual se toman los valores de 0.015 que es de alcantarilla con pozos de registro, entrada, etc., hasta un máximo de 0.020, estos fueron los valores para calibrar la red. En el caso del modelo superficial se propone un coeficiente de 0.013 por el grado de urbanismo ya que este corresponde a canales construidos con asfalto.

7.5.4. Precipitación

Se compararon dos fuentes de información. La primera es mediante una misión para la medición global de la precipitación, NASA/JAXA GPM satellite mission (IMERG products-3IMERGHH: Half-hourly final - version: 05) (Jenner, 2015), la resolución es de media hora y la información que proporcionan es espacial con una resolución de 10 781.85 m (10.781 Km). La segunda son mediciones de varios pluviómetros de la red de medición de SACMEX (*OCAVM SISTEMA DE LLUVIA* 2017) con resolución de una hora y la información es puntual. Se utiliza el parámetro estadístico *RSR* que relaciona la raíz cuadrada de error medio (RMSE-*Root Mean Square Error*) y la desviación estándar (σ) de las observaciones, para saber si los datos percibidos son ideales para la simulación.

$$RSR = RMSE/\sigma \quad (7-1)$$

A continuación, se presenta el hietograma obtenido con SACMEX Y GPM para la estación CARTERO.

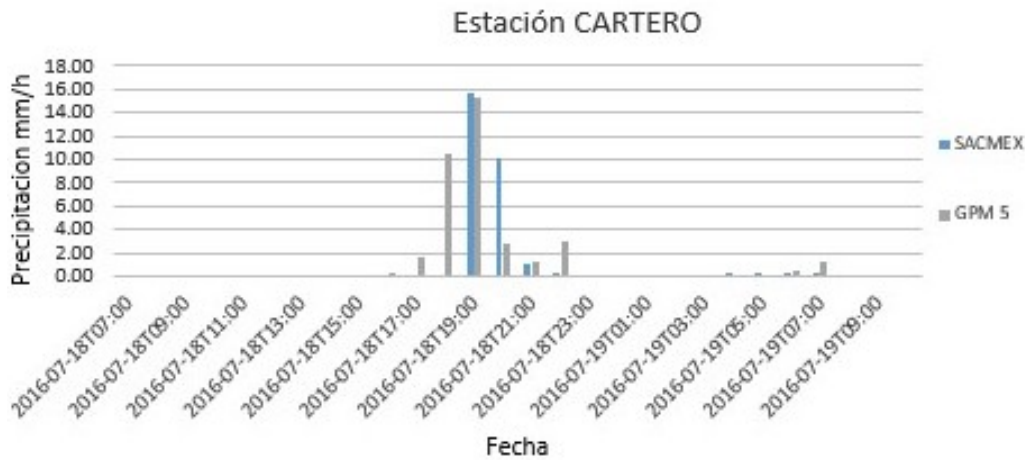


Figura 7-6: Comparación de precipitación SACMEX-GPM.

Las estaciones de SACMEX no se encuentran dentro de la zona de estudio, por lo que se compararon los valores entre SACMEX y el GPM puntualmente en las coordenadas de las

estaciones y se determinó utilizar los valores del GPM ya que el RSR se encuentra en un rango adecuado para su utilización, ya que los datos del GPM no varían demasiado con los valores medidos puntualmente en la zona de las estaciones cuadro 7-1, las horas del GPM se encuentran en horario UTC (Universal Time Coordinated) este horario es el utilizado dentro del modelo.

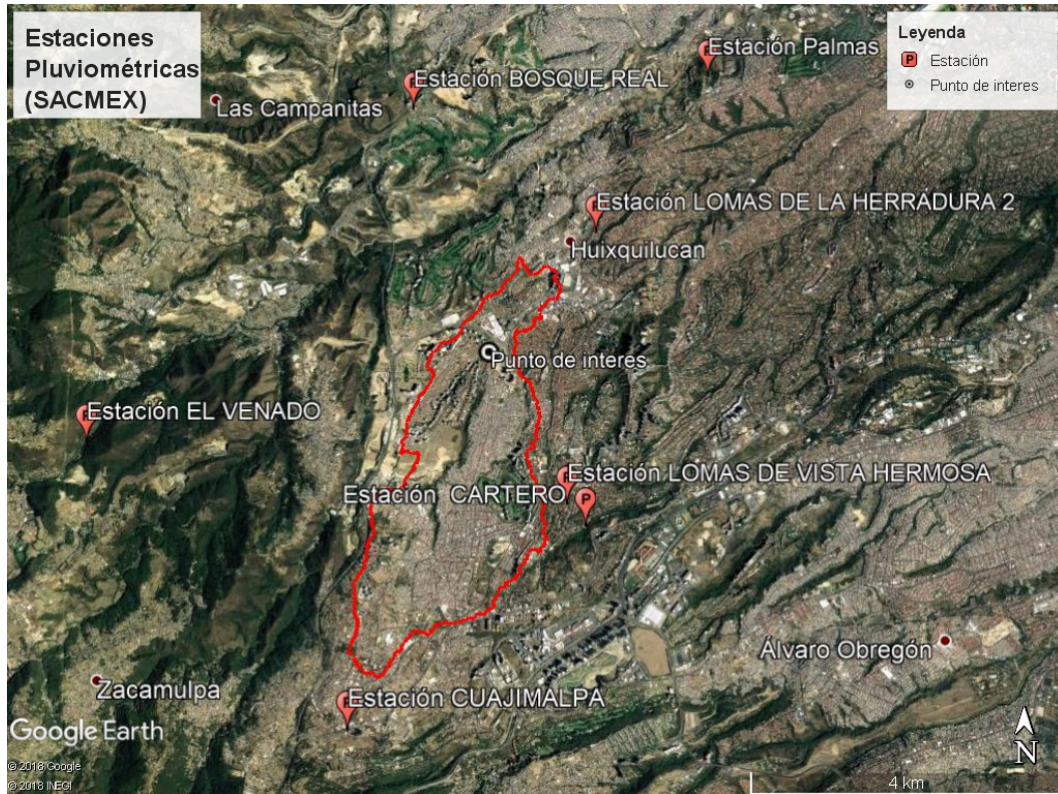


Figura 7-7: Mapa de estaciones Pluviométricas.

7.5.5. Drenaje

La información de la red de drenaje se obtuvo con visitas al sitio de interés y con ayuda de un mapa que otorgaron las autoridades del estado de Huixquilucan donde indican la ruta y algunas características de la red figura 7-8.

A partir de las visitas se determinó el diámetro y la pendiente de la tubería. Para el diámetro del tubo se obtuvo una medición de $D=2.40$ m, para el caso de la pendiente se hizo una estimación de $s = 0.013$ este se tomó considerando el jardín horizontal de acuerdo con el administrador

Estación	RSR
Lomas de Herradura 2	1.44
El Venado	1.06
Palmas	5.28
Lomas de Vista Hermosa	0.92
Cartero	0.7297
Bosque Real	2.55

Cuadro 7-1: Valor de RSR en la comparación de SACMEX-GPM.



Figura 7-8: Localización de la red de drenaje (Información proporcionada por el municipio).



(a) Tuberías de la red (Vista hacia el suroeste).



(b) Cauce a cielo abierto (Vista hacia el noreste).

Figura 7-9: Visita al sitio.

del conjunto residencial donde se encuentra el jardín. En el sitio se midió con cinta métrica la altura desde el lecho superior de la tubería al nivel del jardín donde se encuentra la entrada y salida del drenaje para determinar la pendiente. Cabe mencionar que las autoridades y los noticieros mencionan un diámetro de 1.80 que medido en el sitio es de 2.40 m.

Los niveles que alcanzó el agua durante el evento se estimaron por los alcances del agua a partir de vídeos que se tienen del evento, aproximando el alcance del agua figura 7-11. No se registró ninguna medida durante o después del evento. Cabe mencionar que la altura estimada tiene un cierto nivel de incertidumbre ya que el nivel medido se obtuvo después de las obras de dragado y limpieza del cauce, con lo cual no se sabe con certeza la altura que los trabajos aumentaron, por eso se utilizará el nivel que alcanzó el agua en el jardín donde el drenaje pasa por abajo de este. El agua llegó a un nivel aproximado de 1 m igualmente estimado con los vídeos y medido en sitio figura 7-13. Es importante tener en cuenta que la representación de la red dentro de SWMM fue únicamente con la información obtenida en campo, esto quiere decir que toda la red se modeló con un diámetro de 2.4 m y pendiente de 0.013 aproximadamente. SWMM identifica los nodos como entradas a la red de drenaje, pero para darle la dirección a la red se colocaron nodos los cuales no son entradas a la red a excepción de los nodos 12, 13, 14 y 15 donde si son entradas al drenaje (figura 7-8).

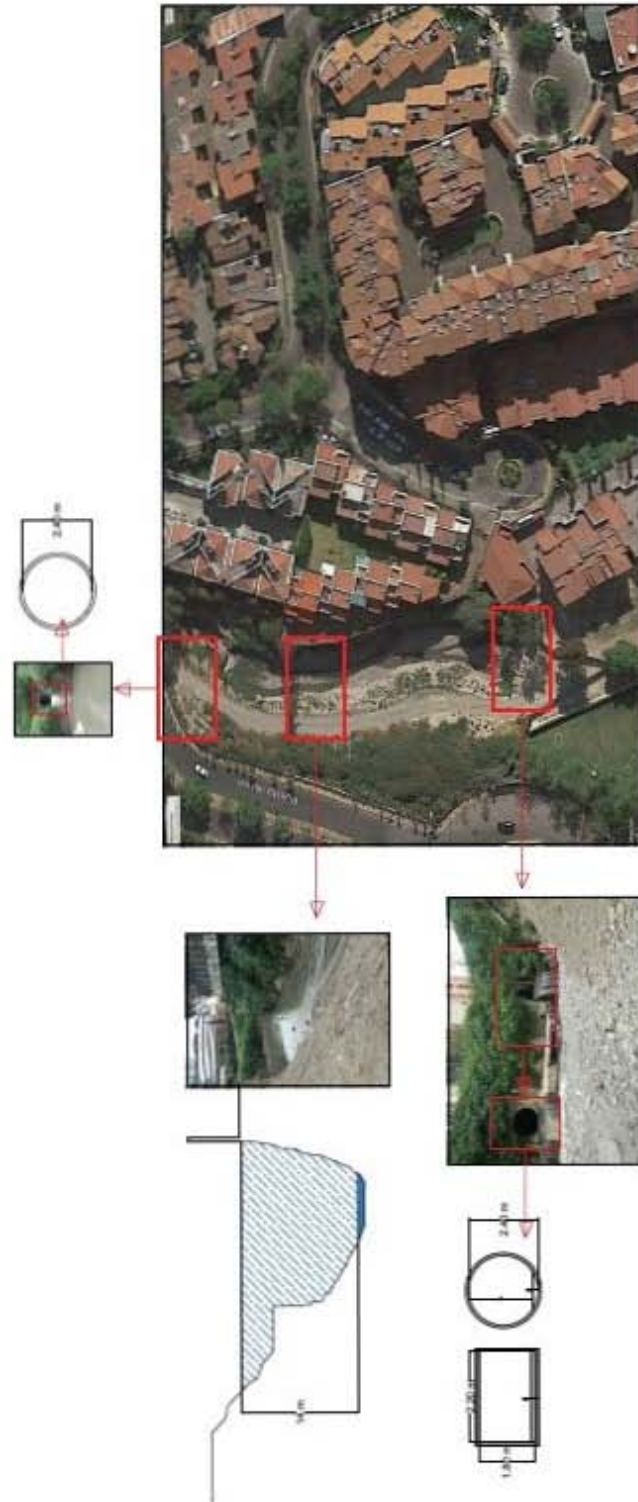


Figura 7-10: Croquis y medidas de la red de drenaje (Imagen adaptada de Google Earth©2017 Google ©2017 INEGI).



(a) Imagen del vídeo en el que se ve el alcance del agua. (tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=yIYmkH4Obsc>)



(b) Altura estimada que alcanzó el agua.

Figura 7-11: Nivel aproximado del agua.

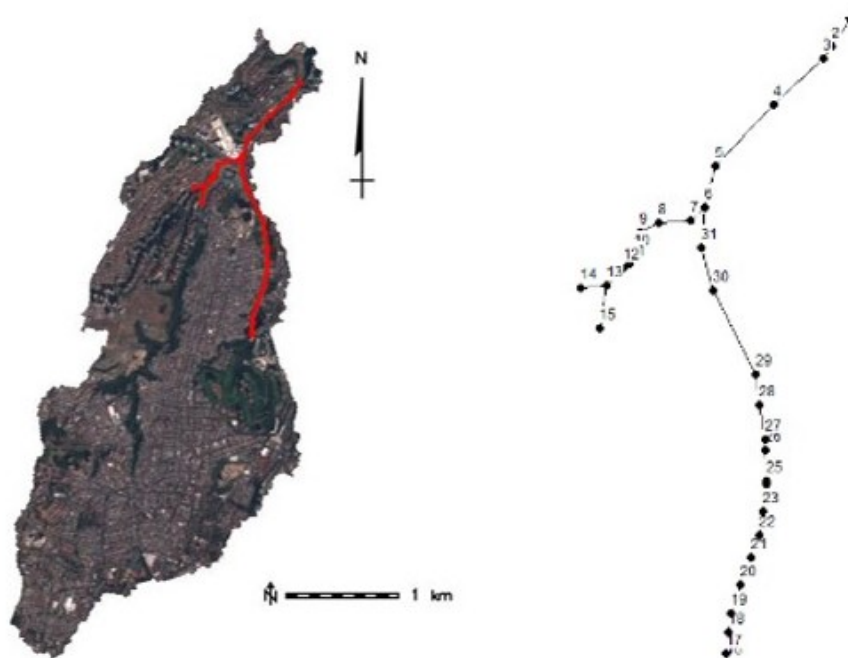


Figura 7-12: Red de drenaje en SWMM.



Figura 7-13: Alcance del agua en el jardín, en blanco zona que se midió para obtener la altura (tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=WzFJAiGpWEg&t=153s>).

7.6. Simulación

El acople se realizó cuidadosamente ya que los puntos definidos como entradas de drenaje únicamente funcionan como pozos de visita, siendo esto una complicación del modelo, ya que habrá que definir bien la representación de la unión entre el cauce y el drenaje figura (7-14, 7-15). La interacción entre el cauce y el drenaje se modeló proponiendo las alturas de los nodos como la elevación del terreno donde se une el cauce con el drenaje y el diámetro de entrada de los pozos es la misma al diámetro de la tubería.



Figura 7-14: (13 y 12) Unión entre el cauce y el drenaje (Imagen adaptada de Google Earth).

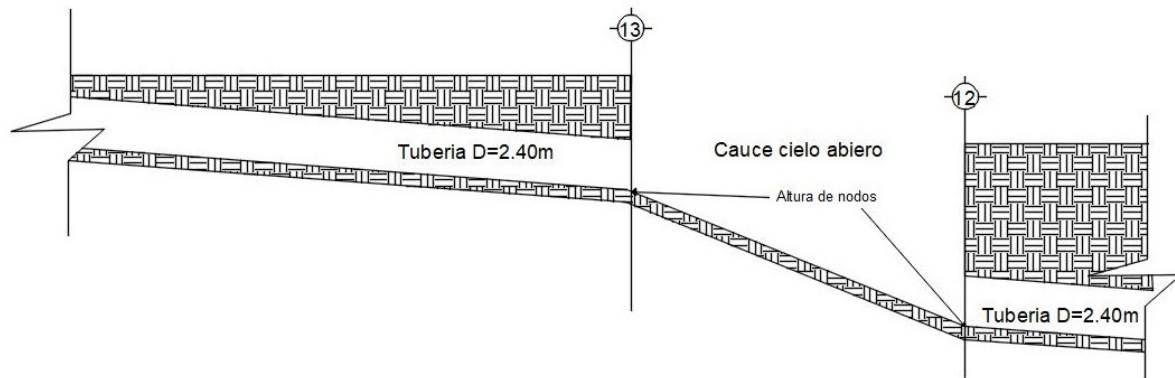


Figura 7-15: Croquis de la unión física entre el drenaje y el cauce.

El modelo SWMM necesita que exista una unión entre nodos, pero en los nodos 13 y 12 es donde tenemos el cauce, en esos puntos se propone la unión de los nodos mediante una tubería con un diámetro de 0.10 m para obligar el desborde del agua en el nodo 13 y que en ese punto el modelo acoplado lo reconozca como flujo superficial figura (7-16). Los nodos (pozos de visita) que sólo sirvieron para darle dirección a la red del drenaje se modelaron con un valor de sobrecarga para

que estos no desbordaran ya que no hay información de que la red en otros puntos se haya excedido en su capacidad.

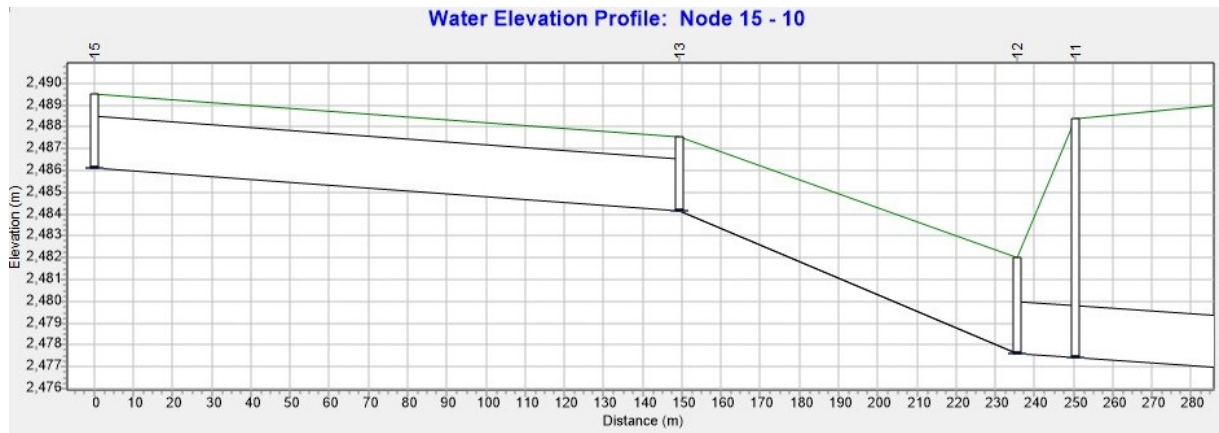


Figura 7-16: Croquis de la unión propuesta en el modelo SWMM.

Una vez definida la información, procesada en el sistema de información geográfica GRASS y detallada la red de drenaje, esta información se le da a Itzi a través de un archivo de configuración en formato similar a los archivos .ini de Microsoft Windows. El archivo de configuración se encuentra dividido en 6 secciones que son (Courty *et al.*, 2017):

- *[time]*

Se indica la duración de la simulación, que puede estar dada por una combinación de hora de inicio, hora de finalización y duración. Sí sólo se da la duración, los resultados se escriben en un tiempo relativo, en otras combinaciones se utilizará un tiempo absoluto.

- *[input]*

Nombre de los mapas de entrada que contienen la información para correr la simulación (Modelo digital de elevación, Coeficiente de fricción, precipitación, condiciones de frontera, etc.). Los mapas obligatorios son el modelo digital de elevación en metros y el mapa de fricción, expresada como el coeficiente de fricción de Manning.

- [*output*]

Prefijo para nombrar los mapas resultantes y se indican los valores resultantes de la simulación que requiere el usuario (Profundidad del agua, velocidad del flujo, infiltración, flujo de intercambio promedio del modelo superficial y el drenaje, etc.).

- [*statistics*]

Nombre con el archivo de estadísticas, se presenta como un archivo CSV, que guarda la información a cada paso de tiempo definido por el usuario.

- [*options*]

Si se desea hacer un cambio en los valores determinados en las ecuaciones que utiliza el modelo se indica en esta sección los nuevos valores (coeficiente para calcular el paso de tiempo, coeficiente de ponderación inercial, umbral de profundidad del agua, etc.).

- [*drainage*]

Sección necesaria para la simulación del acople de modelos flujo superficial-drenaje, se indica el archivo controlador .inp de configuración EPA SWMM y se indican los coeficientes de orificio, vertedor y vertedor sumergido que se utilizarán para el intercambio de masa.

Existe una sección más llamada [*grass*] la cual permite ejecutar la simulación fuera de la terminal de GRASS.

```

1  [time]
2  start_time = 2016-07-18 14:00
3  end_time = 2016-07-19 14:00
4  record_step = 00:30:00
5
6  [input]
7  dem = Dem_carve_2@Presas_capulin
8  friction = manning_swmm_1@Modelacion
9  rain = lluvia_gpm_v5@DRENAJE_2
10 bctype = bctype_recortada@Presas_capulin
11 bcval = bcval_recortada@Presas_capulin
12
13 [output]
14 prefix = modelo_final_1
15 values = h, wse, boundaries, drainage_stats
16
17 [statistics]
18 stats_file = modelo_final_1.csv
19
20 [drainage]
21 swmm_inp = rio_hondo_20_50.inp
22 output = modelo_final_1
23
24 [options]
25 cfl = 0.1
26 dtmax = 0.1
27 theta = 0.8
28

```

Figura 7-17: Archivo de configuración Itzi para el modelo acoplado.

7.7. Resultados

El estado físico de la red de drenaje es incierto por lo cual se realizó una calibración de la red, esta se realizó únicamente en SWMM por el tiempo de cálculo, los parámetros que se utilizaron fueron n de manning y el porcentaje de sedimentos dentro la red (para simular un tapón de basura que se formó en la red (Velasco, 2016)), el valor objetivo que se definió para realizar la calibración es la altura del agua que se presentó en el jardín (ver figura 7-13), el cual alcanzó una medida estimada de $1\text{ m} \pm 0,20\text{m}$. En el cuadro 7-2 se muestran las alturas obtenidas para diferentes combinaciones del porcentaje de sedimentos y rugosidad de la tubería. En negrita se muestra la combinación de parámetros que genera una altura en el jardín cercana a la medida.

n de Manning	Altura del agua de acuerdo al %sedimentos					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
0.015	0	0	0.02	0.67	3.14	6.09
0.016	0	0	0.1	1.67	3.7	6.87
0.017	0	0	0.44	2.21	4.28	7.54
0.018	0	0.04	0.72	2.56	4.8	7.87
0.019	0.08	0.13	1.29	3	5.29	8.63
0.020	0.08	0.36	1.76	3.44	5.75	9.14

Cuadro 7-2: Altura del agua (m), en el jardín de acuerdo al coeficiente de fricción y el % de sedimentos.

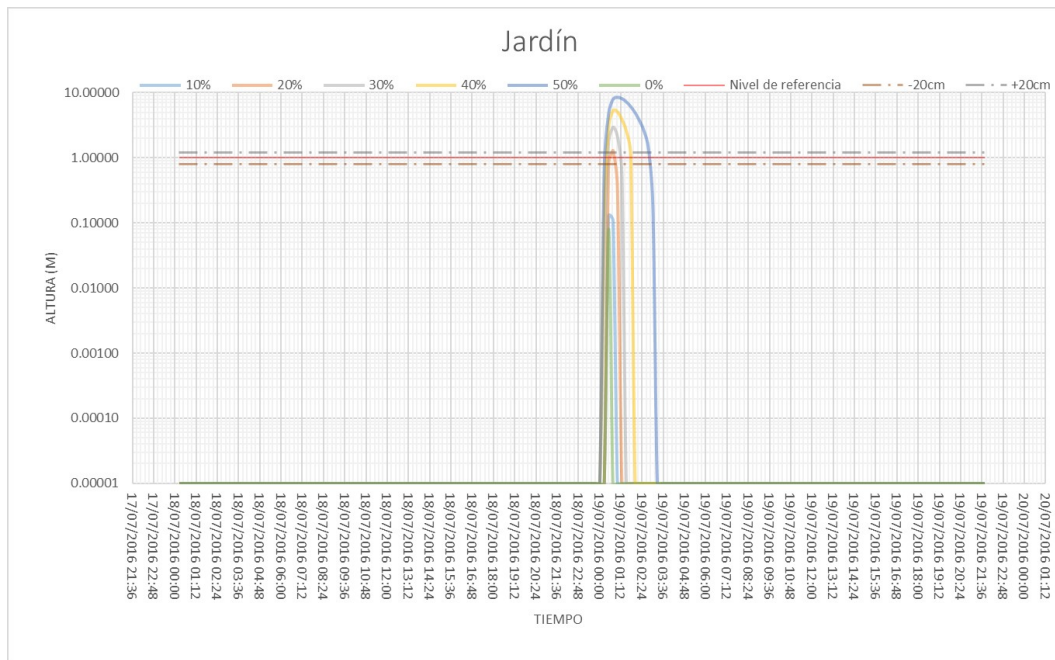


Figura 7-18: Niveles en el jardín para $n = 0.019$.

Los parámetros de calibración que se utilizaron para la red de drenaje son; coeficiente de rugosidad para un tubo de concreto de $n=0.019$ y un porcentaje de sedimentos del **20%**, ya que la altura obtenida en el jardín en esta simulación es de **1.29m** siendo la más próxima a la altura medida en esta zona.

Con la red de drenaje calibrada, se procedió a utilizar el modelo acoplado. Los parámetros que se utilizaron y se mantuvieron constantes se muestran en el cuadro 7-3.

Parámetro	Valor
Coefficiente para el cálculo del paso del tiempo (cfl)	0.1
Máximo paso de tiempo para el flujo superficial (dtmax)	0.1
Ponderación inercial (theta)	0.8
Coefficiente de Orificio (C_o)	0.167
Coefficiente de vertedor libre	0.54
Coefficiente de vertedor sumergido	0.056

Cuadro 7-3: Parámetros constantes en las simulaciones.

Estos parámetros permiten una simulación estable manteniendo el balance de masa.

El nivel obtenido de la aplicación del acople es menor a los niveles medidos físicamente y al obtenido en SWMM, los resultados se presentan en el cuadro 7-4. Las imágenes del modelo acoplado indican que en la zona de interés sí se almacenó agua, pero no lo suficiente para ocasionar el desborde del cauce y por consecuencia la inundación (figura 7-20).

Máxima Observada	Máxima simulada (SWMM)	Máxima simulada (Acople)
1m $\pm 0,20m$	1.29 m	0.66 m

Cuadro 7-4: Niveles del agua (m).

Al comparar los gastos de entrada en el drenaje que se encuentra por debajo del jardín se observa que existe un punto donde el gasto de SWMM se dispara en comparación con el de Itzi, el cual se ve más uniforme con un tránsito sobre el cauce más suave figura 7-19. Esto último es posible que sea a causa de la representación de la cuenca dentro de SWMM, ambos modelos descartan la infiltración, pero la idealización de las cuencas en SWMM es muy sencilla, como se menciona en el capítulo 5, aunque para tener en cuenta la topografía de la cuenca, SWMM tiene la opción para ingresar depresiones donde pueda quedarse retenida el agua, el valor que se ingrese tendrá asociado un valor de incertidumbre alto, ya que es difícil conocer las alturas de las depresiones o estimar el valor es muy complicado para las cuencas. En comparación con el modelo acoplado, donde la topografía del lugar se ingresó al modelo numérico por medio de un Modelo Digital de Elevación (MDE), con base en altimetría por rayo láser, lo que provee

información de calidad para el cálculo de flujos en zonas urbanas, tomando en cuenta lugares donde se puede quedar almacenada el agua.

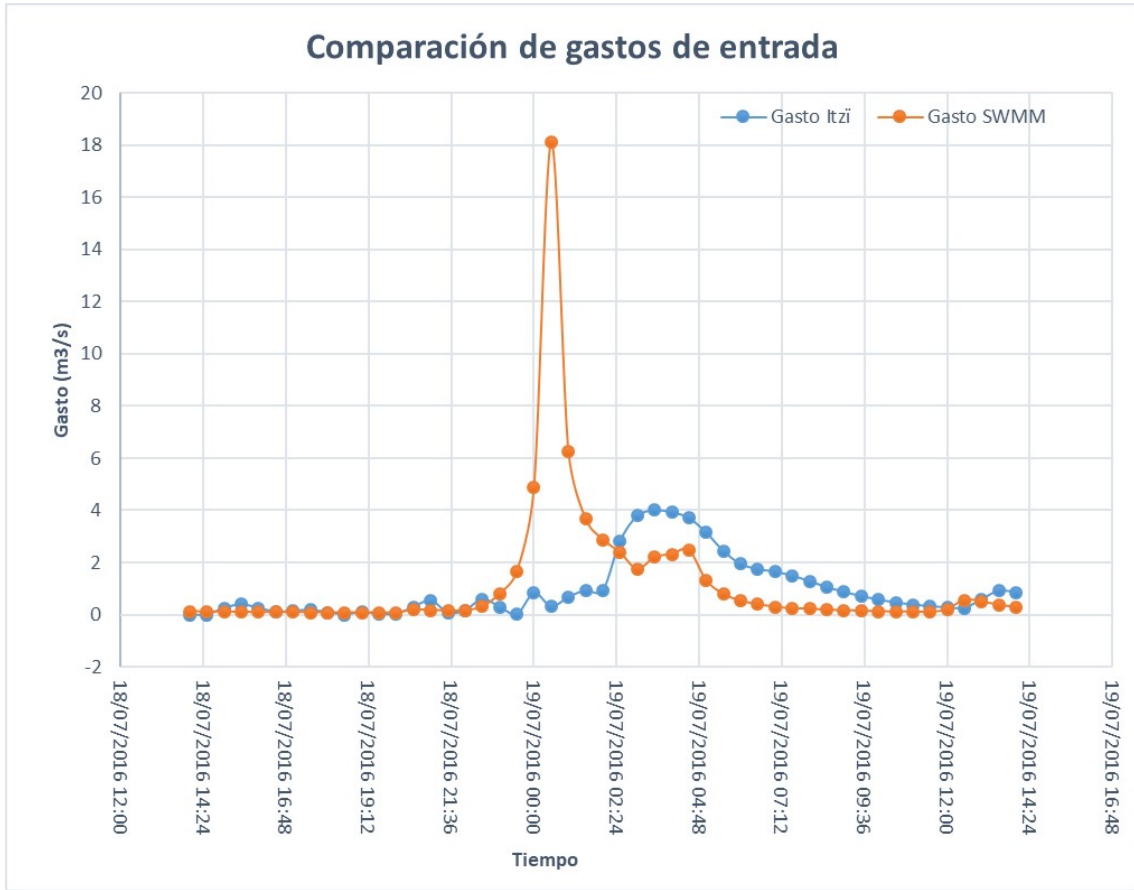
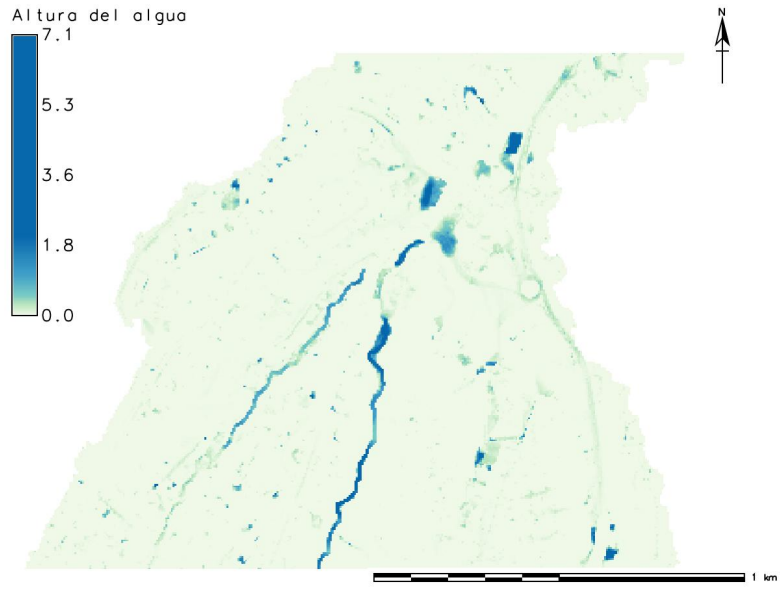
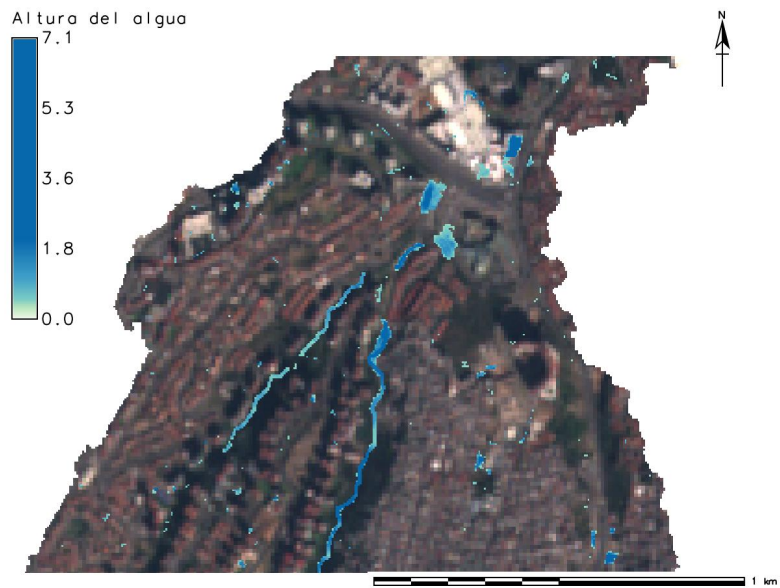


Figura 7-19: Comparación de gastos de entrada entre SWMM e Itzi.

Dado que la red de drenaje en el modelo acoplado no genera el nivel esperado en el jardín, se realizó una simulación con un porcentaje de sedimentos del 50% ya que en un reportaje relacionado con el evento se menciona que los tubos funcionaron al menos a la mitad de su capacidad (Azteca Noticias, 2016a). Así mismo, debido a la cantidad de basura se propone un 90% de sedimentos en las entradas al drenaje ya que en estas fue donde se menciona que se generó un tapón debido al exceso de esta, figura 7-21, los resultados se presentan en la tabla 7-5.



(a) Niveles obtenidos con el modelo acoplado.



(b) Imagen satelital con los niveles obtenidos del modelo acoplado.

Figura 7-20: Niveles obtenidos con el modelo acoplado.



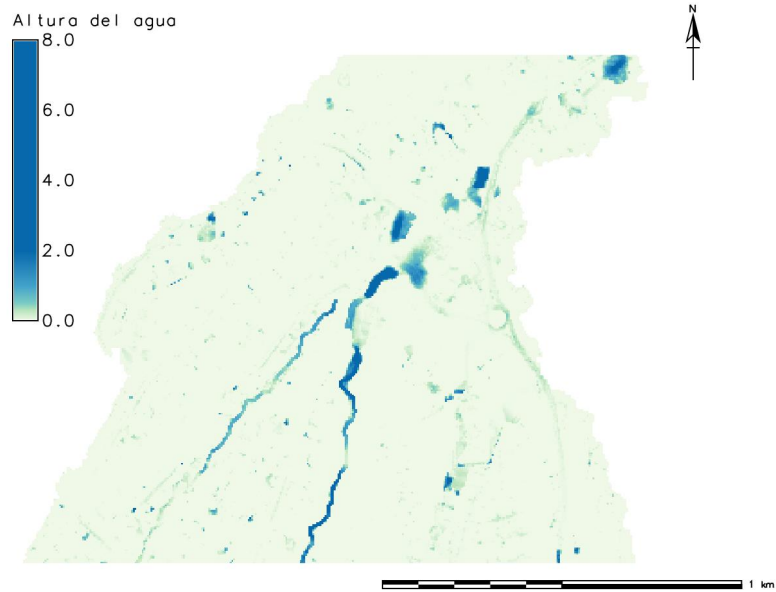
Figura 7-21: Tapón generado por la basura en las entradas al drenaje (Fernández, 2016).

Máxima Observada	Máxima simulada (SWMM)	Máxima simulada (Acople)
1m $\pm 0,20m$	1.29 m	1.18 m

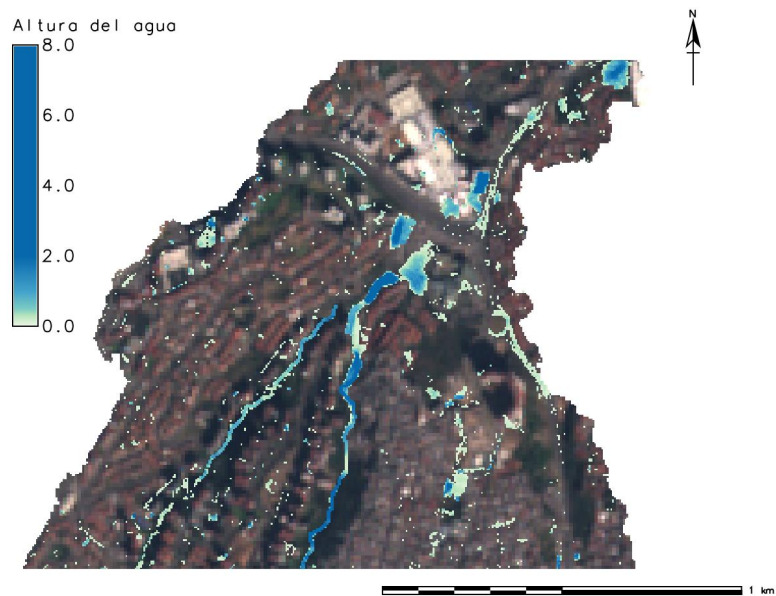
Cuadro 7-5: Niveles del agua (m) (tapón y tubería al 50 % de su capacidad).

Al comparar el nivel con las condiciones del tapón de basura y el funcionamiento de la red al 50 % de su capacidad, los niveles observados, a partir de SWMM e Itzi se encuentra en un rango de $\pm 0,10m$ comparado con el nivel observado, así mismo la mancha de inundación se ve con mayor alcance y mayor altura del agua, representando más la realidad del evento, figura 7-22.

La diferencia entre los resultados con la red de drenaje calibrada en SWMM y la red con las condiciones críticas, puede ser debido a la utilización del Modelo Digital de Elevación (MDE), lo que mejora el cálculo del flujo superficial en zonas urbanas. Lo más representativo, son las condiciones del drenaje, la cantidad de basura que existía en el cauce que se modeló como porcentaje de sedimentos en la red e indirectamente como el coeficiente de fricción, lo cual es muy difícil modelar y por último la forma en que las cuencas en SWMM son modeladas ya que en esta parte pierde realismo para las simulaciones.



(a) Niveles obtenidos con el modelo acoplado



(b) Imagen satelital con los niveles obtenidos del modelo acoplado

Figura 7-22: Niveles obtenidos con el modelo acoplado (Tapón en las entradas de la red y tuberías al 50% de su capacidad).

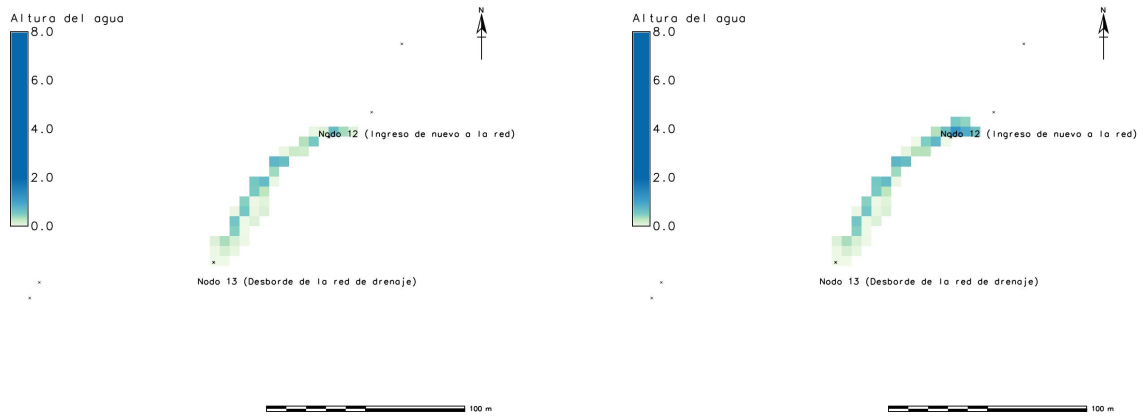
7.8. Conclusiones

En este trabajo se aplicó un modelo de inundación, el cual integra la solución numérica de redes de drenaje con la capacidad de reproducir la interacción del drenaje con los flujos superficiales.

El modelo reprodujo la compleja interacción entre el flujo superficial y el de drenaje del sistema analizado ya que en el nodo 13, que se forzó a el desborde, el modelo superficial simula el recorrido del agua desde la salida del nodo 13 hasta la entrada en el nodo 12 figura 7-14; tramo que es a cielo abierto, mostrando una elevación del agua que fluye en ese tramo del cauce. Lo anterior indica que el modelo reproduce el flujo en superficie y el flujo en la red de drenaje figura 7-23.

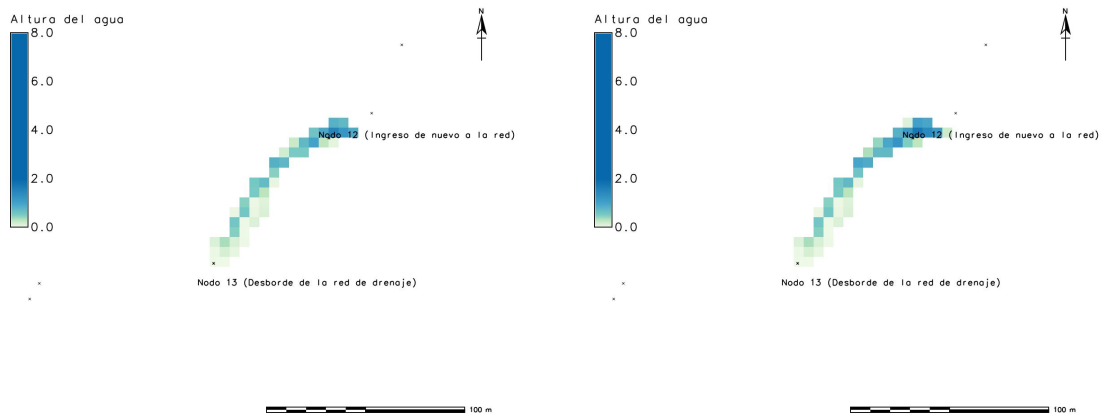
Se reconocen las incertidumbres asociadas a este caso de estudio; las cuales se deben principalmente a la falta de información de la red de drenaje a un nivel detallado (por ejemplo, líneas primarias y secundarias, estado de la red, pendientes, pozos de visita, etc.). Cabe recordar que la red se modeló con un diámetro de 2.4 m y pendiente de 0.013 y los nodos se colocaron para seguir la ruta del drenaje del mapa figura 7-8, no como pozos existente de la red, debido a que no se cuenta con información precisa de las características y estado de la red, así mismo los parámetros como el n de Manning y de sedimentos, se eligieron de una calibración que reproducía los niveles no quiere decir que son los parámetros reales de la red. Es muy común la falta de información, especialmente en países en desarrollo. Se logró una reproducción del evento adecuada, aun sin contar con la información precisa para representar la red de drenaje.

La ventaja de los modelo 1D se ve representada en el tiempo de cálculo pero la utilización de estos modelos es útil para modelar redes de drenaje de manera rápida para estimar las dimensiones de las redes, recordemos que antes los drenajes se diseñaban bajo el régimen de desalojar completamente los gastos de diseño (no existían desborde en los pozos de visita), pero estos gastos se han visto superados por causas como la urbanización o el cambio climático por lo que la utilización de los modelos acoplados ya es una necesidad debido a que estos dan un alcance de inundación y por consiguiente de daños si la red se ve superada por los flujos dentro de la red.



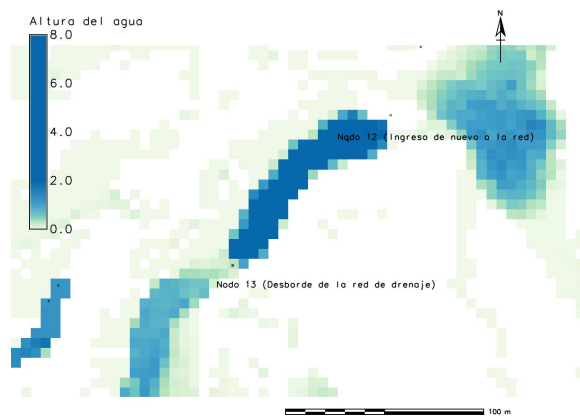
(a) 18/07/2016 03:00:00 p. m.

(b) 18/07/2016 03:30:00 p. m.



(c) 18/07/2016 04:00:00 p. m.

(d) 18/07/2016 04:30:00 p. m.



(e) 19/07/2016 02:30:00 a. m.

Figura 7-23: Intercambio de flujos entre el superficial y el drenaje.

Tiempo de simulación (SWMM)	Tiempo de simulación (Itzī)
3 min	6 hr

Cuadro 7-6: Tiempo de simulación (Número de nodos de la red 34, número de celdas modelo superficial 617701 de 5x5 m, maquina con sistema Ubuntu 18.04.1 LTS 16 Gb de memoria RAM Procesador Intel Core i7-4770 CPU@3.40Ghzx8).

Las ventajas dentro de los modelos acoplados es la utilización de los modelos digitales de elevación (MDE) ya que estos cada vez son más detallados, lo cual ayuda mucho al cálculo del flujo superficial lo que permite realizar una deducción más precisa en las cuencas urbanas.

El modelo tiene la capacidad de representar eventos del mundo real siempre que se tenga buena información y se disponga de datos adecuados para modelar correctamente la red, generando resultados útiles para diseñar, evaluar, y gestionar las redes de drenaje y evitar futuros daños. De forma notable, el modelo utilizado está disponible de forma abierta y gratuita al público, lo cual lo convierte en una herramienta muy útil para el desarrollo de problemas de hidráulica urbana en México.

Bibliografía

- Alfredo, J., V. Ojeda y M. Eng (2003). “Modelación Numérica en Hidráulica MODELACION NUMERICA EN HIDRÁULICA”. En: URL: www.geocities.com/PepeVasquez2003.
- Azteca Noticias (2016a). *Basura la causante del desbordamiento del río la Coyotera - YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Jv91xHiCGIM>.
- Azteca Noticias (2016b). *La Coyotera: Basura provocó desbordamiento en Huixquilucan - YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Txp2arWlwy8>.
- Behnel, S., R. Bradshaw, C. Citro, L. Dalcin, D. S. Seljebotn y K. Smith (2011). “Cython: The best of both worlds”. En: *Computing in Science and Engineering* 13.2, págs. 31-39. ISSN: 15219615. DOI: 10.1109/MCSE.2010.118. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MCSE.2010.118>.
- Boletín UNAM-DGCS-577 (2017). *Lluvias más cortas y de mayor intensidad en la Ciudad de México*. URL: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017_577.html.
- Chen, A. S., S. Djordjević, J. Leandro y D. A. Savić (2007). “The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks”. En: *Novatech 2007*, págs. 465-472. DOI: 2042/25250.
- Chen, A. S., J. Leandro y S. Djordjević (2015). “Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations”. En: DOI: 10.1080/1573062X.2015.1041991. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/43094957.pdf>.
- Chow (1959). *Manning's n Values*. URL: http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm.

- Courty, L. G. (2018). “Integrated modelling of overland flows and drainage networks in a urban environment”. En: pág. 103. DOI: 10.17605/OSF.IO/38W4T.
- Courty, L. G., A. Pedrozo-Acuña y P. D. Bates (2017). “Itzi (version 17.1): An open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation”. En: *Geoscientific Model Development* 10.4, págs. 1835-1847. ISSN: 19919603. DOI: 10.5194/gmd-10-1835-2017.
- De Almeida, G. A. M. y P. Bates (2013). “Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling”. En: *Water Resources Research* 49.8, págs. 4833-4844. ISSN: 00431397. DOI: 10.1002/wrcr.20366.
- Eckstein, D., V. Künzel y L. Schäfer (2018). *Global climate risk index 2018: Who suffers most from Extreme weather events? Weather-related loss events in 2016 and 1997 to 2016*, págs. 1-36. ISBN: 9783943704600. URL: <https://germanwatch.org/en/download/7170.pdf>.
- Fernández, E. (2016). *Se desborda río La Coyotera en Huixquilucan*. Huixquilucan, Méx. URL: <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/edomex/2016/07/18/se-desborda-rio-la-coyotera-en-huixquilucan>.
- Forbes México (2017). *En México se pierden cada año 230 mdd por inundaciones*. URL: <https://www.forbes.com.mx/mexico-pierden-230-mdd-cada-ano-por-inundaciones/>.
- GRASS Development Team (2017). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 7.2*. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.11.014. URL: <http://grass.osgeo.org>.
- Green, N. (1988). “Principles of geographical information systems for land resources assessment. P. A. Burrough. Publisher Oxford University press 1986 (paperback) (193 pp) ISBN 0 19 854592 4”. En: *Journal of Quaternary Science* 3.1, págs. 108-108. ISSN: 02678179. DOI: 10.1002/jqs.3390030115. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/jqs.3390030115>.
- UN-Habitat (2011). “State of the World’s cities 2010/11”.
- Hoy Estado (2016). *Inundan lluvias a Huixquilucan*. URL: <https://www.hoyestado.com/gallery-view/inundan-lluvias-a-huixquilucan/#prettyPhoto>.
- Huixquilucan TV Oficial (2016). *RECORRIDO POR ZONAS AFECTAS - RÍO COYOTERA - YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=URM3b-B-h08>.
- IBER (2018). *IBER*. URL: <https://www.flumen.upc.edu/es/documentacion/software/iber>.

- INEGI (2017). *Relieve continental*. URL: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>.
- Itzi (2018). URL: <https://www.itzi.org/about/>.
- Jenner, L. (2015). “GPM Science Objectives”. En: URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/science/index.html.
- Jha, A. K. y R. Bloch (2011). *Ciudades e Inundaciones Guía para la Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21*, pág. 59. ISBN: 9780821388662. URL: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Situation_Report_156.pdf.
- Jiménez Cisneros, B. (2014). “AGUA, ciudades y futuro”. En: 7.M, págs. 14-19.
- Kloss, G. K. (2014). “Automatic C Library Wrapping–Ctypes from the Trenches Automatic C Library Wrapping Ctypes from the Trenches Computer Science Institute of Information & Mathematical Sciences Massey University at Albany , Auckland , New Zealand Ctypes”. En: January 2008.
- Koncagül, Engin, Tran, Michael, Connor, Richard, Uhlenbrook, Stefan y Wwap (2018). “Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua, cifras y datos; 2018”. En: URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002615/261579s.pdf>.
- Nanía, L. S., A. S. Leon y M. H. García (2014). “Hydrologic-Hydraulic Model for Simulating Dual Drainage and Flooding in Urban Areas : Application to a Catchment in the Metropolitan Area of Chicago”. En: *Journal of Hydrologic Engineering* 20.2005, págs. 1-13. ISSN: 10840699. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001080,04014071.
- Número de habitantes. Estado de México* (2015). URL: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/poblacion/>.
- OCAVM SISTEMA DE LLUVIA* (2017). URL: <http://www.aquaweb.mx/OCAVM>.
- Rossman, L. A. (2017). “Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics”. En: *U.S. Environmental Protection Agency II*. Mayo, pág. 190. URL: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.

- Rossman, L. A., W. C. Huber, U. States y E. Protection (2016). “Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology”. En: *U.S. Environmental Protection Agency* I. January, pág. 231. DOI: EPA/600/R-15/162A. URL: www2.epa.gov/water-research.
- Rubinato, M., R. Martins, G. Kesserwani, J. Leandro, S. Djordjević y J. Shucksmith (2017). “Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions”. En: *Journal of Hydrology* 552, págs. 421-432. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.024. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169417304286>.
- Sampson, C. C., P. D. Bates, J. C. Neal y M. S. Horritt (2013). “An automated routing methodology to enable direct rainfall in high resolution shallow water models. Hydrological Processes”. En: *Hydrological Processes* 27, págs. 467-476. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.9515>.
- Seyoum, S., Z. Vojinovic, R. Prince y S. Weesakul (2012). “Coupled 1D and Noninertia 2D Flood Inundation Model for Simulation of Urban Flooding”. En: *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 138. July, págs. 642-652. ISSN: 0733-9429. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.
- Soler, A. (2016). *Inundacion / Tsunami en Huixquilucan - YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=WzFJAiGpWEg&t=167s>.
- TELEMAC-3D (2018). *TELEMAC-3D*. URL: <http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=18>.
- Velasco, M. d. l. A. (2016). *Río se desborda otra vez; se inundan 35 viviendas / Excélsior*. URL: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/08/11/1110202>.