VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estimación de afectaciones económicas a la industria automotriz de Salamanca por inundaciones, mediante simulación numérica e información geoespacial y estadística

Estimation of economic impacts on the automotive industry of Salamanca due flooding by numerical simulation, geospatial and statistical information

Juan Ricardo Castañón Delgado[1], José Manuel Guerra Ricardo[2], Humberto Esqueda Oliva[3], Salvador Botello Rionda[4]
[1]Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Guanajuato, México
jr.castanondelgado@ugto.mx
[2]Estudiante de Comercio y Negocios Internacionales, Universidad Simón Bolívar, Colombia
jose.guerrar@unisimon.edu.co
[3]Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México
h.esqueda@ugto.mx
[4]Centro de Investigación en Matemáticas A.C. Guanajuato, México
botello@cimat.mx

Resumen

Las inundaciones son fenómenos naturales que frecuentemente impactan a las poblaciones humanas, provocando cuantiosas pérdidas materiales. Si bien el número de víctimas mortales que causan estos fenómenos se han reducido mucho por la cada vez mayor precisión en los pronósticos climáticos, y los planes de alerta y evacuación de las autoridades, siguen provocando cuantiosos daños materiales. Además de las afectaciones a las viviendas e infraestructura, también dejan secuelas importantes para la economía de las localidades que se ven impactadas por dichos fenómenos, cuyas consecuencias a largo plazo son más difíciles de evaluar. La ciudad mexicana de Salamanca, en el estado de Guanajuato, es un área muy susceptible a padecer esta clase de fenómenos, que la han azotado con cierta frecuencia a lo largo de su historia y siguen presentándose con cierta frecuencia. Su actividad económica es diversa y muy importante para la región, siendo una zona agrícola de gran productividad, además de que en ella está asentada una refinería y más recientemente se ha agregado la producción de automóviles. En este trabajo se intenta analizar el impacto que tienen las inundaciones sobre este sector industrial de Salamanca.

Palabras clave: Inundaciones; Salamanca; afectaciones económicas; sector industrial automotriz.

Introducción

A lo largo de su historia y prácticamente desde su fundación, la ciudad de Salamanca se ha visto afectada por inundaciones, debidas principalmente al desbordamiento del Río Lerma, el cual cruza la ciudad de oriente a poniente dividiéndola en dos partes. El Lerma es el río interior más largo del centro de México, con 708 kilómetros de longitud y que abarca un área de 48,132 km^2 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020). Se han construido algunas obras de infraestructura que han permitido controlar hasta un cierto punto las avenidas del Lerma aguas arriba de Salamanca, como la laguna de Yuriria desde la época colonial (construida en 1548), la presa Solís en Acámbaro (construida en 1549) y la presa Ignacio Allende (construida en 1969), ubicada en San Miguel de Allende y que regula el cauce del Río Laja, el cual es afluente del Lerma y se une con él unos pocos kilómetros antes de pasar por Salamanca.

A pesar de todo ello, se han producido algunas inundaciones severas en Salamanca en los últimos 30 años, siendo las más severas la de agosto del 2003 (Durán, 2023), y la de octubre del 2021 (Domínguez, 2021). Esta última afectó a la producción de la planta automotriz de la Mazda asentada a las afueras de Salamanca, la cual se inauguró en enero del 2014 y que se ha seguido ampliando desde entonces.
En este trabajo se intenta realizar una estimación de las pérdidas económicas que se podrían producir en caso de que se volvieran a presentar inundaciones severas por fenómenos extremos, debidos a dos causas principales: la lluvia que puede caer localmente sobre el municipio, y el aumento del cauce del Río Lerma y

otros cauces que cruzan por la zona y que también se han llegado a desbordar en el pasado. La inundación del 2021 no afectó a la planta principal de Mazda, pero sí al parque industrial Bajío Industrial Park donde se encuentran dos de sus compañías proveedoras clave (Mazda Logi y Servi Láminas). Esto llevó un paro completo del sistema de abastecimiento de componentes esenciales, obligando a la ensambladora a detener operaciones técnicas durante 48 horas (Domínguez, 2021).

En primer lugar se requiere analizar el riesgo por inundación, para lo cual existen diversas metodologías (Mudashiru et. al., 2021). Éstas se clasifican en deterministas o cuantitativas, y paramétricas o cualitativas. Las metodologías deterministas intentan reproducir directamente el fenómeno físico de la inundación propiamente dicho, y tienen la gran ventaja de que sus resultados son relativamente fáciles de visualizar e interpretar, proporcionando una serie de imágenes y animaciones que muestran cómo evoluciona la inundación en el tiempo, además de que permite reproducir eventos reales pasados, como simular eventos futuros variando la información de entrada. Las metodologías cualitativas se apoyan sobre todo en análisis estadístico, y su tratamiento depende mucho de la información histórica que existe sobre las zonas a analizar.

Una de las metodologías deterministas más utilizadas en la actualidad consiste en simular el flujo del agua sobre la superficie del terreno mediante la solución de las ecuaciones de aguas someras, también llamadas ecuaciones de Saint-Venant. En este trabajo en particular se usó Iber (Bladé et. al., 2014), un programa de uso libre que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant mediante volumen finito (Cea y Bladé. 2015) y que incorpora un esquema de paralelización mediante GPU, lo cual permite reducir el tiempo de cálculo. Esto es crucial porque una de las más fuertes desventajas de estos métodos es justo el tiempo que implica correr una simulación completa, y que resulta todavía más relevante cuando se quieren realizar múltiples cálculos sobre una misma región de interés (Esqueda et. al. 2022).

Ahora, para la estimación de las afectaciones económicas se emplea el enfoque cualitativo. La simulación numérica estima la duración y extensión de la inundación, pero el cálculo económico debe basarse en información estadística histórica. Al final de este trabajo se presenta una estimación de los daños producidos por la inundación del 2021, y un balance costo-beneficio de obras hidráulicas posibles para prevenir riesgos futuros.

Metodología de análisis

El trabajo se dividió en dos partes diferentes, abarcando las dos ramas consideradas aquí. Por un lado, se realizaron una serie de simulaciones numéricas del fenómeno de inundación a partir de información geoespacial pública, y por otro se realizó una estimación de las pérdidas económicas a la industria automotriz del municipio, basada en información y reportes de una inundación real ocurrida en octubre del 2021 y que afectó a la planta ensambladora de Mazda.

Simulación numérica del fenómeno de inundación

Se realizaron una serie de simulaciones con Iber suponiendo escenarios diferentes, partiendo de información geoespacial existente y variando los datos hidráulicos para analizar cómo evoluciona la inundación, cuál es el factor que más influye en ella (lluvia local o la crecida del río), cuáles son las zonas que resultan más afectadas en todos los casos, y cuánto tiempo dura la inundación en ellas. Para realizar una sola simulación en Iber se requiere preparar un modelo de cálculo, para lo cual se necesita la siguiente información esencial:

- Imágenes satelitales georreferenciadas y mapas de tipo de uso de suelo en la región a estudiar. La resistencia al flujo del agua sobre su superficie se caracteriza mediante un coeficiente de rugosidad, y es usual asociarlo con el tipo de uso del suelo que se tiene. Con esa información se genera una malla de triángulos que caracteriza el dominio a estudiar, y a su vez permite resolver las ecuaciones de Saint-Venant mediante métodos numéricos. Iber emplea el método del volumen finito para ello.
- Modelos de Elevación Digital (conocidos por los acrónimos en inglés DTM o DEM) que caracterizan el relieve topográfico. Debe tener una resolución tal que se distingan claramente los cauces por los cuales el agua fluye a través del terreno, así como las zonas en que ésta puede acumularse. La

información contenida en ellos permite modificar las elevaciones de los puntos que definen los triángulos en la malla de cálculo originalmente plana, obteniéndose así una superficie tridimensional.

- Entradas de agua en el dominio, caracterizados por gráficas de la cantidad de lluvia que cae sobre una unidad de área por unidad de tiempo (hietogramas), y curvas flujo de agua a la entrada de los cauces que crucen el área de interés (hidrogramas). La lluvia se aplica directamente sobre el área a estudiar, y el flujo en los cauces se aplica sobre las fronteras del dominio de cálculo, por donde el agua ingresa a la zona que se pretende simular.

Además de lo anterior, se debe especificar la manera en que el agua puede salir del domino de cálculo, pudiendo ser borde cerrado o borde libre. Se pueden indicar también condiciones iniciales de altura de agua cuando se tienen embalses en el interior del dominio. Es posible también considerar la infiltración del agua en el terreno, pero es algo más complicado de asignar y calibrar y por ello no se tomó en cuenta en este trabajo. Una vez que se tienen todos los datos cargados en el modelo, se define el tiempo total que abarcará la simulación, y los intervalos de tiempo en que se desea visualizar los resultados. Entre más tiempo se quiera abarcar en la simulación (que puede ser desde unas horas hasta varios días o semanas), aumentará el tiempo de cómputo que se requiere para que el programa termine el cálculo completo.

Si queremos simular diferentes escenarios en el mismo dominio de cálculo, podemos modificar los valores de los datos de entrada de agua, realizando variaciones a partir de información encontrada en bases de datos consultadas. En este caso se varió tanto la precipitación pluvial, como el flujo del Río Lerma a su entrada en el dominio de cálculo. Para ello se emplearon datos publicados por la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA].

Cabe señalar que, si se corre la simulación con Iber en una computadora convencional, el tiempo de cómputo para completar la ejecución de una sola prueba puede demorar varios días, lo que se puede reducir mucho si se ejecuta Iber en tarjetas gráficas habilitada para cálculo con CUDA (GPU) en lugar de los procesadores normales. Para este trabajo se empleó una computadora equipada con una GPU Nvidia de penúltima generación, así como acceso los equipos del Laboratorio de Supercómputo del Bajío administrado por el Centro de Investigación en Matemáticas [CIMAT A.C.], el cual tiene computadoras con tarjetas gráficas muy potentes para cálculo. De esta manera, el tiempo de ejecución de una sola prueba se redujo de varios días a unas pocas horas, siendo posible además ejecutar varias pruebas al mismo tiempo en diferentes máquinas.

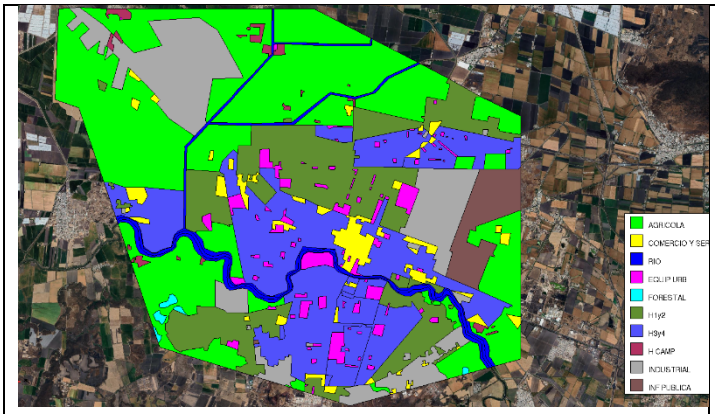
Estimación de afectación económica al sector automotriz

Para calcular el impacto económico que tendría el fenómeno de inundación en el sector, se parte de información encontrada en diferentes fuentes y reportes públicos sobre la planta Mazda instalada en Salamanca, y que se derivan del paro técnico de la planta que se tuvo en octubre del 2021. La producción anual de Mazda Salamanca reportada por el INEGI fue de 127,293 unidades ensambladas en 2021, de la cual se obtuvo un promedio diario de fabricación dividiendo entre los días laborables del año. Ese promedio se multiplicó por los dos días de paro (4 y 5 de octubre) para estimar las unidades que se dejaron de fabricar, mismas que se convirtieron a valor monetario usando el tipo de cambio promedio de octubre de 2021. A esta cifra base se sumaron tres variables adicionales calculados de forma independiente: la pérdida salarial de los trabajadores que no llegaron a laborar, los daños materiales reportados en las empresas proveedoras del parque industrial, y las penalizaciones contractuales estimadas por los retrasos en los envíos de exportación. La suma de estos cuatro conceptos constituye el total de pérdidas estimadas para 48 horas de inactividad.

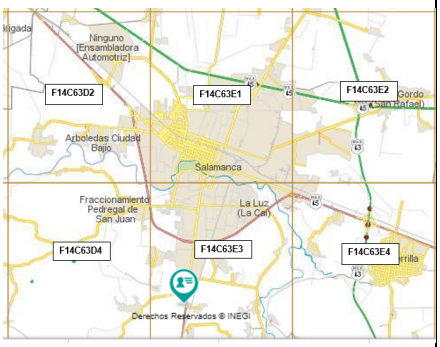
Caso de análisis: área urbana y parques industriales de Salamanca

La zona de estudio abarcó prácticamente toda la mancha urbana de la ciudad de Salamanca, incluyendo la totalidad de la refinería Antonio M. Amor y el parque industrial automotriz de Mazda ubicada al noroeste de la ciudad, entre la carretera federal 45 y la autopista 45D que conducen hacia Irapuato. Se empleó el mapa de uso de suelo del Instituto Municipal de Planeación de Salamanca actualizado al 2022 (IMPLAN, 2023), además de fotografías satelitales disponibles en Google Earth. En base a esa información se elaboró el modelo de cálculo para Iber. Se utilizó información topográfica del Instituto Nacional de Estadística y

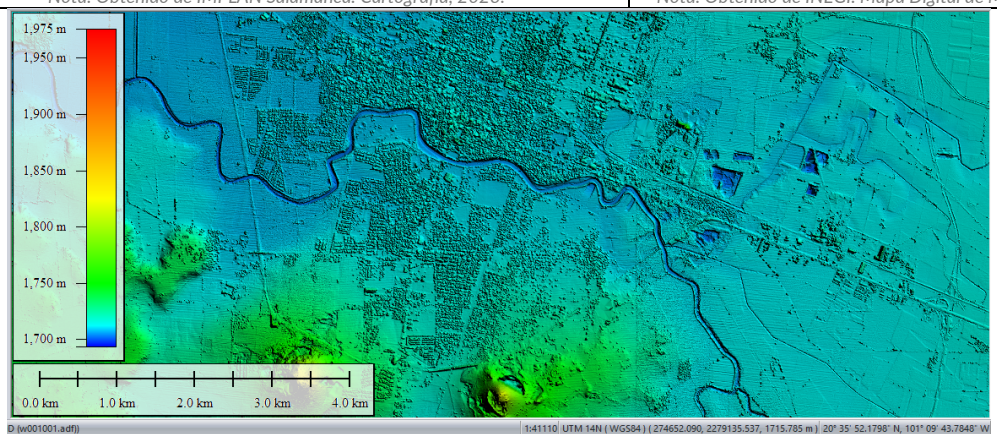
Geografía (INEGI, a) (INEGI, b) para caracterizar la topografía del terreno, concretamente los modelos de elevación digital obtenidos mediante escáneres láser de alta resolución (LIDAR por su acrónimo en inglés), teniendo una la resolución de 5 metros para el área de estudio y que datan del 2012. El área de estudio abarca las cartas topográficas F14C63D2, F14C63D4, F14C63E1, F14C63E2, F14C63E3 y F14C63E4. En la figura 1 se representa la información topográfica empleada para la construcción del modelo de cálculo.



Zonificación de usos de suelo a partir de la información del IMPLAN
Nota: Obtenido de IMPLAN Salamanca. Cartografía, 2023.



Cartas topográficas de INEGI para la caracterización del relieve topográfico.
Nota: Obtenido de INEGI. Mapa Digital de México,



Visualización del Modelo de Elevación Digital al unir las 6 cartas del INEGI.
Fuente: INEGI. Biblioteca Digital de Mapas,

Figura 1. Información geoespacial empleada para el modelo de cálculo.

Los datos hidráulicos se extrajeron de los registros históricos de estaciones hidrométricas, que en un principio se consideraron tres: la número 12007 ubicada justo en el centro de Salamanca, la 12376 en Salvatierra y la 12352 también en Salamanca, sin embargo, se descartó la 12007 ya que los últimos datos registrados son del año 1939, y aunque después la retomaron por un par de años alrededor de 1997 en realidad, son insignificantes con caudales realmente pequeños y por las fechas tampoco nos sirven para hacer un análisis de las inundaciones ocurridas. De las demás estaciones se extrajeron algunos de los picos de caudal más interesantes como lo son la inundación de 2003, los provocados por la lluvia de 1991, que, si bien Salamanca no fue el más afectado, esta inundación fue tan severa que el municipio tuvo que rediseñar e introducir nuevas redes de drenaje, estas dos con datos de la estación 12352, y con la 12376 se hizo un planteamiento imaginario en el que el rio llevaba un caudal normal de alrededor de 100m^3/seg. y de pronto comenzaba a llover estrepitosamente como en 2003 para ver que ocurría.

Se decidió solo tomar datos a partir de 1990 debido a que las obras como las presas Solís (río Lerma) en Acámbaro e Ignacio Allende (río Laja) en San Miguel de Allende ayudaron a controlar las avenidas, por lo

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

que los caudales que llegaban a Salamanca ya no eran tan altos como antes de la construcción de las obras (que en alguna ocasión llegaron hasta casi 700m^3/seg.).

El río por sí mismo puede desbordarse e inundar un poco la ciudad, sin embargo, esto no resultaría tan desastroso como con una lluvia torrencial, por esto se agregó en cada prueba un hietograma correspondiente a alguna lluvia extraordinaria. Para ello se consultaron los registros de la estación climatológica del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, ubicada en el centro de la ciudad: estación 11096, Salamanca, CONAGUA-DGE, (Latitud: 20.565°, Longitud: -101.2°, Altitud: 1,717 msnm). Esta estación tiene registros de datos diarios de precipitación, evaporación y temperaturas extremas desde el año 1941 (CONAGUA, s.f.).

Modelo de cálculo

Con la información de tipo de uso de suelo del IMPLAN de Salamanca se creó el modelo en el programa Iber, abarcando la mayor parte de la mancha urbana y cuidando incluir completamente la planta industrial de Mazda, pues es una zona de gran interés para el estudio del impacto económico de las inundaciones. Se asignaron a las distintas áreas su correspondiente coeficiente de rugosidad de Manning en relación con el uso de suelo asignado a las mismas de parte de IMPLAN Salamanca.

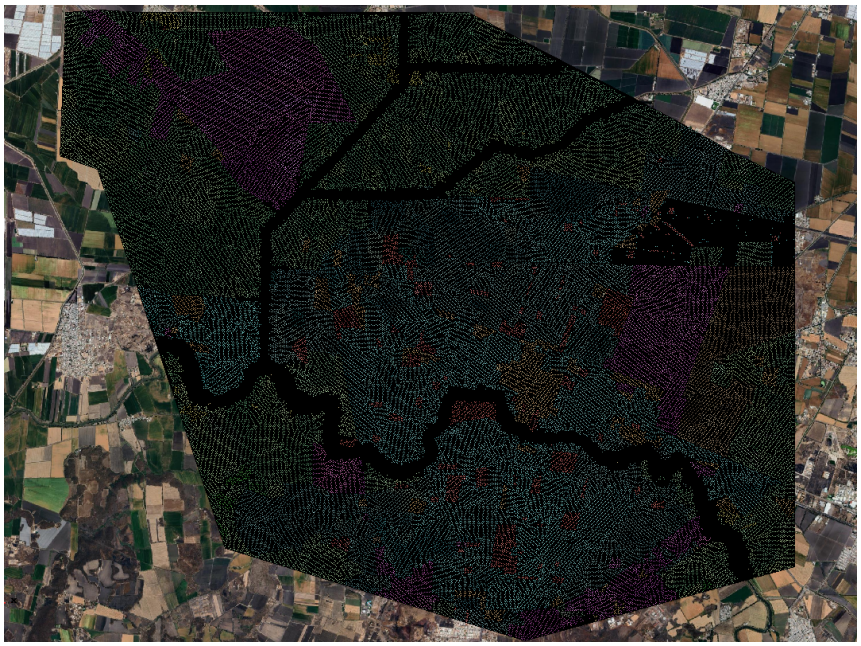


Figura 2. Modelo en Iber.

El modelo tiene 210,867 nodos y 420,235 elementos triangulares planos, con un tamaño de 5 metros por lado en el río, de 10 metros en las excedencias del río y con 30 metro para el resto del modelo lo que nos da una malla con muy buena resolución, pero que también resulta muy grande lo cual aumenta drásticamente el tiempo de cálculo.

Tabla 1. *Coeficientes de rugosidad de Manning asignados a los distintos usos de suelo*

Uso de suelo	Coeficiente de rugosidad de Manning
Agrícola	0.04
Comercio y servicios	0.1
Cuerpo de agua (Rio)	0.025
Equipamiento urbano	0.02
Forestal	0.08
Habitacional 1 y 2	0.07
Habitacional 3 y 4	0.15
Industrial y Act. Extractivas	0.1
Infraestructura publica	0.1
Habitacional campestre	0.08

Se realizaron tres pruebas satisfactorias de las cuales dos corresponden a eventos reales extraordinarios en 1991 y 2003 y con la otra fue con la que realizamos el escenario imaginario, para los casos de 1991 y 2003 se tomaron los datos reales de caudal y precipitación que se tenían y para la prueba restante se tomó también un caudal real pero bastante promedio para aplicarle la misma precipitación extraordinaria del 2003.

Prueba 1

La primera prueba fue la inundación de 2003, tomamos los datos diarios desde el día 9 hasta el 22 de septiembre de la estación 12352, abarcando un total de 1,123,200 segundos, con unos caudales extraordinarios de hasta 370 m^3/seg. y para la lluvia también se introdujo un hietograma con los datos de la precipitación de esos mismos días:

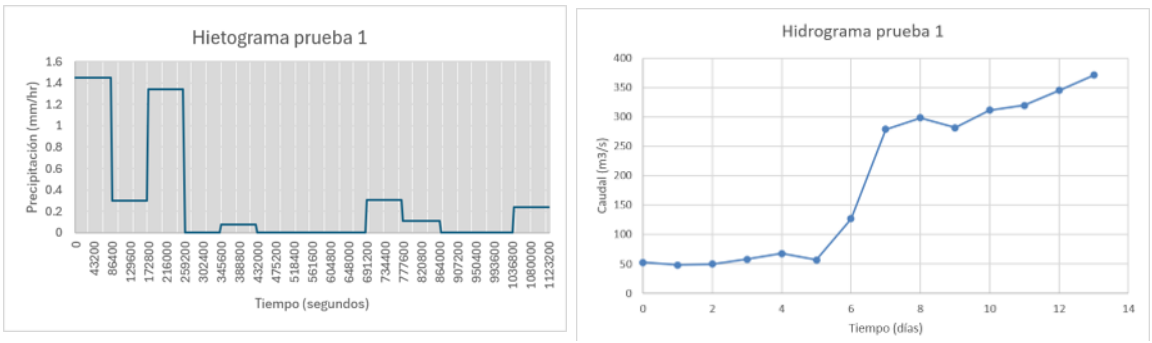


Figura 3. Datos hidrológicos e hidráulicos utilizados en la prueba 1.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

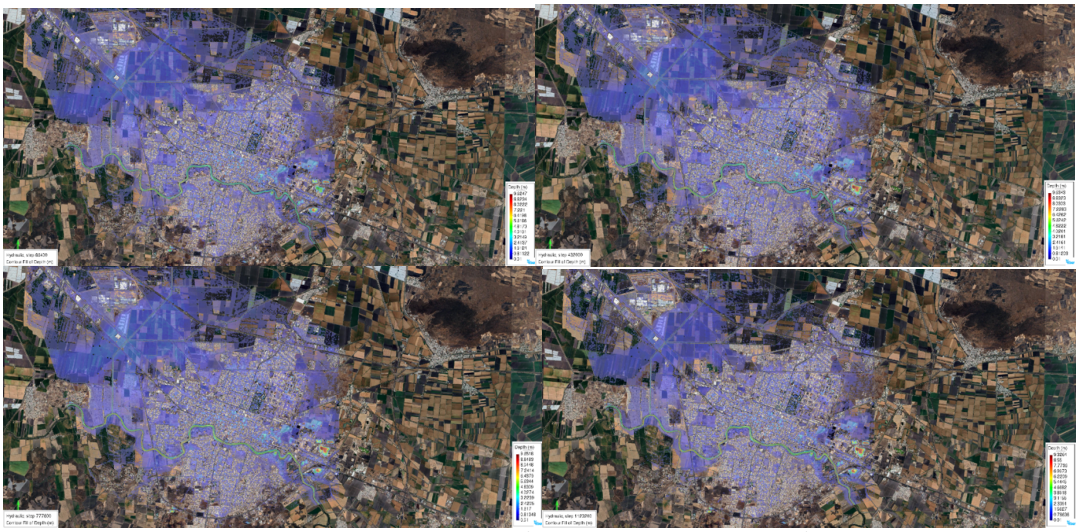


Figura 4. Resultados de prueba 1 (cada 4 días comenzando en el día 1).

Se pueden observar muchos desbordamientos a lo largo de todo el cauce sobre todo en la parte izquierda si nos colocamos viendo en el mismo sentido de este, estos desbordamientos por si solos ya generan encharcamientos considerables en las zonas aledañas al rio, afectando así a hogares negocios y un poco en zonas industriales.

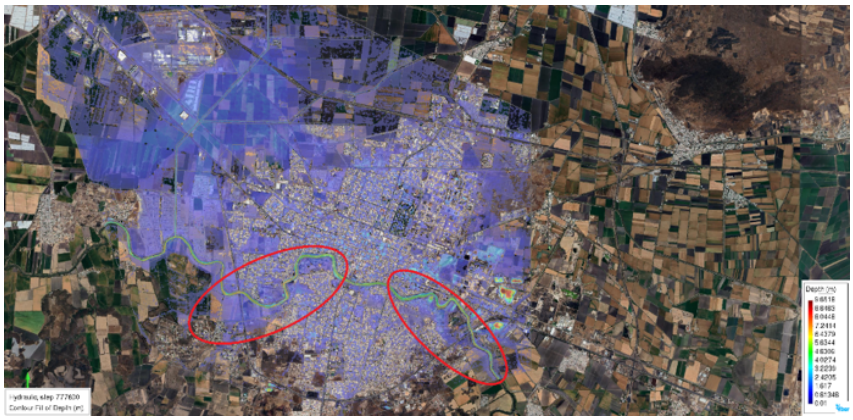


Figura 5. Desbordamientos a lo largo del río.

La lluvia provoca severas inundaciones por toda la ciudad en la zona noroeste se puede observar una gran zona agrícola cubierta completamente, también en esa zona se encuentra la planta de Mazda Salamanca que es de gran importancia para la ciudad, un poco más al sur y muy cerca del rio se observan encharcamientos de profundidad considerable, el agua además alcanzo el centro de la ciudad aunque con inundaciones de menor extensión son de igual peligro pues tienen una profundidad considerable, al este de la ciudad se encuentra la refinería Ing. Antonio M. Amor de PEMEX que aunque no está totalmente cubierta también se ve afectada y aún más a la derecha se ven las inundaciones más severas; una instalación importante en esa zona es la central termoeléctrica de la ciudad, que es de gran peligro si se llegara a inundar como lo hizo en aquella ocasión y cerca del rio se observan casas inundadas con una profundidad de hasta 4 metros.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

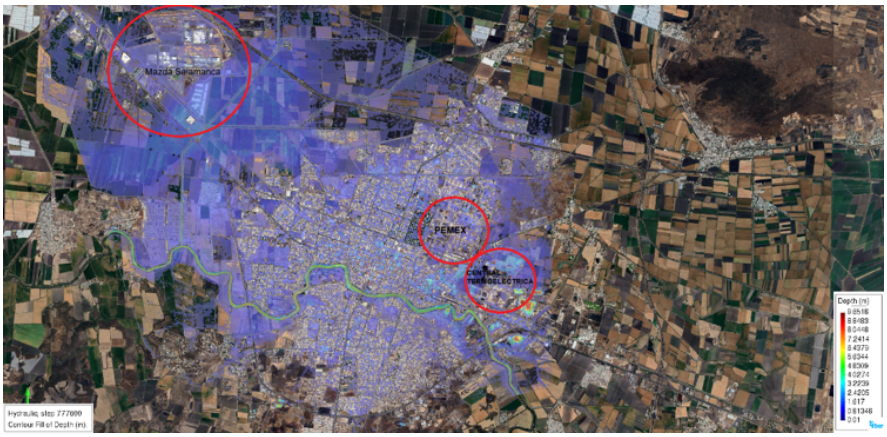


Figura 6. Inundaciones en lugares importantes.

Las precipitaciones más severas ocurren los primeros días en la simulación (alcanzando 34 mm/día el primer día), sin embargo, el caudal apenas varía, esto nos dice que las inundaciones más severas no son producto únicamente de la lluvia que cae sobre la zona urbana sino también del escurrimiento de aguas arriba en la cuenca, además el agua en la ciudad se drena lentamente por lo que los días en los que hay mayor peligro es entre el séptimo y décimo día que es cuando las primeras lluvias ya han dejado inundado y después llega otra precipitación severa que sumado con un cauce ya mayor de 370 m^3/s en su pico máximo provoca el mayor desastre (lo que se observa en la imagen tercer imagen de los resultados).

Concluimos así de la primera prueba que el mayor peligro para la cuidad es un efecto combinado de un muy lento desalojamiento del agua y un desfase hidrológico en el río, ya que las inundaciones más severas no ocurren al mismo tiempo que las mayores precipitaciones sino algunos días después, coincidiendo con que es cuando el caudal aumenta. Geográficamente la zona central-izquierda es la que sufre, en extensión, la mayor afectación de las lluvias en algunos lugares alcanzando tirantes que parecen ser de hasta 4 metros según la escala de profundidad cerca de la planta de Mazda, que, si bien no sufre inundaciones muy profundas, los alrededores si lo hacen afectando así a la logística; por la parte derecha del modelo tenemos la refinería y la central termoeléctrica que sufren de acumulaciones severas lo que podría detener sus operaciones.

Prueba 2

De la misma estación 12352 se extrajeron los datos del día 1 hasta el día 15 de julio del año 1991 (1,209,600 segundos), este evento no fue tan catastrófico para la ciudad como la inundación del 2003 pero también nos ayudó a entender cómo se comporta las lluvias en la ciudad, en ese intervalo de 15 días el caudal llego hasta 258 m3/seg lo cual no es muy grande para el cauce que cruza, por otro lado, la lluvia alcanzo una precipitación muy fuerte llegando hasta 54.2 mm el 10 de julio.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

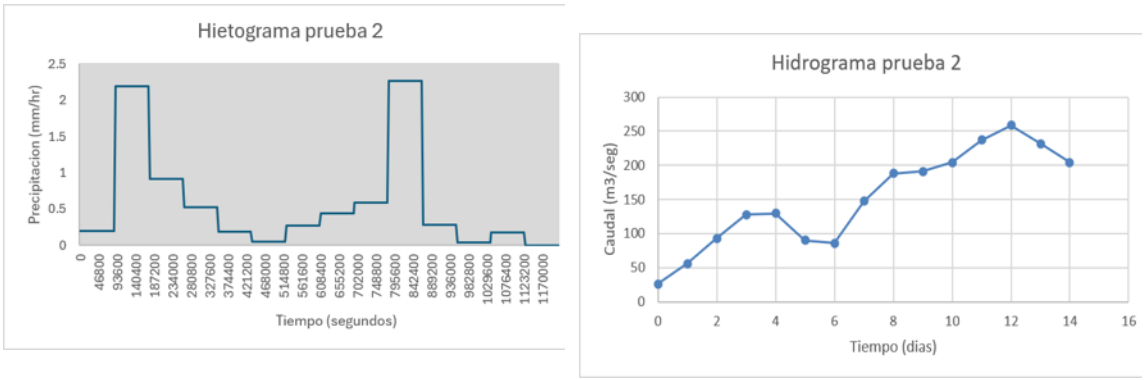


Figura 7.Datos hidrológicos e hidráulicos para la prueba 2.

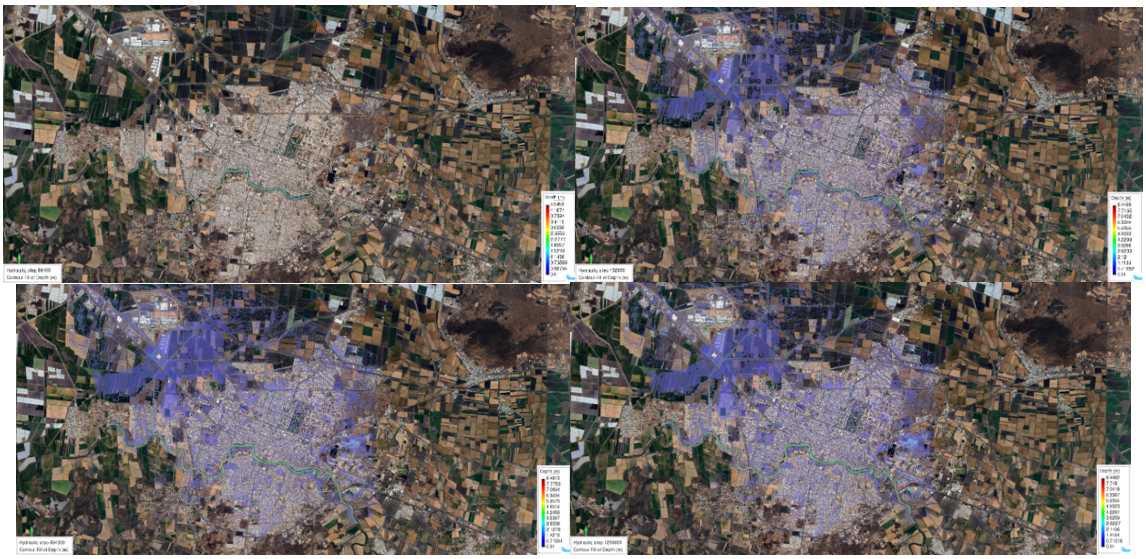


Figura 8. Resultados de la prueba 2.

Las zonas más dañadas son las mismas a la derecha del todo y la zona central-izquierda pero esta vez con mucho menor intensidad y en una menor extensión, esto ya lo suponíamos pues la distribución de los hidrogramas y hietogramas tienen cierta similitud, pero la prueba dos con menor intensidad aun así corrimos la prueba con el fin de ver si se repetían las mismas zonas y así fue.

Ocurrió algo similar a la primera prueba, no fue la primera precipitación que provoco la mayor inundación sino una segunda ocasión provocada por el mismo fenómeno de rezago hidrológico y el lento dren de las aguas dentro de la ciudad. El décimo día (860,000 segundos) fue el más catastrófico alcanzando tirantes de hasta 8 metros, aunque esto concentrado en una pequeña zona, por ejemplo, cerca de la central termoeléctrica alcanzo hasta 3 metros.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Prueba 3

De la estación número 12376 se seleccionaron 10 días que tenían un caudal bastante normal sin nada extraordinario, y se le introdujo al modelo el mismo hietograma de la primera prueba, pero recortado.

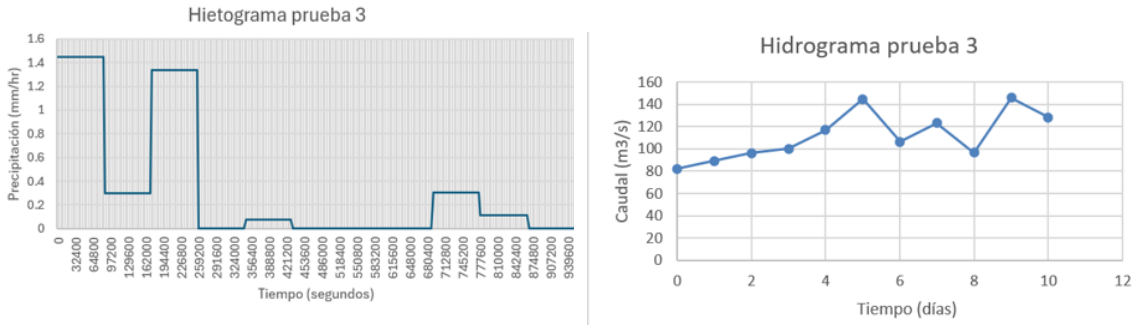


Figura 9.Datos hidrológicos e hidráulicos para la prueba 3.

En la prueba 1 se vio que el caudal puede aumentar además de la lluvia local en Salamanca habiendo un desfase de tiempo entre la intensidad de uno y otro, en la prueba tres se intentó ver qué pasaba si únicamente mantenemos la lluvia local fuerte pero el caudal del Lerma no presenta una crecida importante a su llegada a la ciudad, comenzando en 82 m^3/s, terminando en 128 m^3/s y con un pico máximo de 146 m^3/s.

Para las condiciones de frontera en este caso se dejó como única entrada el borde del perímetro correspondiente al río Lerma, se descartaron más entradas debido a que se detectaron árboles en medio de algunos cauces que la topografía tomaba como unos pequeños montículos lo que generaba una especie de tapón al momento de que corriera el agua y provocaba un desborde. Por lo que todos los demás bordes se asignaron como salidas.

Al no tener esas entradas extra y ese “tapón” que desbordaba e inundaba la zona perimetral de la planta Mazda Salamanca, aunque si se inundó la zona no lo hizo con la intensidad de la primera prueba, esta vez no rebaso los 3 metros de tirante, pero vemos un patrón en las tres pruebas: la zona central-izquierda y la parte derecha del modelo, por lo que son zonas en donde deberíamos prestar extrema atención.

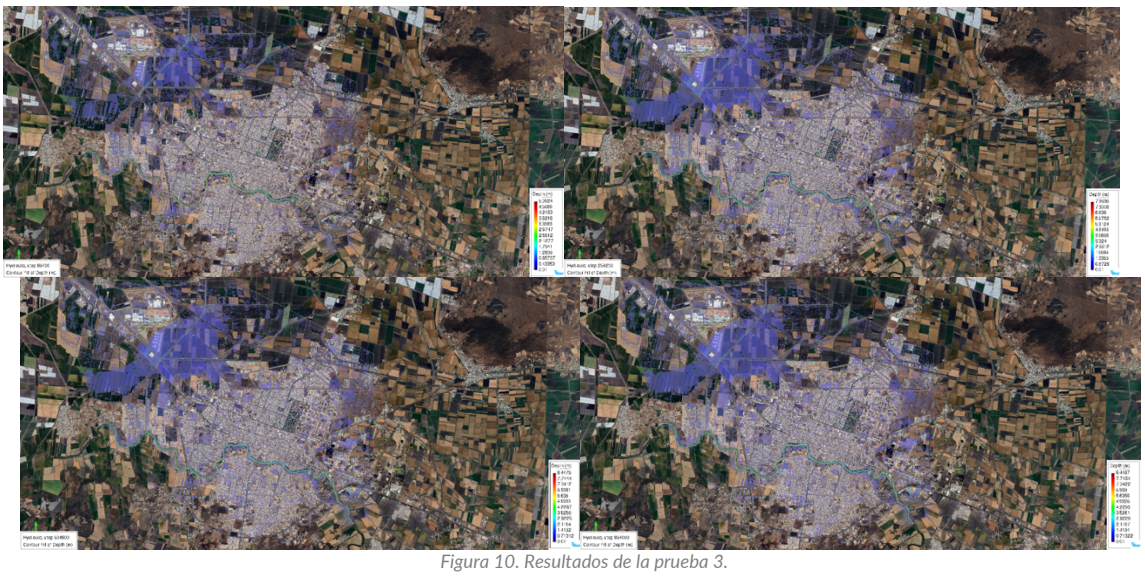
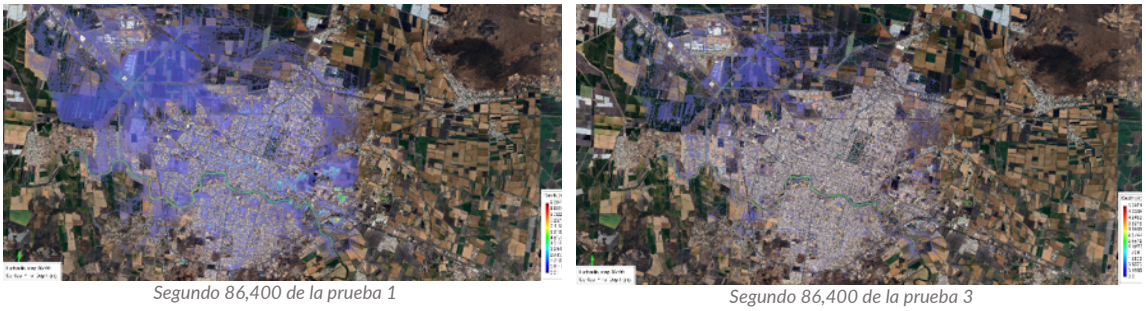


Figura 10. Resultados de la prueba 3.

En esta prueba el momento de mayores tirantes y extensiones más largas fue justo en el momento en que la lluvia fue más severa, contrario a la primera prueba en el que los mayores estragos se daban días después de la lluvia, aunque los daños fueron mucho menores que en 2003 también se presentaron tirantes muy grandes, alcanzando los 7 metros de profundidad en el instante 259,200 segundos.

Como ya habíamos anticipado, al no haber un rezago hidrológico en el cauce los desbordamientos fueron muy leves apenas notables que, de manera visual y numérica podemos decir que no fueron trascendentales que apenas superaban el metro de profundidad, por lo que nuestra primera hipótesis fue correcta, la intensa lluvia no es la única responsable de las terribles inundaciones en toda la ciudad.

Podemos observar en la figura x una comparación entre el mismo momento, pero en la prueba 1 y 3, hay una gran diferencia entre las mismas esto como ya se mencionó debido al canal de entrada que se eliminó.



Segundo 86,400 de la prueba 1 *Segundo 86,400 de la prueba 3*

Figura 11.Comparación de resultados de las pruebas 1 y 3.

Estimación de afectaciones económicas al sector automotriz por la inundación de 2021

Esta sección presenta un resumen de los trabajos citados en la bibliografía, ya que hacer el cálculo directo a partir de los datos crudos requiere bastante tiempo para desarrollarlo. Para medir el efecto económico del paro de 48 horas, se emplearon cifras oficiales sobre producción de Mazda entregadas por el INEGI y la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA) (INEGI, 2022; Hernández, 2022), además de proyecciones prudentes relativas a valores de exportación y gastos de infraestructura.

Producción no realizada

En el año 2021, la planta Mazda Salamanca produjo 127,293 unidades según datos del INEGI emitidos en 2022. Si tomamos en cuenta 250 días laborables al año, entonces el promedio diario de producción alcanzó 509 unidades. La paralización ocurrida durante dos días, específicamente el 4 y 5 de octubre de 2021, provocó que faltaran cerca de **1018** automóviles en su fabricación finalizada.

Si se considera un valor medio ponderado de exportación calculado en 20.27 pesos mexicanos por dólar estadounidense durante el mes de octubre del 2021, entonces la cantidad total de pérdida bruta derivada de la producción que no se llevó a cabo resulta ser igual a **20,366,880 dólares estadounidenses (412,800,657 pesos mexicanos).**

Impacto en la cadena de valor

Pérdida salarial: Cerca de 5,200 empleados de la fábrica no pudieron trabajar y recibieron únicamente el 70% de su salario. Eso implica una pérdida económica para sus hogares, calculada en 1.87 millones de pesos mexicanos por los dos días de inactividad laboral (Domínguez, 2021).

Daños a proveedores: El parque Bajío Industrial Park experimentó inundaciones de dos metros dentro de sus naves industriales (Domínguez, 2021). Se calcula que los perjuicios hacia infraestructura, maquinaria e inventarios en las compañías proveedoras sumaron 27 millones de pesos mexicanos.

Penalizaciones logísticas: Del total del 77% de la manufactura salmantina, 38 países reciben vehículos ensamblados ahí (INEGI, 2022). Los retrasos en las entregas pactadas provocaron la activación de multas contractuales. Al estimar un 3% conservador del monto de lo no enviado, resulta 12.3 millones de pesos mexicanos.

En la tabla 2 se muestra un resumen de las pérdidas estimadas, tanto en pesos mexicanos como en dólares estadounidenses.

***Tabla 2**. Resumen de Pérdidas*

Concepto de Pérdida	Monto Estimado (USD)	Monto Estimado (MXN)
Producción no realizada (Mazda)	$20,366,880	$412,836,658
Daños a empresas proveedoras	$1,332,018	$27,000,000
Penalizaciones logísticas	$611,006	$12,385,100
Pérdida salarial (trabajadores)	$92,353	$1,872,000
TOTAL ESTIMADO (48 horas)	$22,402,257	$454,093,758

Análisis Costo-Beneficio de Proyectos de Mitigación

Dado que el Parque Industrial Bajío se edificó a igual altura que el Dren 20 (Domínguez, 2021), éste es muy vulnerable a las inundaciones por lluvias fuertes, como también se vio en los resultados de las pruebas de simulación numérica (prueba 3). Debido a que las pérdidas tras un único suceso de anegamiento superan los 450 millones de pesos, la construcción de obras hidráulicas preventivas resulta ampliamente justificada desde punto de vista económico. Se examinan ahora tres alternativas de reducción del daño ante la pérdida anual prevista (calculada con prudencia en 1 caso análogo cada año = 22.4 millones de dólares).

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 3, la opción A representa la mejor en el largo plazo, pero es necesaria la intervención de la CONAGUA, el gobierno federal y el gobierno del Estado de Guanajuato, al tratarse de cauces federales. La opción B es la alternativa de solución menos costosa y rápida de implementar pues todo queda en el ámbito municipal y privado, resultando adecuada como estrategia de reducción temporal. En los hechos fue la opción que eligieron las empresas. En cuanto a la opción C, la única ventaja es la de eliminar el riesgo de afectación al 100%, pero el monto de inversión inicial resulta muy alto, además de que resulta más difícil de encuadrar en el sistema de operación que tiene la planta.

***Tabla 3**. Cuadro de alternativas de mitigación*

Opción	A: Reforzamiento y aumento de bordos (Dren 20 y La Charca)	B: Instalación de bombeo de urgencia y tanques elevados para almacenamiento	C: Reubicación del Bajío Industrial Park
Descripción	Construcción de obras para encauzar agua, limpiar sedimentos y subir los bordos de los canales en las inmediaciones del parque industrial	Colocación de equipos de bombeo y tanques para sacar el agua del parque industrial y liberarla de manera controlada en el cauce hasta un punto más seguro aguas abajo	Trasladar las instalaciones en cuestión a terrenos cercanos que sean menos susceptibles a inundarse.
Costo estimado	4.9 millones USD	1.7 millones USD	Más de 24.6 millones USD
Beneficio neto	443.1 millones USD a 20 años	199.8 millones USD a 15 años	No calculado
Relación Beneficio Costo	90.8	116.8	No calculado

Referencias

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J.M., y Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1): 1-10, https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004.

Cea, L. y Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51: 5464–5486. https://doi.org/10.1002/2014WR016547

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (s.f.) *Información estadística Climatológica*.

https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica

Durán, O. (28 de octubre de 2023). Salamanca, la historia de sus inundaciones. *El Sol de Salamanca*. https://oem.com.mx/elsoldesalamanca/local/salamanca-la-historia-de-sus-inundaciones-14659419

Esqueda, H., Valdez, S. I., y Botello, S. (2022). Roughness Parameter Estimation for flood numerical simulation using Differential Evolution. *IEEE Mexican International Conference on Computer Science (ENC), Xalapa, Veracruz, Mexico*, 1-8, https://doi.org/10.1109/ENC56672.2022.9882946

Esqueda, H., Botello, S., y Valdez, S. (2024). Estimation of peak flow in flood-producing rivers using numerical simulation, geospatial information and evolutionary algorithms. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 40(3) 37 https://www.scipedia.com/public/Esqueda_et_al_2024a

García-Navarro, P., Murillo, J., Fernández-Pato, J., Echeverribar, I., y Morales-Hernández, M. (2019). The shallow water equations and their application to realistic cases. *Environmental Fluid Mechanics.* 19: 1235–1252. https://doi.org/10.1007/s10652-018-09657-7

Instituto Municipal de Planeación del Municipio de Salamanca, Guanajuato. [IMPLAN] (2023) *Cartografía 2023*. https://implansalamancagto.gob.mx/sistema-municipal-de-informacion-estadistica-y-geografica-smieg/cartografia/

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (s.f., a) *Mapa Digital de México*.

https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIwLjU3MTUxLGxvbjotMTAxLjIyNzUxLHo6OSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dDExMXNlcnZpY2lvc3xjODAx

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (s.f., b) *Biblioteca Digital de Mapas*. https://www.inegi.org.mx/app/mapas/

Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abustan, I., y Balogun, W. (2021). *Flood hazard mapping methods: A review*. Journal of Hydrology. 603(A): 126846. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126846.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2020, abril). *Dimensión y escurrimiento de ríos principales 2018. Compendio de Estadísticas Ambientales 2020*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet9505.html

Domínguez, E. (2021-a, 5 de octubre). *Vulnerabilidad Industrial, Inundaciones y Colapso Logístico*. https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt612.pdf

Domínguez, E. (2021-b, 5 de octubre). *Para Mazda en Salamanca por inundación de empresas proveedoras*. https://poplab.mx/posts/para-mazda-en-salamanca-por-inundacin-de-empresas-proveedoras/

INEGI. (2022). Registro Administrativo de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros (RAIAVL). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Medrano, S. (2021, 19 de diciembre). *Mazda Salamanca se va a paro técnico por falta de semiconductores*. Cobertura 360 / El Sol de Salamanca. https://cobertura360.mx/2021/12/19/guanajuato/mazda-salamanca-se-va-a-paro-tecnico-por-f

Hernández, E. (2022, 26 de mayo). *Las armadoras perdieron doscientos diez mil millones de dólares en el año dos mil veintiuno debido a la crisis de los semiconductores según AMIA*. Forbes México. https://forbes.com.mx/armadoras-perdieron-210000-mdd-en-2021-por-la-crisis-de-semicondu