

## Modelo bidimensional para el estudio y análisis de inundación en la ciudad de Durango, Dgo

### Two-dimensional model for the study and analysis of flood in the city of Durango, Dgo

BUSTAMANTE-ESPINOSA, Laura Virginia†, HINOJOSA-LÓPEZ, Cesar Octavio y LLAGUDO-GUILBERTO, Oscar Jesús

*Universidad Politécnica de Francisco I. Madero*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Laura Virginia, Bustamante-Espinosa*

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Cesar Octavio, Hinojosa-López*

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Oscar Jesús, Llagudo-Guilberto*

Recibido 28 Septiembre, 2018; Aceptado 12 Diciembre, 2018

#### Resumen

El presente trabajo describe un modelo bidimensional para la Ciudad de Durango, Dgo., el cual tiene como objetivo evaluar y analizar el porqué de las inundaciones en esa zona debido a que es una problemática constante, causando afectaciones en las diferentes infraestructuras. Para su estudio se llevó a cabo primeramente, un análisis topográfico con apoyo de modelos digitales de elevación en las subcuencas que se encuentran al noroeste de la ciudad. Posteriormente se realizó un análisis hidrográfico con el que se determinó el tipo de suelo y la N de escurrimiento, uso de suelo para la obtención de la N ponderada la cual se obtendrá con el método de los números de escurrimiento empleado por el United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. Y finalmente, un análisis hidrológico con estaciones climatológicas además de los datos de lluvia para tener máximos mensuales y anuales por medio del software AFA, dando como resultado los diferentes datos de los periodos de retorno, a través de un análisis de estaciones ESIME y cálculos matemáticos se tienen los hietogramas. Y obtener la simulación bidimensional y los mapas de tirantes y velocidades que se presentan en las subcuencas de estudio.

#### Inundación, Hietogramas, Software

#### Abstract

This article describes a two-dimensional model for the city of Durango, Dgo., Which aims to evaluate and analyze floods in that area because it is a constant problem that causes damage to the different infrastructures. For its study, a topographic analysis was carried out with the support of digital elevation models in the sub-basins located northwest of the city. Subsequently, a hydrographic analysis was carried out to determine the type of soil and the N of runoff, land use to obtain the weighted N that will be obtained with the method of runoff numbers used by the Soil Condition Service of the Department of Agriculture of the United States. And finally, a hydrological analysis with climatological stations in addition to the rain data to have monthly and annual maximums through the AFA software, which results in the different data of the return periods, through an analysis of ESIME stations and mathematical calculations. you have the hietograms And get the two-dimensional simulation and maps of tie rods and velocities that occur in the study sub-basins.

#### Flood, Hietograms, Software

**Citación:** BUSTAMANTE-ESPINOSA, Laura Virginia, HINOJOSA-LÓPEZ, Cesar Octavio y LLAGUDO-GUILBERTO, Oscar Jesús. Modelo bidimensional para el estudio y análisis de inundación en la ciudad de Durango, Dgo. Revista de Ingeniería Mecánica. 2018. 2-8: 18-25.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos de cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consciente explotación; sin embargo, junto con las ventajas existen también situaciones extremas, como inundaciones y sequías. En el mundo, las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre, causando severos daños económicos.

Existen diferentes formas de examinar las inundaciones. Hunt las analiza como un desastre natural en el que se deben identificar los peligros y la vulnerabilidad para poder superarlos (Hunt, 2002). El Centro Nacional de Prevención al Desastre (Cenapred, 2006), por el contrario, no maneja los desastres como naturales sino como producto de las condiciones de vulnerabilidad y exposición.

En algunos otros trabajos, Herrera-Díaz, Rodríguez-Cuevas, Couder-Castañeda y Gasca-Tirado (2015), así como Flowers-Cano, Jeffrey-Flowers y Rivera-Trejo (2014), al igual que Young (2002), combinan los métodos estadísticos y determinísticos para analizar datos pasados y predecir los niveles de inundación y de ríos. Por su parte, Bayliss y Reed (2001) discuten diferentes formas de estudiar las inundaciones históricas y revisan métodos para incorporar datos históricos al análisis de frecuencias de inundaciones.

Se puede incorporar información meteorológica para fortalecer la estimación del riesgo; la lluvia puede ser un notorio indicador fiable de la inundación (Duncan, 2002). Sin embargo el riesgo abarca dos aspectos: peligro (P) y vulnerabilidad (V) (Mileti, 1999), aunque si bien no es la única definición que se maneja para el riesgo, sí es una de las más utilizadas. Ordaz incluye un tercer factor para la expresión del cálculo de riesgo por algún fenómeno natural (Ordaz, 1996), el costo (C) o valor de los bienes expuestos; entonces, el riesgo es producto de tres factores:  $R = V \times C \times P$ .

En cuanto al peligro, se deben calcular las probabilidades de que ocurra un fenómeno que pueda dañar lo expuesto (Ordaz, 1996). Por el efecto de las inundaciones, el riesgo puede ser generado por lluvias, ciclones tropicales o falla de obras hidráulicas.

## Objetivos

### Objetivo general

Generar un modelo bidimensional que refleje la problemática de las inundaciones en la ciudad de Durango, Durango, apegándose a los diferentes métodos teóricos que se requieran para la realización de la misma.

### Objetivos específicos

- Obtener los datos terrenos, precipitación, eventos de tormenta, uso de suelo y edafología para realizar la modelación de inundaciones en la ciudad de Durango, Durango.
- Analizar la problemática de inundaciones en la ciudad de Durango, Durango
- Realizar mapas de tirantes y velocidades de inundación que expongan las zonas vulnerables para cada periodo de retorno.
- Conocer el volumen necesario de una presa rompepicos para mitigar la avenida de 100 años en las Cuencas 1, 2 y 3.

## Metodología

El modelo de simulación propuesto fue planteado mediante la utilización del “método hidrológico-hidráulico”. Este tipo de método parte de la premisa de que en nuestra zona de estudio se produzca un evento que genere caudales anormalmente altos, lo cual genere una crecida o avenida fluvial. Una vez que ese hecho se dé, la caracterización temporal de esos caudales y su posterior análisis será fundamental para definir el hietograma y el posterior hidrograma para poder asignar así una probabilidad de ocurrencia al evento.

El estudio hidrológico de las crecidas se puede abordar desde dos métodos diferentes, directos o indirectos., El método usado para nuestro caso, el método hidrometeorológico. Su función es convertir las variables meteorológicas en escorrentía superficial, para lo cual convertimos precipitaciones en forma de lluvia en caudales (también conocido como método precipitación-escorrentía).

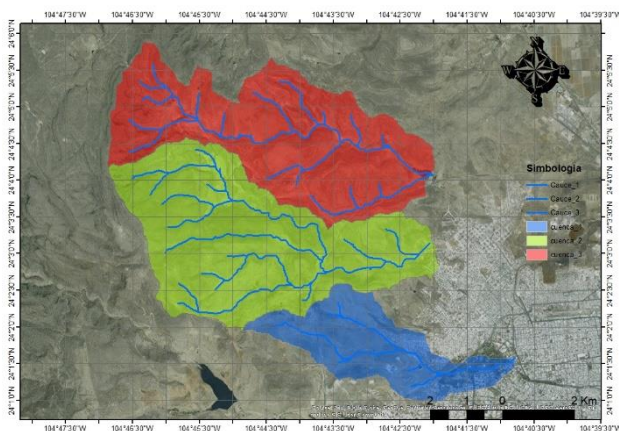
Como consideramos nuestra cuenca de estudio una zona homogénea (con respuesta hidrológica homogénea), el modelo tendrá carácter pseudodistribuido y se usará la fórmula del hidrograma unitario (Sherman, 1932).

Para el estudio pluviométrico, no solo se uso la cantidad de precipitación total diaria, sino también su distribución temporal y su valor areal sobre la cuenca de estudio.

La situación geográfica de la cuenca de estudio (Fig 1) es muy importante ya que define el clima predominante en esta, y por lo tanto cómo será su régimen de precipitaciones. Para la delimitación de las cuencas y subcuencas de aportación en la zona de estudio se empleará la metodología siguiente:

1. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL).
2. Cartas topográficas escala 1:50000 de INEGI.
3. Plataforma de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0) y/o LIDAR.
4. Herramienta Hec-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension).
5. Shapefile de líneas de corriente y cuencas delimitadas.

A partir de la metodología se obtendrá el área de las 3 cuencas de estudio, para así después realizar la simulación en el modulo IBER.



**Figura 1** Delimitación de las cuencas

Con base al Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL) la cuenca RH11AF la cual engloba nuestra zona de estudio para lo cual se necesitó usar el sitio web del SIATL anteriormente se procedió a ubicar la zona de estudio en google earth para marcar puntos cercanos a la cuenca y así tener las coordenadas aproximadas a las 3 cuencas para lo cual solo se necesitaba un punto cercano para proceder a ubicar en el SIATL y obtener datos como longitud del cauce, pendiente y área de la cuenca.

Para el uso de modelos digitales de elevación se necesitó hacer uso nuevamente del punto generado en google earth para así cargarlo en el mapa digital de México v6 . 3.0 en el cual contiene las claves de las cartas topográficas escala 1:50000.

Mediante el uso de un modelo digital de elevación tipo CEM3.0, resolución de 15m con el uso de las cartas topográficas de una escala de 1:50000 (G13D81, G13D82, F13B11 y F13B12) se determinaron los rasgos fisiográficos de las micro cuencas ubicadas en la zona de estudio.

### Análisis hidrográfico

#### Método de los números de escurrimiento

Para esta parte del análisis hidrográfico se empleará el método de los números de escurrimiento del United States Department of Agriculture Soil Conservation Service para la obtención del volumen de escurrimiento directo a partir de la lluvia total y las características de la cuenca como lo es el uso y tipo de suelo (Tabla 1), (Aparicio 2008).

En cuencas agrícolas, forestales y urbanas pequeñas se utiliza para la estimación de un solo parámetro el N, esto con la finalidad de contribuir a reducir la incertidumbre de la calibración de los modelos de simulación de crecidas (Ares, Varni, Chagas, & Entraigas 2012).

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Suelos de gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezclas de ambas. estos generan el menor escurrimiento
B	Suelos de arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de arena y limo. generan escurrimiento inferior al medio
C	Suelos de arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad de mezcla de arena, limo y arcilla. generan escurrimiento superior al medio
D	Suelos arcillosos de alta plasticidad, con saborizantes casi impermeables cerca de la superficie. generan el mayor escurrimiento

Tabla 1 Clasificación de suelo

**Información del suelo**

De acuerdo con CONAGUA [1], para la determinación de N es común utilizar las cartas de uso de suelo y vegetación, así como las cartas edafológicas. La información del uso de suelo y vegetación se obtuvo de (INEGI, 2017), el cual se encuentra en formato vectorial escala 1:250000 serie V para su manejo en un sistema de información geográfica (SIG). En la Tabla 2, se muestra los diferentes usos de suelo y vegetación dentro de la zona de estudio.

Cuenca	Suelo	Clasificador	Tipo	Uso de suelo
1	Regosol	Eutrico	B	Asentamientos humanos
	Castañoze	Luvico	C	Asentamientos humanos
	Castañoze	Luvico	C	Bosque cultivado
	Regosol	Eutrico	B	Pastizal natural
	Castañoze	Luvico	C	Pastizal natural
	Castañoze	Luvico	C	Agricultura de temporal anual
	Regosol	Eutrico	B	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule
	Regosol	Eutrico	B	Zona urbana
	Castañoze	Luvico	C	Zona urbana
	2	Regosol	Eutrico	B
Regosol		Eutrico	B	Asentamientos humanos
Regosol		Eutrico	B	Pastizal natural
Regosol		Eutrico	B	Agricultura de temporal anual
Regosol		Eutrico	B	Agricultura de temporal anual
Regosol		Eutrico	B	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule
Regosol		Eutrico	B	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural
Regosol		Eutrico	B	Zona urbana
3	Regosol	Eutrico	B	Pastizal natural
	Regosol	Eutrico	B	Agricultura de temporal anual
	Regosol	Eutrico	B	Agricultura de temporal anual
	Regosol	Eutrico	B	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
	Regosol	Eutrico	B	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule
	Regosol	Eutrico	B	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural

Tabla 2 Relación de tipo y uso de suelo

**Análisis hidrológico**

**Ubicación de las estaciones climatológicas**

En México se cuenta con la información climatológica nacional que va de 1900 hasta la fecha donde se dispone de información actualizada por los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la CONAGUA, la cual implica aproximadamente 55 millones de registros diarios de lluvia en 24 horas y temperatura mínima y máxima, reportados por alrededor de 5,500 estaciones climatológicas (CNA-SMN, 2017).

En la zona de estudio se visualizaron varias estaciones climatológicas, pero se utilizarán las estaciones 10011,10023 y 10092 puesto que la dispersión de datos o datos faltantes en otras estaciones era muy notoria entonces en base a criterio se tomó en cuenta etas 3 estaciones las cuales no ayudaran a determinar y recopilar la información de lluvia (mm) para los diferentes periodos de retorno. Los datos de las estaciones climatológicas visualizadas por información de CONAGUA [1].

Estación	Nombre	Coordenadas geográficas		Altitud msnm	Fecha en que terminan e inician los registros		Años en que se inician con registro
		Long.	Lat.		Primer registro	Ultimo registro	
10011	Colonia Insurgentes	-104.636	23.98	1870	1982-01	2003-08	21.7
10023	El Pueblito	-104.735	23.96	1900	1963-08	2008-02	44.6
10092	Durango (DGE)	-104.673	24.02	1900	1941-01	2000-12	60

Se recomienda no usar series de datos menores a 20 años para análisis de frecuencias (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1977). A partir de las estaciones seleccionadas se puede observar que se cumple esta condición.

Para el análisis de datos de precipitación pluvial en nuestra zona de estudio se seleccionó la estación climática 10023 esto se debió a que la cernía con la zona de estudio era próxima por lo que así también las estaciones aledañas se ocuparían para el completado de datos y estas estaciones son la 10011 y la 10092.

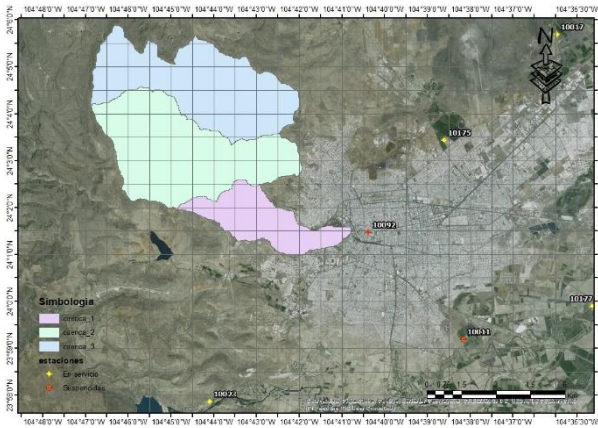


Figura 2 Ubicación de las estaciones climatológicas

### Resultados

Para la simulación de las subcuencas en el periodo de retorno de 2, 5, 10,100 y 1000 años se muestra que tanto en el mapa de tirantes y velocidades existen zonas de peligro donde los tirantes a partir de 0.30 metros ya afectan a los humanos y tirantes a partir de 1 metro afecta a las casas habitacionales para efectos representativos de la simulación bidimensional se presenta el mapa de tirantes con un tiempo de simulación de 10000 segundos ver Figura 3, Figura 5, Figura 7, Figura 9

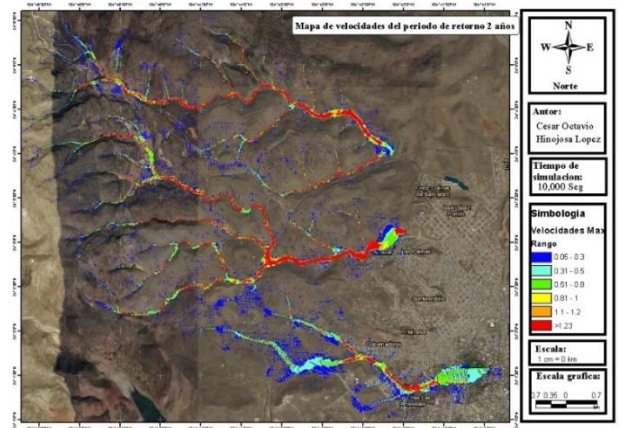


Figura 4 Mapa de velocidades Tr 2 años

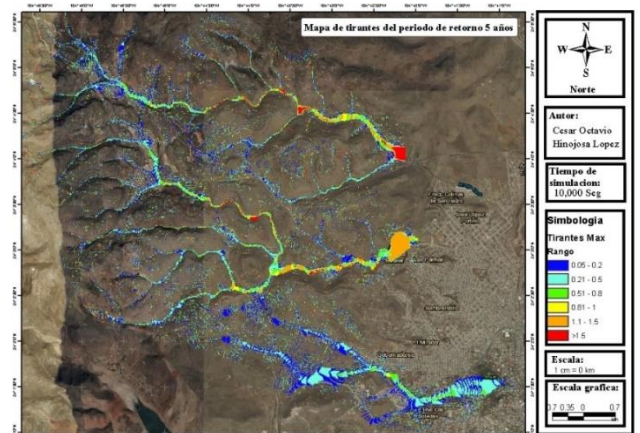


Figura 5 Mapa de tirantes Tr 5 años

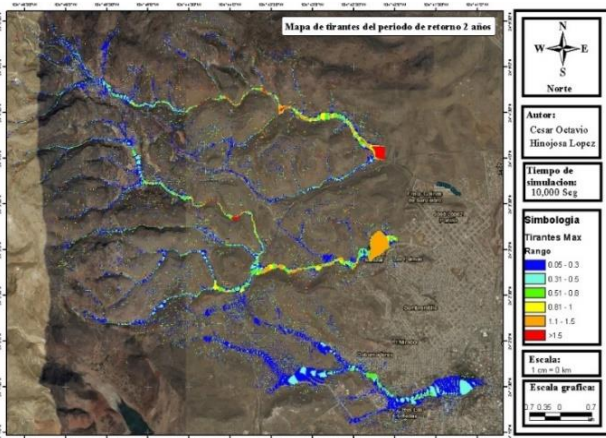


Figura 3 Mapa de tirantes Tr 2 años

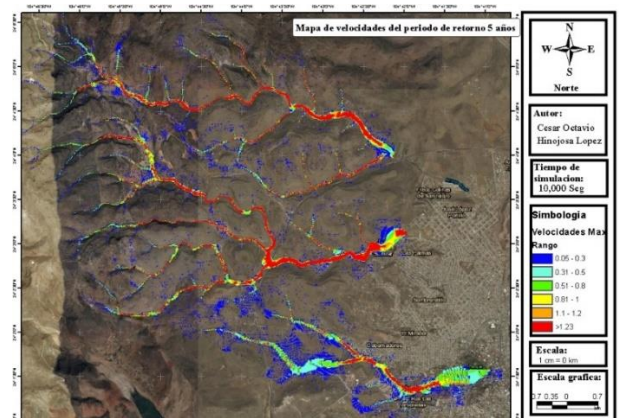


Figura 7 Mapa de velocidades Tr 5 años

Mapa de velocidades máximas para el periodo de retorno de 2, 5, 10,100 y 1000 años con un tiempo de simulación de 10000 segundos. Para lo cual se muestra que con velocidades excedentes a los 1.23 m/seg ya derriba a un humano por lo tanto se toma como zona de riesgo en caso de darse una inundación y dichas zonas se muestran en la Figura 4, Figura 6, Figura 8, Figura 10.

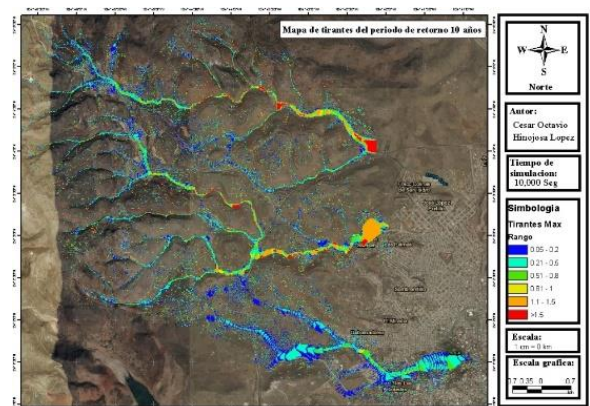


Figura 7 Mapa de tirantes Tr 10 años

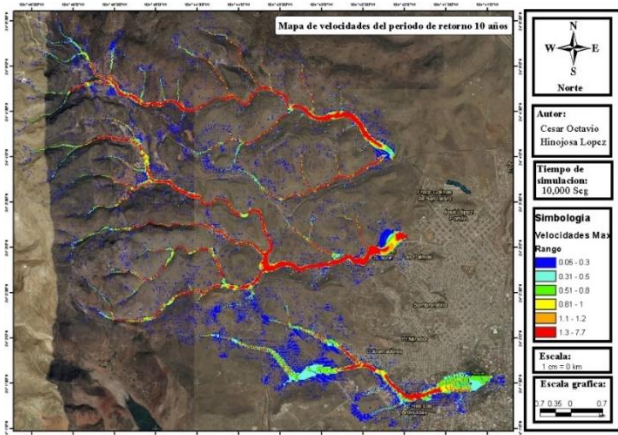


Figura 8 Mapa de velocidades Tr 10 años

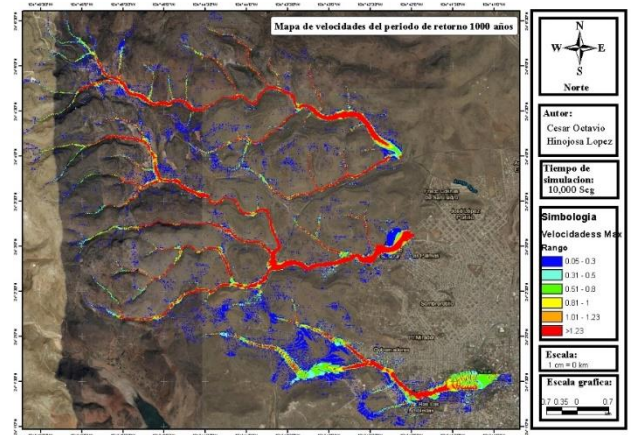


Figura 12 Mapa de velocidad Tr 1000 años

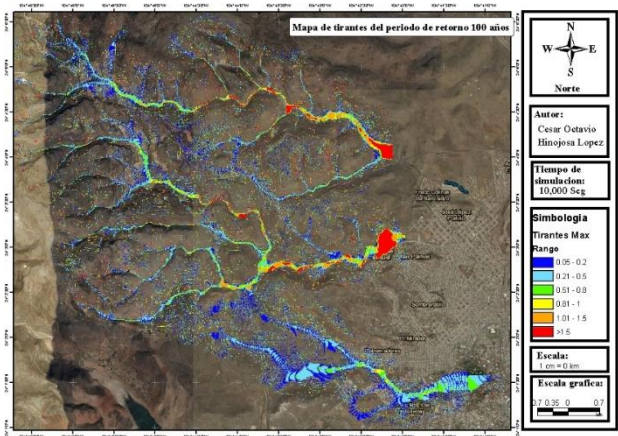


Figura 9 Mapa de tirante a 100 años

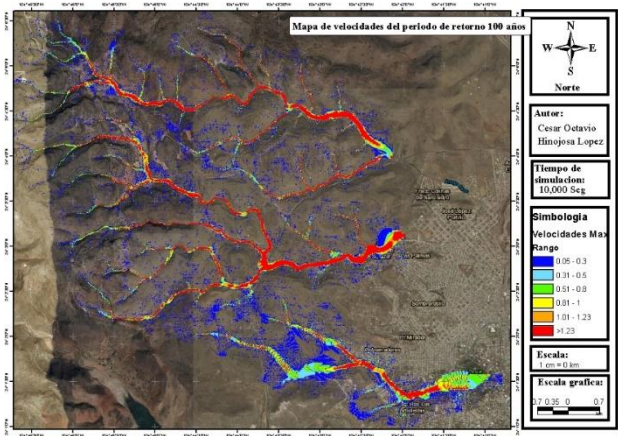


Figura 10 Mapa de velocidades Tr 100 años

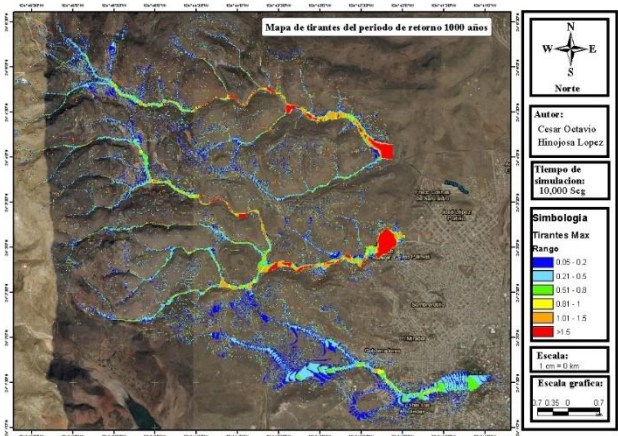


Figura 11 Mapa de tirante 1000 años

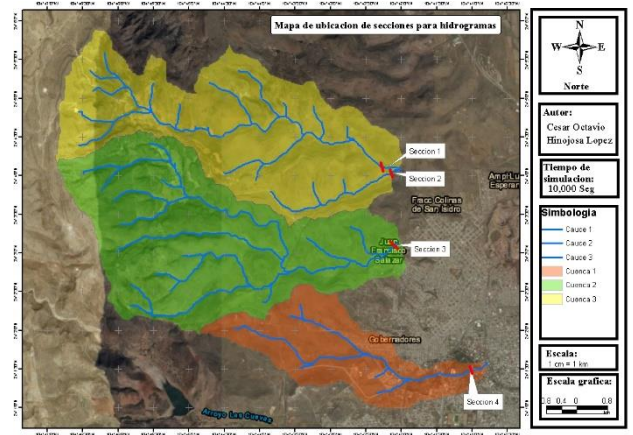


Figura 13 Secciones Hidrográficas

Con base a los hidrogramas se analizó la relación del tiempo en cuanto al gasto que se tiene en cada uno de los pasos de la simulación en este caso se analizó cada 100 segundos lo cual cada dato de los 10000 segundos de la simulación contiene un gasto diferente obtenido para lo cual se muestra el lugar de las 4 secciones el cual se tomó en el mismo lugar para cada uno de los diferentes Tr.

Los hidrogramas se utilizan para la realización de la modelación en HEC-HMS, lo cual nos ayuda a evaluar las inundaciones en la ciudad de Durango y así mitigarlas con el uso de algunas obras hidráulicas de retención como lo son las presas rompe picos Hidrogramas para cada Tr en cada una de las secciones Sección 1 con los diferentes hidrogramas para cada uno de los diferentes Tr analizados

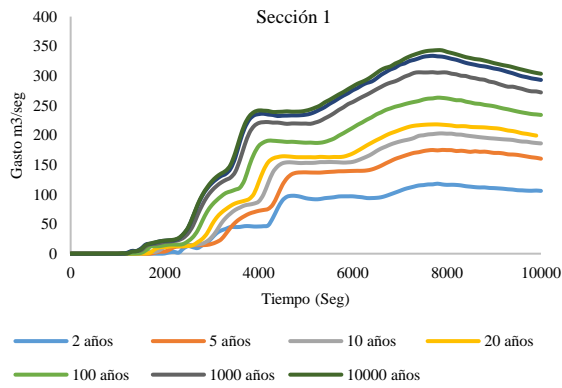


Figura 14 Sección 1 del hidrograma

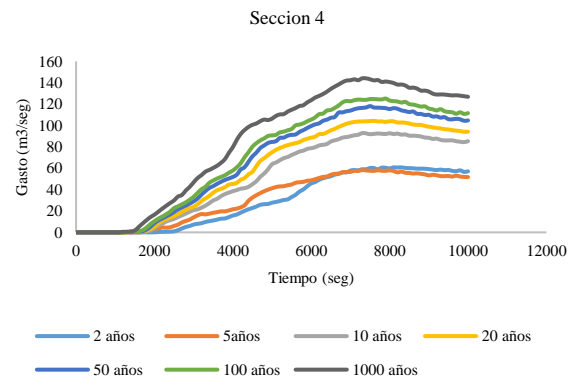


Figura 17 Hidrograma de la sección

Sección 2 con los diferentes hidrogramas para cada uno de los diferentes Tr analizados

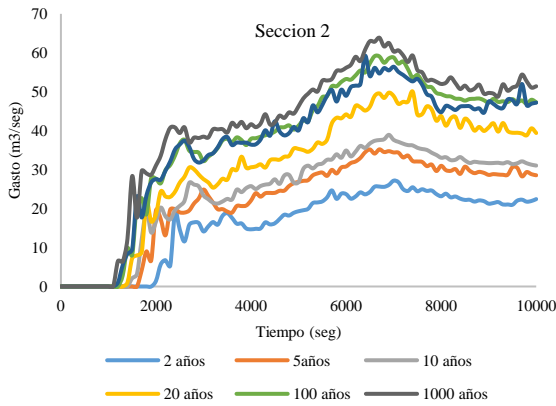


Figura 15 Sección 2

Sección 3 con los diferentes hidrogramas para cada uno de los diferentes Tr analizados

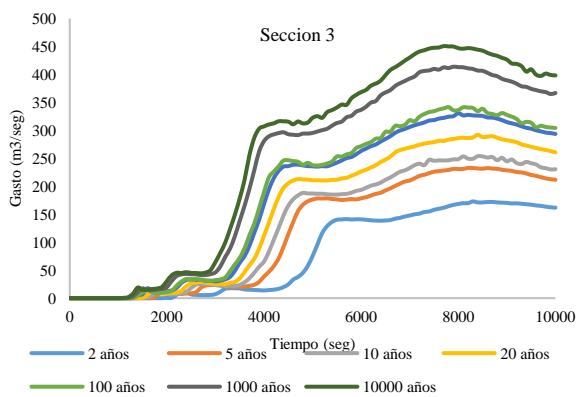
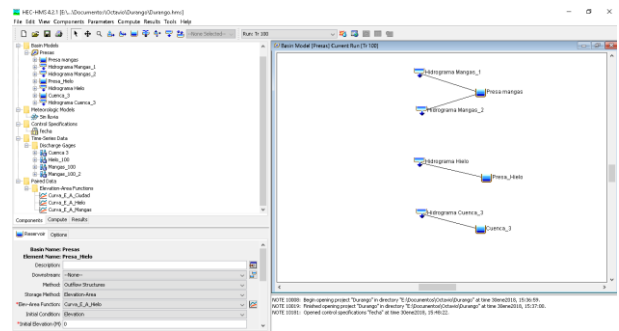


Figura 16 hidrograma de la sección

Sección 4 con los diferentes hidrogramas para cada uno de los diferentes Tr analizados

En la figura 17 se muestra el esquema de la modelación de HEC-HMS para la ciudad de Durango



Conclusiones

Para mitigar las inundaciones en la ciudad de Durango producto de las subcuencas ya descritas en este trabajo de estudio, se proponen el volumen de 3 obras. Con esto se regularían 800 m<sup>3</sup>/s en la cuenca 1, en la cuenca 120 m<sup>3</sup>/s y en la cuenca 3, 110 m<sup>3</sup>/s, y en la descarga se presenta 9 m<sup>3</sup>/s para descargar en arroyos que confluyen en la ciudad, esto permite no tener problemas en tiempo de lluvias y genera un ambiente de armonía entre la ciudadanía y su entorno.

Se recomienda el uso de modelos en IBER como herramienta para la simulación de inundaciones puesto que se toman datos como lo son el uso de suelo, n de Manning, perdidas por infiltración aparte de ser un software gratuito es muy fácil de manejar, solo se recomienda el uso de un equipo de cómputo de gama alta puesto que el tiempo de las simulaciones puede ser muy tardado en equipos de bajos recursos o en casos se llega a cerrar el programa por lo tanto es favorable tener un equipo de cómputo con altos recursos en memoria ram, procesadores y tarjeta gráfica.

## Agradecimientos

Al Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, por su valioso tiempo e infraestructura para el desarrollo de este trabajo.

## Referencias

- [1] CONAGUA. Agenda del Agua 2030. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011, 66 pp.
- [2] Atlas de riesgos naturales del municipio de Durango, [http://www.anr.gob.mx/PDFMunicipales/2012/10005\\_Durango.pdf](http://www.anr.gob.mx/PDFMunicipales/2012/10005_Durango.pdf) (2012)
- [3] INEGI sitio web, <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/Dur/Territorio/default.aspx?tema=ME&e=10> (2017)
- [4] Inundaciones, Publicado por la Secretaria de Gobernación y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (2004)
- [5] D. F. Campos Aranda Introducción a la Hidrología Urbana, (2010)
- [6] D. F. Campos Aranda, Procesos del Ciclo Hidrológico, Universidad de San Luis Potosí (1998)
- [7] Horton, r.e. the role of infiltration in the hydrologic cycle. Eos trans. Vol. 14, 1933, pp. 446-460.
- [8] Kull, d.w. and feldman, a.d. evolution of clark's unit graphs method to spatially distributed runoff. Journal of hydrologic engineering. Vol. 3, 1998, pp. 9-19.
- [9] Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#) (2017)
- [9] Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx> (2017)
- [10] Mapa digital de México de INEGI, <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAyLjE0NTY1LHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=> (2017)
- [10] Morin, J., Rosenfeld, D., And Amitai, E. Radar Rain field evaluation and possible use of its high temporal and spatial resolution for hydrological purposes. Journal of hydrology. Vol. 172, 1995, pp. 275-292.
- [11] ONU. Cómo desarrollar ciudades más resilientes, un manual para líderes de los gobiernos locales. Ginebra, switzerland: organización de las naciones unidas, 2012, 103 pp.
- [12] ONU. Vivir con el riesgo, informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. New york, usa/ginebra, switzerland: organización de las naciones unidas, 2004, 139 pp.
- [13] ONU. Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres 2011. Revelar el riesgo, replantear el desarrollo. Devon, united kingdom: organización de las naciones unidas, 2012. 190 pp.
- [14] Presidencia de la república. Sexto informe de gobierno [en línea]. México: servicio de internet de la presidencia, 2012 [citado el 01 de octubre de 2012].
- [15] Sherman, L.K. Stream Flow From Rainfall By The Unit Graph Method. Engineering news-record. Vol. 108, 1932, pp. 501-505.
- UNISDR. Reducción del riesgo de desastres: un instrumento para alcanzar los objetivos de desarrollo del milenio, kit de cabildeo para parlamentarios. Ginebra, switzerland: united nations international strategy for disaster reduction and unión interparlamentaria, 2010, 53 pp.