



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOMÁTICA E HIDRÁULICA

---

---

"MODELIZACIÓN DEL FLUJO SUPERFICIAL POR  
DESBORDAMIENTO DE UNA PRESA.  
CASO DE ESTUDIO: PRESA DE LA OLLA, GUANAJUATO, GTO."

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO HIDRÁULICO

PRESENTA:

JÉSSICA NAVA PÉREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

M.I. JOSEFINA ORTÍZ MEDEL

M.I. ÓSCAR JESÚS LLAGUNO GUILBERTO

GUANAJUATO, GTO.

JUNIO 2019





Tesis realizada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la Subcoordinación de Hidráulica Urbana con el apoyo otorgado en el programa de Becas 2018 durante el periodo junio 2018 - abril 2019.

## DEDICATORIA

A Dios, por acompañarme y guiarme.

A mis padres; a mi mamá, por confiar y creer en mis proyectos, por ser un impulso para seguir avanzando siempre y por ser un ejemplo de valentía. A mi papá, por los buenos momentos y por enseñarme el valor del esfuerzo y de la mejora personal. Y a ambos por sus enseñanzas tan diferentes y tan útiles por igual, por sus esfuerzos y sacrificios siempre enfocados en el bienestar mío y de mis hermanos.

A mis hermanos; a Nallely, por su cariño y amistad, y a Mario, por ser un gran hermano mayor. Y a ambos porque me han acompañado e inspirado siempre, porque sé que en ellos puedo confiar y cuya ayuda ha sido incondicional.

A mis papásgrandes; a mamágrande, por sus oraciones que me han ayudado en incontables ocasiones. A papágrande, por sus cuentos y anécdotas. Y a ambos por los desayunos juntos, por la sabiduría que han compartido conmigo y por su enorme cariño.

A mis tías, Cecy y Mamis por ser un pilar en todos los aspectos de mi vida, especialmente durante mi licenciatura, por motivarme a salir, conocer otros lugares y otras personas. Por sus consejos siempre.

A Mau que me acompañó durante toda la ingeniería y a lo largo del proceso de este trabajo, por apoyarme siempre, escucharme e impulsarme a continuar, por su cariño y tiempo.

A todos mis compañeros y amigos de la universidad con quienes compartí muchos momentos dentro y fuera de la escuela, en especial a Lalo y a Meli.

A Ana por saber escuchar y compartir, por las buenas conversaciones acompañadas de café.



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato por enriquecerme en conocimientos, brindarme amplias oportunidades, por las becas durante mis estudios y por permitirme conocer excelentes profesores y compañeros.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por la beca otorgada para la realización de este trabajo, por la asesoría y las personas que pude conocer durante mi estancia, que estuvieron siempre dispuestas a ayudar y compartir sus conocimientos, en especial al M.I. Manuel Rodríguez, a la M.I. Ana Laura Morales, y al M.I. Alexis Cervantes. A los compañeros y amigos que compartieron conmigo su estancia en el IMTA, en especial a Javier A., Alma, Ignacio, Giovanni, Cándido, Javier O., Javier C., y Arturo.

Al M.I. Óscar Llaguno, codirector de este trabajo, que me apoyó durante mi estancia en el IMTA, por la gran cantidad de tiempo invertido en sus enseñanzas y revisiones, por creer en el proyecto y en mí, por impulsarme a hacer más y mejor.

A mi directora de tesis, M.I. Josefina Ortíz, y al Dr. Ismael Orozco, sinodal de este proyecto; por sus valiosas aportaciones a este trabajo, por su tiempo y ayuda.

A mis maestros de la universidad, que compartieron su experiencia y conocimientos conmigo, con especial cariño a la Dra. Luz Adriana Arias, al Ing. Gustavo Vázquez, a la Dra. Xitlali Delgado, al Dr. Soria, al Ing. Óscar Hernández y al Dr. Carreño.

A todas las personas e instituciones que me apoyaron con becas durante la licenciatura, en especial a Ofelia y Nena Sánchez, en quienes encontré excelentes personas.

*“El hidráulico ha de ser ante todo algo así como un psicólogo del agua, un conocedor profundo de su naturaleza. No es con violencia como se pueden hurtar sus secretos, sino con amor; con esa comprensión que se deriva de una larga convivencia con ella”.*

*Enzo Levi*

## RESUMEN

Las inundaciones son un evento que se produce debido a la precipitación extraordinaria o falla de una estructura hidráulica provocando que haya agua en sitios donde usualmente no hay y causando pérdidas económicas y sociales a la población. En todo el mundo han aumentado las inundaciones en los últimos años. A pesar de que las precipitaciones extremas que causan inundaciones sean consideradas un desastre natural, éstos también pueden intensificar sus efectos debido a procesos como el cambio climático provocado por la deforestación, el aumento de la población y de los gases de efecto invernadero. Esto ha contribuido a la desertificación, aumento del nivel del mar y fenómenos meteorológicos extremos.

El proceso de urbanización implica un cambio de uso de suelo que en Guanajuato se ha dado en las partes altas de la cuenca del río Guanajuato. Esto implica que las zonas que permitían la infiltración se han reducido provocando un mayor escurrimiento y erosión del suelo, factores que favorecen mayores escurrimientos en la zona centro de la ciudad.

El municipio de Guanajuato tiene una amplia historia en inundaciones dada su ubicación y sus características topográficas (la cuenca presenta diferencias de elevaciones de 900 metros). Desde su fundación hasta 2017 se sabe de por lo menos 20 inundaciones significativas en el municipio. La más reciente se presentó los días 13 y 14 de junio de 2018 y fue provocada por el desbordamiento de la Presa de la Olla debido a una precipitación extraordinaria de 117 mm en un tiempo de 26 horas y 40 minutos.

La caracterización de la zona de estudio incluye información sobre la presa de la Olla, la cuenca de aportación y la zona urbana de Guanajuato. La presa de la Olla tiene un volumen de almacenamiento de 70,000 m<sup>3</sup> y terminó de construirse en el año 1749, su uso es recreativo. La cuenca de aportación tiene un área de 3.84 km<sup>2</sup> su forma es ovalada y se encuentra en su fase de madurez por lo que el cauce es estable y amplio, la elevación media de la cuenca es de 2,327.77 m s.n.m. y la pendiente media de 15.44%. La cuenca es de orden 4 con una densidad de corrientes de 16.93 c/km<sup>2</sup>, su cauce principal tiene una longitud de 2.79 km y el tiempo de concentración de la cuenca es de 20 minutos. Respecto a las características generales de la zona de estudio se

establecieron 9 tipos de áreas para la definición del coeficiente de Manning para la rugosidad; se ajustó el Modelo Digital de Elevaciones para que incluyera las elevaciones de las manzanas de la zona urbana, las batimetrías de las presas y se realizó un análisis para lluvias de diseño dados ciertos periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años) y del evento de junio 2018.

Una vez que se cuenta con las características de la zona de estudio, se realizaron 4 escenarios (rotura de presa, desbordamiento de junio de 2018 y lluvias de diseño) con el software “Iber®” que es una herramienta para simulación hidrológica-hidráulica.

Los resultados muestran tirantes, velocidades y caudales máximos, hidrogramas y análisis en lugares específicos. El modelo que simula la lluvia de junio 2018 presenta diferencias con los datos históricos (obtenidos de evidencia fotográfica) de 14.54%, por lo que el modelo se encuentra correctamente calibrado.

El modelo de rompimiento de la presa se realizó considerando que, dada su antigüedad, nivel de azolve, edad de la infraestructura, mantenimiento y el incremento de las tormentas, la presa podría ser susceptible a una falla por rompimiento de la cortina. La simulación señala 5 minutos y 20 segundos como el tiempo disponible para evacuar las zonas aguas abajo de la presa, el alcance espacial del flujo superficial se limita a las calles Paseo de la Presa, Paseo Madero y Embajadoras donde se presentan velocidades de hasta 10.03 m/s.

Las simulaciones con las lluvias de diseño se realizaron tomando en cuenta una precipitación de 240 minutos de duración pues, tras el análisis de los datos hidrometeorológicos se estableció como la duración más frecuente en la ciudad. Para cada periodo de retorno se presentan mapas de tirantes, velocidades y gastos máximos, y se comparan los hidrogramas de cada periodo de retorno. Además, se realizaron mapas de peligro que consideran los tirantes en las calles y el volcamiento, señalando en cada calle si el peligro es nulo, medio, bajo o alto.

## ABSTRACT

Floods are events that occur due to extraordinary rainfall or failure of a hydraulic structure, leading to water accumulation in places where usually there is not and cause economic and social losses to the population. Floods have increased throughout the world in recent years. Although the extreme rainfall is considered as a natural disaster, it can intensify its effects due to processes such as climate change provoked by deforestation, the increase of population and greenhouse gases. This has contributed to desertification, sea level rise and extreme weather events.

The urbanization process implies a change of land use, which in Guanajuato has taken place in the upper parts of the Guanajuato river basin. This implies that the areas that allowed the infiltration have been reduced, causing a greater runoff and soil erosion, factors which favor greater runoff in the downtown area of the city.

Guanajuato city has a long history in floods given its location and its topographic characteristics (the basin has differences of elevations of 900 meters). Since its foundation till 2017, at least 20 significant floods in the city have been reported. The most recent was on June 13<sup>th</sup> and 14<sup>th</sup>, 2018 and it was caused by the overflow of “La Olla” dam due to an extraordinary rainfall of 117 mm in 26 hours and 40 minutes.

The characterization of the study area includes information about the La Olla dam, the basin and the urban zone of Guanajuato. “La Olla” dam has a storage volume of 70,000 m<sup>3</sup> and its construction finished in 1749; its use is recreational. The basin has an area of 3.84 km<sup>2</sup>, its shape is oval, and it is in its maturity phase, so the channel is stable and wide, the average elevation of the basin is 2,327.77 m.a.s.l. and the average slope of 15.44%. The basin is of order 4 with a density of currents of 16.93 c /km<sup>2</sup>, its main channel has a length of 2.79 km and the time of concentration of the basin is 20 minutes. Regarding the general characteristics of the study area, 9 types of areas were established for the definition of the Manning roughness coefficient; the Digital Elevation Model was adjusted to include the elevations of the blocks of the urban area, the bathymetries of the dams and an analysis was carried out for design storms given certain return periods (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 and 500 years) and the June 2018 event.

Once the characteristics of the study area were defined, 4 scenarios were performed (dam break, June 2018 overflow and design storms) with the "Iber®" software, which is a hydrological-hydraulic simulation tool.

The results show maximum depths, speeds and flows, hydrographs and analysis in specific places. The model that simulates the rain of June 2018 presents differences with the historical data (obtained from photographic evidence) of 14.54%, therefore the model is correctly calibrated.

The dam break model was built considering that the dam could be susceptible to failure and break of the curtain, given its age, level of silt, age of the infrastructure, maintenance and the increase of storms. The simulation indicates 5 minutes and 20 seconds as the time available to evacuate the areas downstream of the dam, the spatial extent of the surface flow is limited to the streets Paseo de la Presa, Paseo Madero and Embajadoras where speeds of up to 10.03 m/s are presented.

The simulations with the design storms were carried out considering a 240-minute rainfall, since, after the analysis of the hydro-meteorological data, it was established as the most frequent duration in the city. Maps of maximum depths, speeds and flows are presented for each return period, and the hydrograms of each return period are compared. In addition, hazard maps that consider depths and overturning in the streets were obtained, indicating in each street if the danger is null, low, medium or high.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1 Objetivos .....	10
1.2 Estructura del documento.....	10
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>11</b>
2.1 Zona de estudio .....	11
2.1.1 Guanajuato.....	11
2.1.1 Presa de la olla.....	12
2.2 Inundaciones en Guanajuato .....	14
<b>3. CONCEPTOS Y DEFINICIONES .....</b>	<b>21</b>
3.1 Presas .....	21
3.1.1 Definición y clasificación de presas.....	21
3.1.2 Normativa internacional.....	22
3.1.3 Normativa en México.....	22
3.1.4 Causas y tipos de fallas en presas.....	22
3.1.5 Presas en el municipio de Guanajuato.....	23
3.1.6 Posibles fallas en la presa de la Olla .....	25
3.2 Modelización numérica .....	26
3.2.1 Modelo numérico Iber® .....	28
3.2.2 Fallas de presas en Iber® .....	32
3.2.3 Integración de la información en Iber® .....	33
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>34</b>
4.1 Caracterización de la zona de estudio .....	35
4.1.1 Presa de la Olla .....	35
4.1.2 Cuenca de aportación .....	39
4.1.3 Análisis hidrológico .....	48
4.2 Integración de la información en Iber® .....	82
4.2.1 Importación de la geometría .....	83
4.2.2 Creación de superficies .....	84
4.2.3 Asignación de tamaños a las superficies .....	87
4.2.4 Condiciones de contorno.....	88
4.2.5 Condiciones iniciales .....	90

4.2.6	<i>Infiltración</i> .....	91
4.2.7	<i>Malla</i> .....	92
4.2.8	<i>Rugosidad</i> .....	93
4.2.9	<i>Asignación de elevaciones a la malla</i> .....	96
4.2.10	<i>Hietograma</i> .....	97
4.2.11	<i>Trazo de alcantarilla</i> .....	98
4.2.12	<i>Formación de la brecha</i> .....	99
4.2.13	<i>Características de la simulación</i> .....	101
4.3	Definición de escenarios .....	102
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>103</b>
5.1	Escenario 1 .....	103
5.1.1	<i>Características de la simulación</i> .....	103
5.1.2	<i>Resultados</i> .....	105
5.2	Escenario 2 .....	112
5.2.1	<i>Características de la simulación</i> .....	112
5.2.2	<i>Resultados</i> .....	113
5.3	Escenario 3 .....	119
5.3.1	<i>Características de la simulación</i> .....	119
5.3.2	<i>Resultados</i> .....	120
5.4	Escenario 4 .....	125
5.4.1	<i>Características de la simulación</i> .....	125
5.4.2	<i>Resultados</i> .....	125
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>136</b>
<b>7.</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>139</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>140</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>146</b>
9.1	Anexo 1. Cálculo de la curva masa y curva masa unitaria. ....	146
9.2	Anexo 2. Mapas de máximos para las lluvias de diseño.....	161



# ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Inundaciones históricas en Guanajuato (elaboración propia. con información de (Gonzalez, 1905)).</i>	18
<i>Tabla 2 Generalidades de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).</i>	35
<i>Tabla 3 Ubicación de la Presa de la Olla (CONAGUA, 2012).</i>	36
<i>Tabla 4 Propósito de la obra y uso del agua (CONAGUA, 2012).</i>	36
<i>Tabla 5 Cuenca y escurrimiento (CONAGUA, 2012).</i>	37
<i>Tabla 6 Información sobre la cortina de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).</i>	37
<i>Tabla 7 Vertedor de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).</i>	37
<i>Tabla 8 Niveles y capacidades del vaso de almacenamiento de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).</i>	38
<i>Tabla 9 Gastos de diseño (CONAGUA, 2012).</i>	39
<i>Tabla 10 Obra de toma y otros desfogues (CONAGUA, 2012).</i>	39
<i>Tabla 11 Cálculo de la pendiente media de la cuenca (elaboración propia).</i>	43
<i>Tabla 12 Datos del cauce principal (elaboración propia).</i>	46
<i>Tabla 13 Resultados de las fórmulas para el tiempo de concentración (elaboración propia).</i>	48
<i>Tabla 14 Valores del coeficiente de rugosidad n (Chow, 1994).</i>	49
<i>Tabla 15 Coeficiente n de Manning para escorrentía superficial (McCuen, Johnson, &amp; Ragan, 1996).</i>	50
<i>Tabla 16 Valores del coeficiente n para el área de estudio (elaboración propia).</i>	51
<i>Tabla 17 Tipos de suelo (Aparicio Mijares, 1992).</i>	52
<i>Tabla 18 Números N para cada tipo de suelo (Aparicio Mijares, 1992).</i>	53
<i>Tabla 19 Niveles de agua de la presa de la Olla en 2001 (CEAG, 2001).</i>	57
<i>Tabla 20 Niveles de agua de la presa de San Renovato en 2001 (CEAG, 2001).</i>	57
<i>Tabla 21 Datos de las estaciones cercanas a la zona de estudio (elaboración propia).</i>	63
<i>Tabla 22 Funciones de distribución de AFA V.1.1 (IMTA).</i>	65
<i>Tabla 23 Error estándar de ajuste para cada función y estación (elaboración propia).</i>	67
<i>Tabla 24 Precipitación máxima (elaboración propia).</i>	68
<i>Tabla 25 Estación 11007 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno (elaboración propia).</i>	71
<i>Tabla 26 Estación 11094 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno (elaboración propia).</i>	72
<i>Tabla 27 Estación 11103 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno (elaboración propia).</i>	73
<i>Tabla 28 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno promediado (elaboración propia).</i>	74
<i>Tabla 29 Frecuencias de cada intervalo de lluvia (elaboración propia).</i>	75
<i>Tabla 30 Datos obtenidos y calculados para hietogramas (elaboración propia).</i>	77
<i>Tabla 31 Altura de precipitación para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).</i>	78
<i>Tabla 32 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).</i>	80

<i>Tabla 33 Ubicación de las secciones de control para el aforo de los gastos de escurrimiento (elaboración propia).</i>	108
<i>Tabla 34 Tirantes, velocidades y gastos máximos en lugares seleccionados para el escenario 1 (elaboración propia).</i>	110
<i>Tabla 35 Comparación de tirantes del evento de 1905 y los resultados del escenario 1 (elaboración propia).</i>	112
<i>Tabla 36 Tirantes, velocidades y gastos máximos en puntos seleccionados para el escenario 2 (elaboración propia).</i>	116
<i>Tabla 37 Comparación de tirantes del evento de junio 2018 y los resultados del escenario 2 (elaboración propia).</i>	117
<i>Tabla 38 Parámetros utilizados para la brecha en Iber® (elaboración propia).</i>	120
<i>Tabla 39 Tirantes, velocidades y gastos máximos en puntos seleccionados para el escenario 3 (elaboración propia).</i>	124
<i>Tabla 40 Análisis en calles para lluvia de diseño (Escenario 4) (elaboración propia).</i>	127
<i>Tabla 41 Criterios para la generación de mapas de peligro por inundación (Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, &amp; Albornoz-Góngora, 2016).</i>	130
<i>Tabla 42 Datos para la obtención de la curva masa y curva masa unitaria (elaboración propia).</i>	146
<i>Tabla 43 Cálculos realizados para la obtención de la curva masa (elaboración propia).</i>	151
<i>Tabla 44 Cálculos realizados para la obtención de la curva masa unitaria (elaboración propia).</i>	156

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Localización de la zona de estudio (elaboración propia).</i>	11
<i>Figura 2 Presa de la Olla a fines del siglo XVIII (Marmolejo, 1883).</i>	13
<i>Figura 3 Vertedor y cortina de la presa de la Olla (fuente propia).</i>	14
<i>Figura 4 Municipio de Guanajuato y red hidrográfica (elaboración propia).</i>	15
<i>Figura 5 Calle subterránea "Miguel Hidalgo" (fuente propia).</i>	16
<i>Figura 6 Antiguo cauce del Río Guanajuato. Ahora calle subterránea (Gobierno del Estado de Guanajuato).</i>	16
<i>Figura 7 Mapa de las calles afectadas históricamente (elaboración propia).</i>	17
<i>Figura 8 Tipos de presas (Vega Roldán &amp; Arreguín Cortés, 1992).</i>	21
<i>Figura 9 Ubicación de las presas en el municipio de Guanajuato (elaboración propia).</i>	25
<i>Figura 10 Dimensiones de los modelos hidráulicos (elaboración propia con información de (Vásquez Ojeda, 2003)).</i>	27
<i>Figura 11 Ejemplos de malla no estructurada (izquierda) y estructurada (derecha) (Cea &amp; Bladé, 2008).</i>	31
<i>Figura 12 Metodología empleada para el desarrollo del proyecto (elaboración propia).</i>	34
<i>Figura 13 Vertedor de la presa de la Olla (fuente propia, junio 2018).</i>	38
<i>Figura 14 Cuenca de aportación (elaboración propia).</i>	41
<i>Figura 15 Curva hipsométrica de la cuenca de aportación (elaboración propia).</i>	42
<i>Figura 16 Orden de corrientes de la cuenca de aportación (elaboración propia).</i>	44
<i>Figura 17 Áreas y coeficientes de Manning para la zona de estudio (elaboración propia).</i>	51
<i>Figura 18 Números de curva asignados para la cuenca de estudio (elaboración propia).</i>	54
<i>Figura 19 Cartas topográficas de la zona de estudio (INEGI).</i>	55
<i>Figura 20 Localidades amanzanadas de Guanajuato (elaboración propia).</i>	56
<i>Figura 21 Curvas elevación - área - volumen para la presa de La Olla (elaboración propia).</i>	58
<i>Figura 22 Plano de la batimetría de la presa de la Olla (CEAG, 2001).</i>	59
<i>Figura 23 Plano de la batimetría de la presa de San Renovato (CEAG, 2001).</i>	60
<i>Figura 24 Hietograma del evento de junio 2018 (elaboración propia).</i>	62
<i>Figura 25 Polígonos de Thiessen (elaboración propia).</i>	63
<i>Figura 26 Distribución Gumbel. Estación 11007. Valores medidos y ajustados (obtenido de AFA V1.1).</i>	68
<i>Figura 27 Distribución Gumbel. Estación 11007. Valores extrapolados (obtenido de AFA V1.1).</i>	69
<i>Figura 28 Estación 11007. Curvas i-d-T (elaboración propia).</i>	71
<i>Figura 29 Estación 11094. Curvas i-d-T (elaboración propia).</i>	72
<i>Figura 30 Estación 11103. Curvas i-d-T (elaboración propia).</i>	73
<i>Figura 31 Curvas i-d-T con valores promediados de la cuenca (elaboración propia).</i>	74
<i>Figura 32 Curva masa de cada evento de lluvia y curva masa media (elaboración propia).</i>	76
<i>Figura 33 Hietograma unitario de diseño para una duración de 240 minutos (elaboración propia).</i>	77

<i>Figura 34 Hietograma de altura de precipitación para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).</i>	79
<i>Figura 35 Hietograma de intensidad de lluvia para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).</i>	81
<i>Figura 36 Esquema de la integración de la información en Iber® (elaboración propia).</i>	82
<i>Figura 37 Importación de geometría en Iber® (elaboración propia).</i>	83
<i>Figura 38 Geometría en Iber® (elaboración propia).</i>	84
<i>Figura 39 Creación de las superficies en Iber® (elaboración propia).</i>	85
<i>Figura 40 Creación de una superficie por contorno (elaboración propia).</i>	85
<i>Figura 41 Imagen de fondo (elaboración propia).</i>	86
<i>Figura 42 Geometría y superficies (elaboración propia).</i>	86
<i>Figura 43 Asignación de tamaños a superficies (elaboración propia).</i>	87
<i>Figura 44 Tamaños de malla asignados en Iber® (elaboración propia).</i>	88
<i>Figura 45 Condiciones de contorno, entradas (elaboración propia).</i>	89
<i>Figura 46 Condiciones de contorno, salidas (elaboración propia).</i>	90
<i>Figura 47 Condiciones iniciales (elaboración propia).</i>	91
<i>Figura 48 Números de curva asignados a la cuenca de estudio (elaboración propia).</i>	92
<i>Figura 49 Malla no estructurada y acercamiento en la zona de la presa de la Olla y presa de San Renovato (elaboración propia).</i>	93
<i>Figura 50 Archivo ASCII Grid para asignación automática de la rugosidad (elaboración propia).</i>	94
<i>Figura 51 Fragmento del archivo ASCII Grid para asignación automática de la rugosidad (elaboración propia).</i>	94
<i>Figura 52 Archivo .csv para asignación automática de la rugosidad (elaboración propia).</i>	95
<i>Figura 53 Valores de rugosidad asignados a la cuenca de estudio (elaboración propia).</i>	95
<i>Figura 54 Proceso para asignar elevación desde archivo en Iber® (elaboración propia).</i>	96
<i>Figura 55 Detalles de la malla de la presa de la Olla al asignar las elevaciones (elaboración propia).</i>	97
<i>Figura 56 Proceso para definición de hietogramas en Iber® (elaboración propia).</i>	98
<i>Figura 57 Datos de hietogramas en Iber® (elaboración propia).</i>	98
<i>Figura 58 Proceso de trazo de alcantarilla en Iber® (elaboración propia).</i>	99
<i>Figura 59 Proceso para la definición de la brecha en Iber® (elaboración propia).</i>	100
<i>Figura 60 Ventana "Datos del problema" en Iber® (elaboración propia).</i>	101
<i>Figura 61 Habilitar la formación de la brecha (elaboración propia).</i>	101
<i>Figura 62 Escenarios que se trabajaron en el proyecto (elaboración propia).</i>	102
<i>Figura 63 Tamaños de malla asignados para el escenario 1 (elaboración propia).</i>	103
<i>Figura 64 Hietograma del evento de junio 2018 (elaboración propia).</i>	104

<i>Figura 65 Vista de la malla con elevaciones antes de los ajustes (izquierda) y del escenario 1 (derecha) (elaboración propia).</i>	104
<i>Figura 66 Calles y lugares principales en Guanajuato (elaboración propia).</i>	105
<i>Figura 67 Tirantes máximos para el escenario 1 (elaboración propia).</i>	106
<i>Figura 68 Velocidades máximas para el escenario 1 (elaboración propia).</i>	107
<i>Figura 69 Caudales máximos para el escenario 1 (elaboración propia).</i>	108
<i>Figura 70 Localización de las secciones de control para el aforo de los gastos de escurrimiento (elaboración propia).</i>	109
<i>Figura 71 Hidrograma para el escenario 1 en las tres secciones de control (elaboración propia).</i>	109
<i>Figura 72 Placas de la inundación de 1905 (fuente propia).</i>	111
<i>Figura 73 Ubicación de las placas de inundación de 1905 (elaboración propia).</i>	111
<i>Figura 74 Tirantes máximos para el escenario 2 (elaboración propia).</i>	113
<i>Figura 75 Velocidades máximas para el escenario 2 (elaboración propia).</i>	114
<i>Figura 76 Caudales máximos para el escenario 2 (elaboración propia).</i>	115
<i>Figura 77 Gastos que ingresan a la alcantarilla (elaboración propia).</i>	115
<i>Figura 78 Hidrograma para el escenario 2 en las tres secciones de control (elaboración propia).</i>	116
<i>Figura 79 Evidencia fotográfica del desbordamiento de la presa en junio 2018.</i>	118
<i>Figura 80 Ubicación de puntos identificados de evidencia de junio 2018 (elaboración propia).</i>	118
<i>Figura 81 Rotura de la presa a los 5 minutos y 20 segundos. Vista de los tirantes en Iber® (fuente propia).</i>	121
<i>Figura 82 Tirantes máximos para el escenario 3 (elaboración propia).</i>	122
<i>Figura 83 Velocidades máximas para el escenario 3 (elaboración propia).</i>	122
<i>Figura 84 Caudales máximos para el escenario 3 (elaboración propia).</i>	123
<i>Figura 85 Hidrograma para el escenario 3 en las dos secciones de control (elaboración propia).</i>	124
<i>Figura 86 Hidrogramas para cada periodo de retorno en la sección de control 1 (elaboración propia).</i>	126
<i>Figura 87 Hidrogramas para cada periodo de retorno en la sección de control 2 (elaboración propia).</i>	126
<i>Figura 88 Hidrogramas para cada periodo de retorno en la sección de control 3 (elaboración propia).</i>	127
<i>Figura 89 Tirantes máximos promedio para cada periodo de retorno (elaboración propia).</i>	129
<i>Figura 90 Velocidades máximas promedio para cada periodo de retorno (elaboración propia).</i>	129
<i>Figura 91 Gasto máximo promedio para cada periodo de retorno (elaboración propia).</i>	130
<i>Figura 92 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).</i>	132
<i>Figura 93 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia).</i>	133
<i>Figura 94 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia).</i>	134
<i>Figura 95 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).</i>	135
<i>Figura 96 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).</i>	161
<i>Figura 97 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).</i>	161

<i>Figura 98 Caudales máximos para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia)</i> .....	162
<i>Figura 99 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia)</i> .....	162
<i>Figura 100 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia)</i> .....	163
<i>Figura 101 Caudales máximos para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia)</i> .....	163
<i>Figura 102 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia)</i> .....	164
<i>Figura 103 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia)</i> .....	164
<i>Figura 104 Caudales máximos para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia)</i> .....	165
<i>Figura 105 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia)</i> .....	165
<i>Figura 106 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia)</i> .....	166
<i>Figura 107 Caudales máximos para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia)</i> .....	166
<i>Figura 108 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 50 años (elaboración propia)</i> .....	167
<i>Figura 109 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 50 años (elaboración propia)</i> .....	167
<i>Figura 110 Caudales máximos para un periodo de retorno de 50 años (elaboración propia)</i> .....	168
<i>Figura 111 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 100 años (elaboración propia)</i> .....	168
<i>Figura 112 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 100 años (elaboración propia)</i> .....	169
<i>Figura 113 Caudales máximos para un periodo de retorno de 100 años (elaboración propia)</i> .....	169
<i>Figura 114 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 200 años (elaboración propia)</i> .....	170
<i>Figura 115 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 200 años (elaboración propia)</i> .....	170
<i>Figura 116 Caudales máximos para un periodo de retorno de 200 años (elaboración propia)</i> .....	171
<i>Figura 117 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 500 años (elaboración propia)</i> .....	171
<i>Figura 118 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 500 años (elaboración propia)</i> .....	172
<i>Figura 119 Caudales máximos para un periodo de retorno de 500 años (elaboración propia)</i> .....	172

## 1. INTRODUCCIÓN

Guanajuato es una ciudad con una amplia población flotante compuesta por estudiantes y turistas. Según la Secretaría de Turismo del Estado de Guanajuato, en 2017 Guanajuato recibió más de 29 millones de visitantes que acuden a zonas del centro histórico de la ciudad, tales como el Museo Regional de la Alhóndiga de Granaditas, el edificio neoclásico de la Universidad de Guanajuato, el Teatro Juárez, la calle subterránea Miguel Hidalgo y el callejón del Beso. Por lo que, si se presentan lluvias extraordinarias que puedan aumentar y desbordar la presa de la olla, hacen que la población (sobre todo la población flotante) tenga alta vulnerabilidad ante algún evento extremo.

La presa de la Olla es una construcción antigua por lo que su vida útil ha sido excedida y es muy probable que cuente con grandes volúmenes de azolve que reduzcan su capacidad de almacenamiento (que de acuerdo con la CONAGUA es de 70,000 m<sup>3</sup>).

En años recientes se cuentan con herramientas que permiten conocer el comportamiento de una lluvia extrema, como son los modelos numéricos. Para la rama de hidráulica se han generado modelos hidrológicos hidráulicos en dos dimensiones que permiten realizar escenarios de eventos pasados para conocer los alcances en cuanto a tirantes, caudales y velocidades presentadas y además las áreas afectadas. Esta información se puede generar de igual manera para eventos futuros mediante una probabilidad de ocurrencia en la precipitación y para estimar los posibles daños.

Estos programas de simulación se pueden clasificar de acuerdo con el costo que puede generar su uso o no, por lo que para el presente estudio se utilizará el programa de acceso libre "Iber®", ya que permite contemplar el área de aportación de la presa, el área inundable y procesos como el tránsito de avenidas en vasos.

## 1.1 Objetivos

### **Objetivo general**

Conocer el comportamiento del flujo superficial por el desbordamiento de la Presa de la Olla mediante una simulación hidrológica-hidráulica bidimensional.

### **Objetivos específicos:**

- Generar un modelo bidimensional de simulación de escurrimiento superficial para el desbordamiento de la presa de la Olla.
- Conocer el comportamiento del flujo superficial durante el evento ocurrido el 13 y 14 de junio del 2018 en el que se presentó una lluvia extraordinaria que causó el desbordamiento de la presa de la Olla.
- Generar un escenario del rompimiento de la cortina de la presa de la Olla que permita observar el comportamiento de flujo superficial en caso de falla en la presa.
- Establecer medidas de prevención o mitigación en caso de presentarse un evento similar al del 13 y 14 de junio del 2018.
- Crear lluvias de diseño para estimar las afectaciones posibles dados ciertos periodos de retorno.

## 1.2 Estructura del documento

El trabajo se estructura en tres partes principales; la primera expone conceptos y definiciones importantes para el caso de estudio, se aborda el tema de las presas, desde su clasificación hasta los tipos de fallas que podrían presentar y, específicamente, los tipos de fallas posibles en la presa de la Olla, también se definen y explican los conceptos referentes a modelización numérica y en particular sobre el modelo Iber<sup>®</sup> que se utilizará para el desarrollo del proyecto. La segunda parte es la metodología, que se divide en dos: la obtención de datos para la caracterización de la zona de estudio y la integración de la información en el programa Iber<sup>®</sup>. La tercera parte son los resultados donde se muestran mapas y gráficos de los datos obtenidos y se validan los cálculos realizados con el modelo acorde a evidencia de videos y fotografías.



## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Zona de estudio

#### 2.1.1 Guanajuato

De acuerdo con la información obtenida del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), la ciudad de Guanajuato, ubicada en el estado del mismo nombre, se encuentra en las coordenadas geográficas 21°00'57" de latitud norte y 101°15'13" de latitud oeste con una altitud de 2020 m s.n.m. Limita al norte con San Felipe; al este con Dolores Hidalgo; al sur con Salamanca e Irapuato y al oeste con Silao y León. La Figura 1 muestra la macro localización y micro localización de la zona de estudio. La extensión territorial del municipio es de 1,014.54 km<sup>2</sup>. Su área territorial representa el 3.28% de la superficie total del estado. La ciudad tiene una población de 171,709 habitantes (INEGI, 2010)

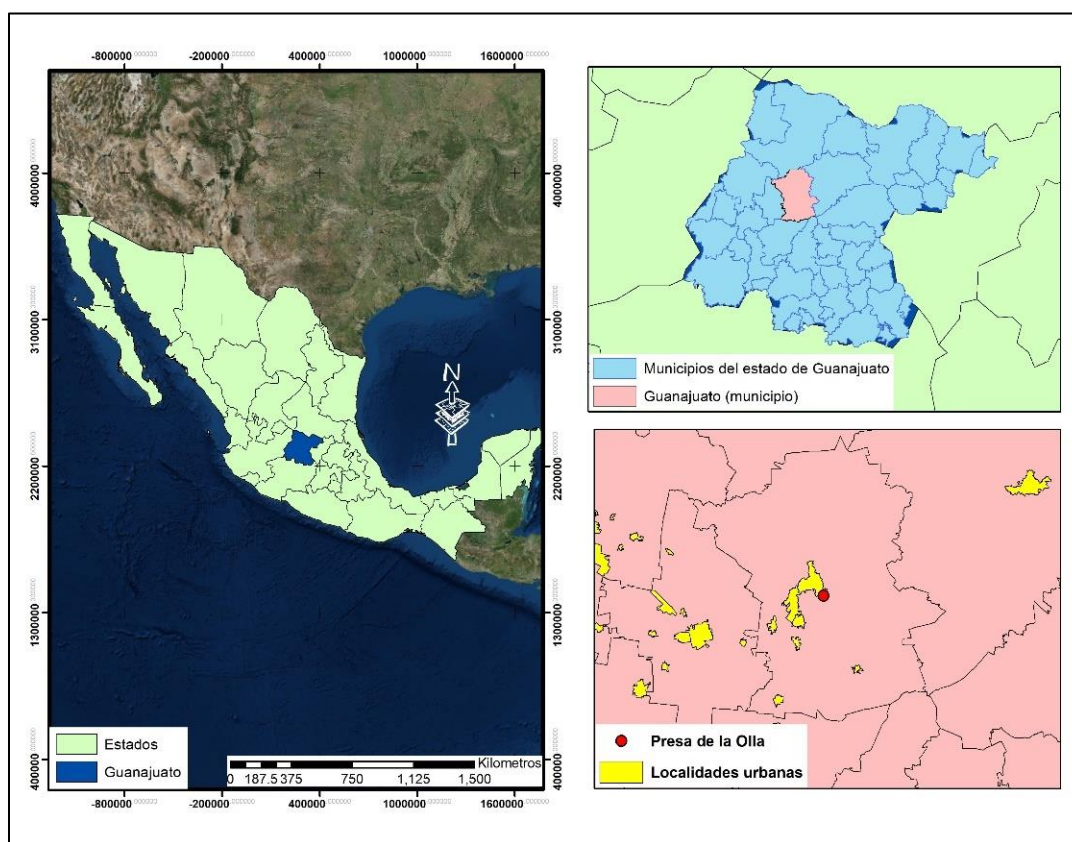


Figura 1 Localización de la zona de estudio (elaboración propia).

La sierra de Guanajuato ocupa la mayor parte del territorio del municipio. La altura media de las principales elevaciones es de 2,400 m s.n.m.

Existen dos tipos de climas: semicálido y templado subhúmedo. La temperatura media anual de 18.5°C, el promedio anual de precipitación es de 697 milímetros. En los meses de julio y agosto se observa una mayor incidencia de lluvias alcanzando un valor de 217 milímetros cada uno.

Entre los cerros de la sierra de Guanajuato se encuentran varios arroyos y ríos que, por el noreste, llegan a unirse para formar el río Silao y, por el norte desembocan en la presa de La Esperanza.

En el norte de la ciudad, en el poblado de Santa Rosa, se origina el río Guanajuato, que tiene varios tributarios con fuertes pendientes, tales como los arroyos de La Cata, Durán, Pastita, San Javier, Marfil y Noria Alta, que posteriormente llegan a la zona urbana del municipio. La mayoría de los arroyos que atraviesan la zona urbana de la ciudad se encuentran embovedados (Protección Civil Guanajuato).

#### 2.1.1 Presa de la olla

La presa de la Olla, ubicada en la región Lerma Santiago Pacífico comenzó su construcción en el año 1741 y finalizó en 1749. La presa tiene una capacidad de almacenamiento de 70,000 m<sup>3</sup>. La presa de la Olla lleva ese nombre debido a que se ubicaba en las orillas del municipio en el rancho de la Olla, con la urbanización la presa ha pasado a ubicarse en una zona turística y con viviendas muy cercanas a los alrededores.

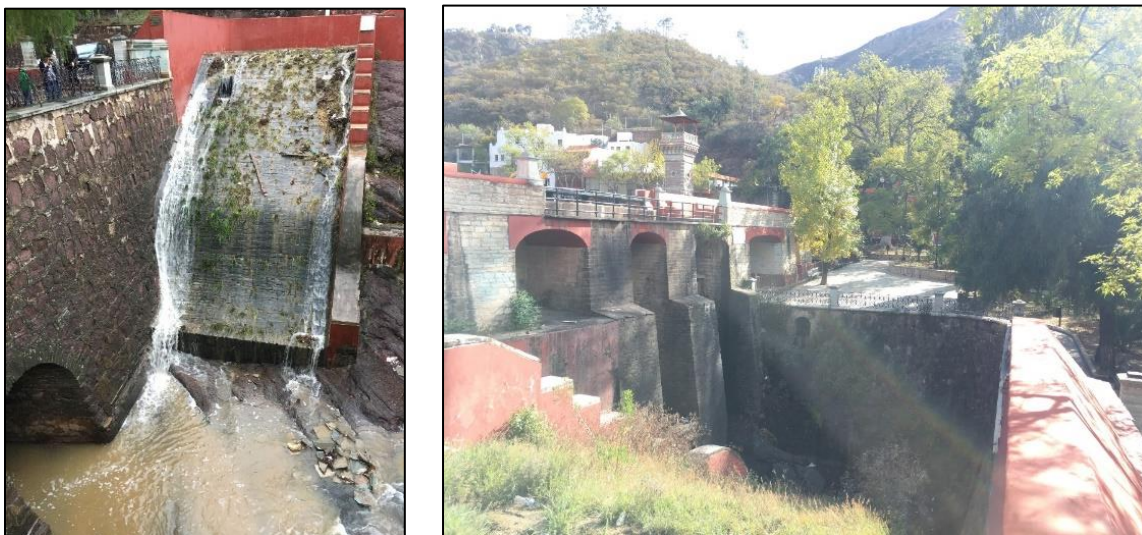
La Figura 2 muestra la presa de la Olla a finales del siglo XVIII, varios años antes de que la urbanización llegara a la zona.



Figura 2 Presa de la Olla a fines del siglo XVIII (Marmolejo, 1883).



En 1849 se comenzó el entubamiento aguas abajo de la presa, la salida del vertedor al río se observa en la Figura 3 y en 1875 se construyó el parque Florencio Antillón que se encuentra al pie de la cortina de la presa de la Olla.



*Figura 3 Vertedor y cortina de la presa de la Olla (fuente propia).*

Los datos técnicos referentes a la presa se abordarán en el apartado 4.1.1 donde se menciona información obtenida del Inventario de presas de la CONAGUA

## 2.2 Inundaciones en Guanajuato

Guanajuato tuvo sus orígenes debido a su capacidad de explotación minera durante la época de la Nueva España, sobre todo para la extracción de plata. A mediados del siglo XVI Guanajuato era el principal centro minero.

La producción minera se divide principalmente en dos procesos, extracción y beneficio. El proceso de beneficio consiste en separar y obtener los minerales en su forma pura. Ese proceso de beneficio requiere de una gran cantidad de agua, por lo que las haciendas de beneficio se establecieron en las riberas de los ríos provocando que el río Guanajuato (el río principal que atraviesa toda la ciudad como se muestra en la Figura 4) se fuera llenando de una gran cantidad de azolve. El exceso de este azolve generado por las haciendas de beneficio fue causando que el volumen útil del río disminuyera considerablemente y, por lo tanto, al presentarse lluvias hubiera inundaciones.

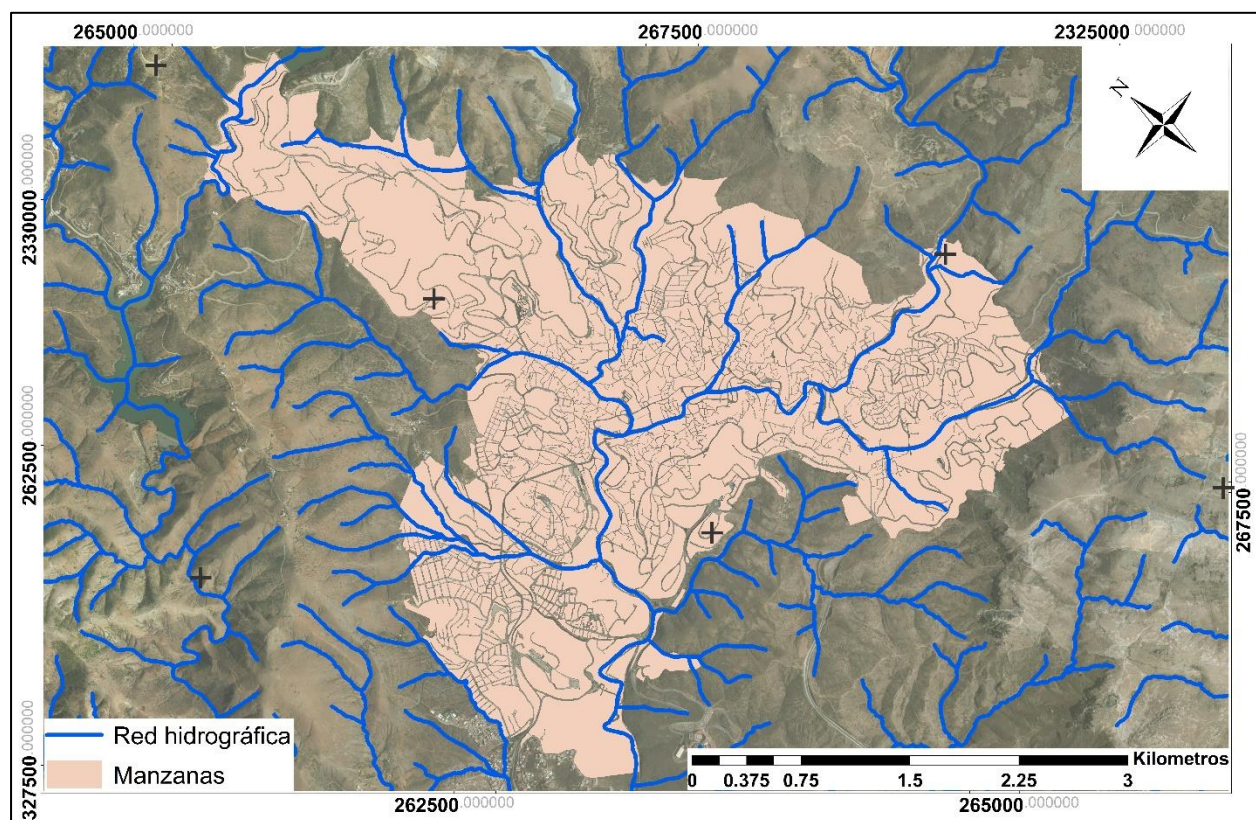


Figura 4 Municipio de Guanajuato y red hidrográfica (elaboración propia).

En 1883 comenzó la construcción del Túnel El Cuajín, planeado como una solución para las inundaciones, este fue el primer túnel de la ciudad y tiene una longitud de 1,162 metros y 7 metros de diámetro, el túnel se construyó para captar las aguas provenientes del monte de San Nicolás y llevarlas fuera de la ciudad.

En el año 1950 se comenzó el proceso de entubación de las aguas negras, estas tuberías se colocaron por debajo del cauce del río.

La calle subterránea (Figura 5) representa la zona más vulnerable en Guanajuato en caso de avenidas extremas. Esta calle, que solía ser el río, y los túneles de la ciudad son ahora utilizados como una de las vías principales para el transporte en Guanajuato, además de ser también estacionamiento para los vehículos. Los lugares donde se situaban las haciendas de beneficio, adentro de la calle subterránea, son actualmente estacionamientos.





Figura 5 Calle subterránea "Miguel Hidalgo" (fuente propia).

Los primeros registros con datos de inundaciones se encuentran en las “Efemérides Guanajuatenses” (Marmolejo, 1883), que narran los acontecimientos más antiguos hasta finales del siglo XVII. De las efemérides guanajuatenses y “La inundación de Guanajuato” (Gonzalez, 1905) se realizó una compilación de la información, con el objetivo de analizar las calles que han sido más afectadas históricamente y plasmarlo en la Tabla 1 y en el mapa de la Figura 7. Esta información se utilizará posteriormente para definir el área de inundación del presente proyecto.

Se encontró que hasta la inundación de 1905 una de las principales calles afectadas por las inundaciones es la actual avenida Juárez, pues el templo de Belén llegó incluso a quedar inutilizado por varios años debido a los daños. El principal motivo de esto es que, en 1964 se inauguró la calle Miguel Hidalgo, también conocida como calle subterránea (Figura 6), la cual representa la principal salida del agua durante las lluvias.

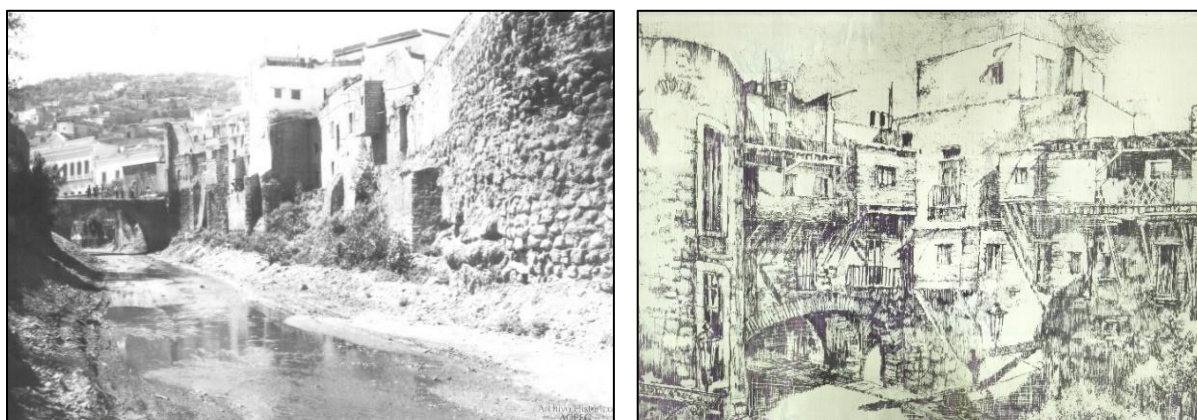


Figura 6 Antiguo cauce del Río Guanajuato. Ahora calle subterránea (Gobierno del Estado de Guanajuato).



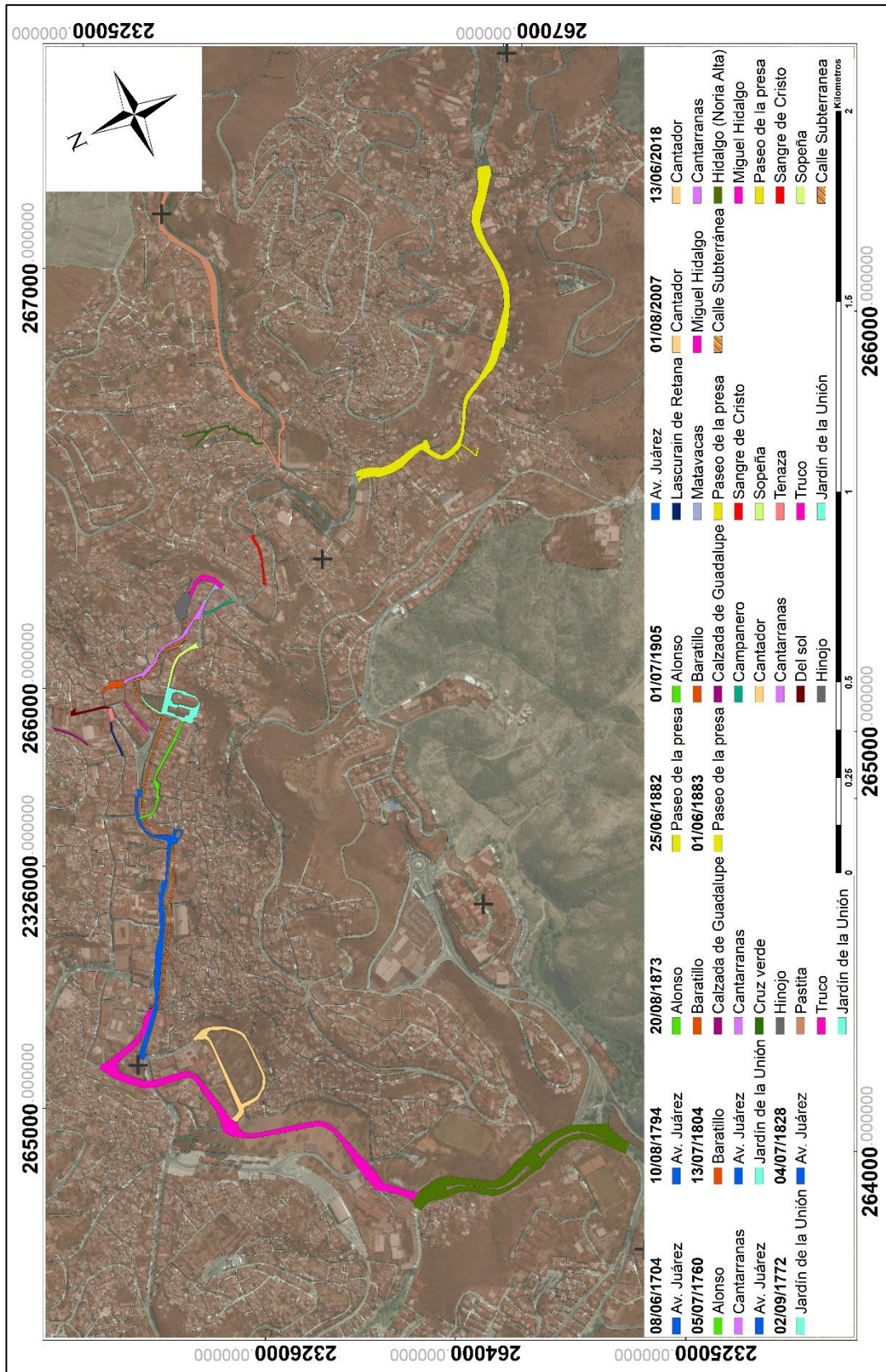


Figura 7 Mapa de las calles afectadas históricamente (elaboración propia).

Tabla 1 Inundaciones históricas en Guanajuato (elaboración propia. con información de (Gonzalez, 1905)).

FECHA	CAUSA	PRINCIPALES CALLES AFECTADAS	DAÑOS	OTROS DATOS
8 de junio 1704	Desbordamiento del río en el punto que hoy ocupa el templo de Belén.		1 niño muerto 1 niño desaparecido	
1741				Se comienza la construcción de la presa de la Olla en agosto de este mismo año.
5 de julio 1760	"Culebra de agua"	Cantarranas, la Nueva, Alonso, Belén.	Más de 240 casas y haciendas arruinadas, y aproximadamente 200 muertos.	El agua subió "más de tres varas" (1 vara = 83.59 cm, por lo que se estima el agua alcanzó los 2.5 metros) en el Convento de S. Pedro de Alcántara (actualmente Teatro Juárez).
2 de septiembre 1772			Templo de San Diego.	Después del desastre el Ayuntamiento expidió orden a los propietarios de minas para que robustecieran sus terreros y el río dejara de azolvase con los desechos. (No se siguió esta orden).
27 de Julio 1780			El templo de San Diego derribado y lleno de cadáveres. Mina de Rayas y sus centenares de trabajadores.	El desastre ocurrió a las 9:00 pm. La lluvia duró 12 minutos. El 15 de abril de 1781 se repitió la orden a los propietarios de minas. No se cumplió.



Tabla 1 (Continuación) Inundaciones históricas en Guanajuato (elaboración propia con información de (Gonzalez, 1905)).

FECHA	CAUSA	PRINCIPALES CALLES AFECTADAS	DAÑOS	OTROS DATOS
10 de agosto 1794		Calle de Belén (Actualmente Av. Juárez)		
13 de julio 1804		Plazas del Baratillo y de San Diego, calle de Belén.		La inundación ocurrió a las 5:00 pm.
4 de julio 1828		Calle de Belén (Actualmente Av. Juárez)	Templo de Belén.	El templo queda inutilizado por algunos años.
2 de julio 1867	Río San Nicolás.			La presa de la Olla no se llenó, toda la avenida provino del río del monte de San Nicolás.
2 de septiembre 1868			Se derramaron las presas de Zaragoza, de los Chicos y santa Gertrudis.	
20 de agosto 1873		Barrio de Pastita, el Hinojo, Matavacas, Cantarranas, el Baratillo, el Truco, la Cruz Verde, la Unión, Alonso, la Calzada.	Templo de San Diego, Templo de Belén. Se estimaron, por lo menos, \$156,000 pesos en daños.	El desastre ocurrió a las 8:00 pm. El nivel máximo del agua en las zonas bajas de la ciudad llegó a los 2.5 metros.
25 de junio 1882		Paseo de la presa	Terraplén del ferrocarril arrastrado por la corriente.	Comenzó a las 4:00 pm.
Junio 1883		Ferrocarril y Paseo de la presa.		
28 de junio 1885				
30 de septiembre 1902		Marfil.		

Tabla 1 (Continuación) Inundaciones históricas en Guanajuato (elaboración propia con información de (Gonzalez, 1905)).

FECHA	CAUSA	PRINCIPALES CALLES AFECTADAS	DAÑOS	OTROS DATOS
30 de junio y 1 de julio 1905		Paseo de la Presa, Garridos, San Agustín, San Sebastián, Sangre de Cristo, Campanero, Matavacas, Hinojo, Sopeña, Cantarranas, Puente del Rastro, Jardín de la Unión, Plaza del Baratillo, Sopeña, Alonso, Calle Nueva de la Compañía, el Truco, Compañía, Calle del Sol, la Tenaza, Plaza Mayor, los Ángeles, Belén, Calzada, Cantador, Marfil.	Se destruyó la parte alta de la cortina de la presa de San Renovato. Lista de 54 personas fallecidas, aunque algunos periódicos estimaron 1,000. Se estimó un gasto de 500m <sup>3</sup> /s.	Nivel máximo registrado en la esquina de la calle Nueva y el Truco ascendió a muy cerca de 2 metros. Recorrió aproximadamente 4 km desde la Presa de la Olla hasta el Cantador.
7 de julio 1911			Hospicio de las niñas de la presa.	
1 de agosto 2007	Se estima que en 45 minutos cayeron más de 35mm de agua. La presa de la Olla se desbordó.	Calle subterránea el agua alcanzó 50 cm de altura. En pastitos el agua alcanzó 80 cm de altura. Jardín del Cantador		
13 y 14 de junio 2018	Se desbordó la Presa de la Olla.	Paseo de la Presa, Sangre de Cristo, Calle subterránea Miguel Hidalgo, Cantarranas, Sopeña, plaza Allende, Noria Alta, el Cantador y Pastitos.		Se registraron 117 milímetros en 26 horas y 40 min. La calle subterránea se inundó con más de 70 centímetros de agua que dejó varados a al menos 20 vehículos.

### 3. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

#### 3.1 Presas

##### 3.1.1 Definición y clasificación de presas

Las presas son barreras artificiales que están construidas generalmente con materiales térreos o a base de concreto con la finalidad de controlar o de almacenar agua para una gran variedad de usos. Se pueden colocar a través de una corriente de agua o fuera del cauce. Las presas varían en altura desde unos cuantos metros hasta más de 300 metros y la longitud de su corona puede ser de varios kilómetros (CONAGUA, 1999).

Las presas se construyen con distintos propósitos, pueden ser para almacenar el agua y ser utilizada para riego o para abastecimiento de agua a la población, para producir energía hidroeléctrica o para evitar inundaciones en alguna población aguas abajo.

En el esquema de la Figura 8 se muestra una clasificación de presas acorde a sus materiales de construcción y a su concepción estructural (Vega Roldán & Arreguín Cortés, 1992)

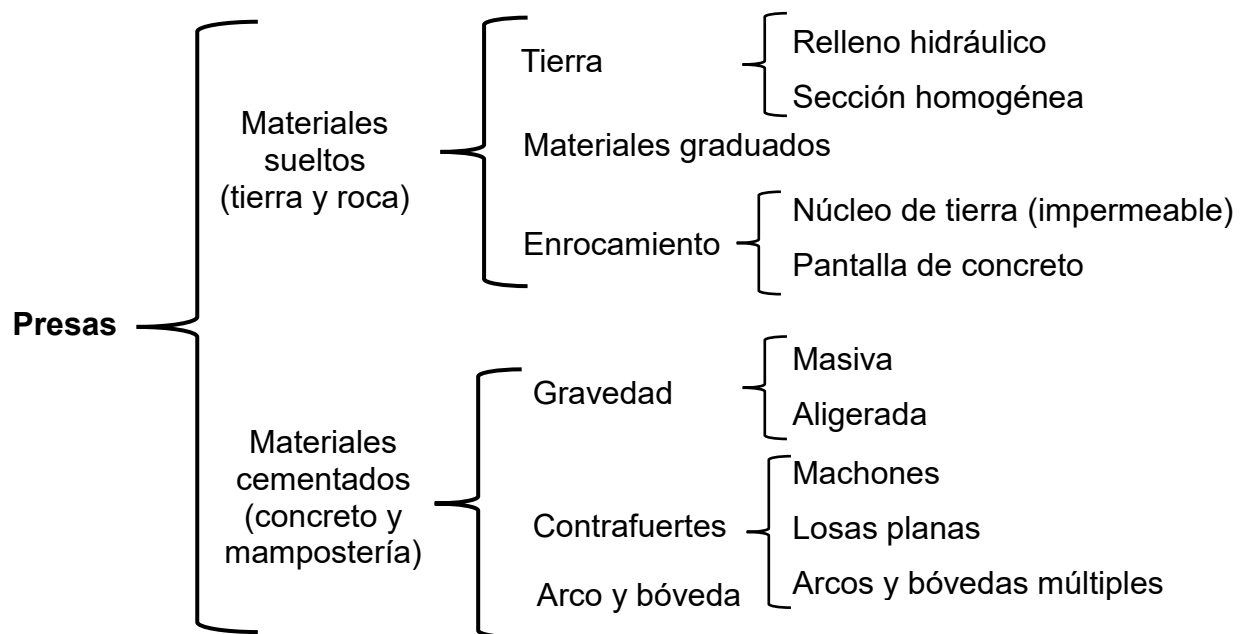


Figura 8 Tipos de presas (Vega Roldán & Arreguín Cortés, 1992).

### 3.1.2 Normativa internacional

La normativa internacional relativa a presas ha sido establecida por la ICOLD (Comisión Internacional de Grandes Presas, por sus siglas en inglés). La ICOLD es una organización internacional no gubernamental que provee un foro para el intercambio de conocimientos y experiencias en la ingeniería de presas.

La organización lidera la profesión para garantizar que las presas se construyan de manera segura, eficiente, económica y sin efectos perjudiciales para el medio ambiente. Desde finales de los años sesenta, se hizo hincapié en temas de actualidad como la seguridad de las presas, el control del rendimiento, el reanálisis de represas y aliviaderos más antiguos, los efectos del envejecimiento y el impacto ambiental (ICOLD, 2018).

### 3.1.3 Normativa en México

La principal normativa en México en materia de agua es la Ley de Aguas Nacionales. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la autoridad encargada de la administración del recurso.

La operación segura de presas está plasmada en la norma mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015. Esta norma fue elaborada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Comité Mexicano de Grandes Presas (CMGP), Protección civil, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estas organizaciones e instituciones son las que, en México, se encargan de la regulación y normatividad de las presas de almacenamiento.

### 3.1.4 Causas y tipos de fallas en presas

- **Sucesos naturales.** Avenidas extraordinarias o la ocurrencia de un sismo pueden provocar desbordamientos o fallas en presas.
- **Diseño o construcción inadecuados.** Este problema se presenta, sobre todo, en presas antiguas, pues su diseño se realizaba cuando no se contaba con sistemas de información meteorológica.

- **Antigüedad y falta de mantenimiento.** Las presas antiguas han estado sometidas al tiempo, el viento y la erosión producida por el agua. Las cargas, el deterioro y el azolve hacen necesario un mantenimiento adecuado para evitar fallas.
- **Filtraciones y fugas.** Las filtraciones y fugas pueden inducir erosión interna o tubificación en los suelos.
- **Fallas en el equipo mecánico.** Daños o mal funcionamiento de las compuertas del vertedor pueden provocar el desbordamiento de la presa y consecuentemente una falla.
- **Mal funcionamiento u operación inadecuada.** La operación inadecuada de compuertas y válvulas evita que se descargue el volumen adecuado de agua provocando desbordamientos.

Los principales tipos de fallas (Benassini) que se presentan en las presas son por:

- **Desbordamiento.** Debido al mal diseño, a eventos meteorológicos que superen los esperados en el diseño, o al incorrecto funcionamiento y mantenimiento de la presa.
- **Erosión interna.** Por una cimentación inadecuada.
- **Deslizamiento.** Debido a la presencia de suelos blandos o a la ocurrencia de un sismo.

### 3.1.5 Presas en el municipio de Guanajuato

El inventario de presas de la CONAGUA (CONAGUA, 2012) tiene registradas 19 presas y bordos en el municipio de Guanajuato; a continuación se presenta la lista de las más importantes y la Figura 9 muestra la ubicación de 17 de las presas del inventario (se excluyeron dos por ser una presa de jales y la otra un bordo).

- **Presa de la olla.** Su construcción inició en 1741 con el objetivo de abastecer a la población de agua potable. Actualmente su uso es recreativo.
- **Presa de San Renovato.** Se construyó en 1950 para control de avenidas y tiene uso recreativo. Es una presa pequeña de mampostería y de gravedad.

- **Presa de Mata.** Su nombre oficial es “Las Torres”. Se construyó en 1970. Es una presa grande de materiales graduados.
- **Presa de La Esperanza.** Su nombre oficial es “Manuel González”. Se construyó en 1897. El agua de esta presa se utiliza para abastecer de agua potable a la población de Guanajuato y tiene un gasto máximo de 60 litros por segundo.
- **Presa de La Purísima.** Se construyó en 1979 por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) para almacenamiento y control de avenidas. Se utiliza para el riego de 4,000 hectáreas. Es una presa grande de tierra, construida con materiales graduados.
- **Presa de Yerbabuena.** Se construyó en 1900 para almacenamiento. Su agua se utiliza para el riego de 10 hectáreas. Es una presa pequeña de contrafuertes.
- **Presa Cruz Negra.** Se construyó en 1955. El agua se utiliza para el riego de 55 hectáreas. Es una presa pequeña, de gravedad y de mampostería.
- **Presa el Cubo II.** Es una presa mediana de gravedad, de mampostería. El agua almacenada se utiliza para riego.
- **Presa La Soledad.** Se construyó en 1956 por la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH). En 1974, se sobre elevó la cortina de 44 a 51 m y se cambió el vertedor de canal lateral en margen derecha, por otro de abanico en el puerto lado derecho del vaso. Se construyó para almacenamiento y control de avenidas.
- **Presa Peralillo.** Se construyó en el año 2000 por la Secretaría de Obras Públicas (SOP), se utiliza para abastecimiento de agua potable. Es una presa grande de gravedad.
- **Presa Pozuelos.** Se construyó en 1791. Se utiliza para riego. Es una presa grande de contrafuertes hecha de mampostería
- **Presa Los Santos.** Se utiliza para riego. Fue construida en el año de 1798 de mampostería y de tipo de contrafuertes.

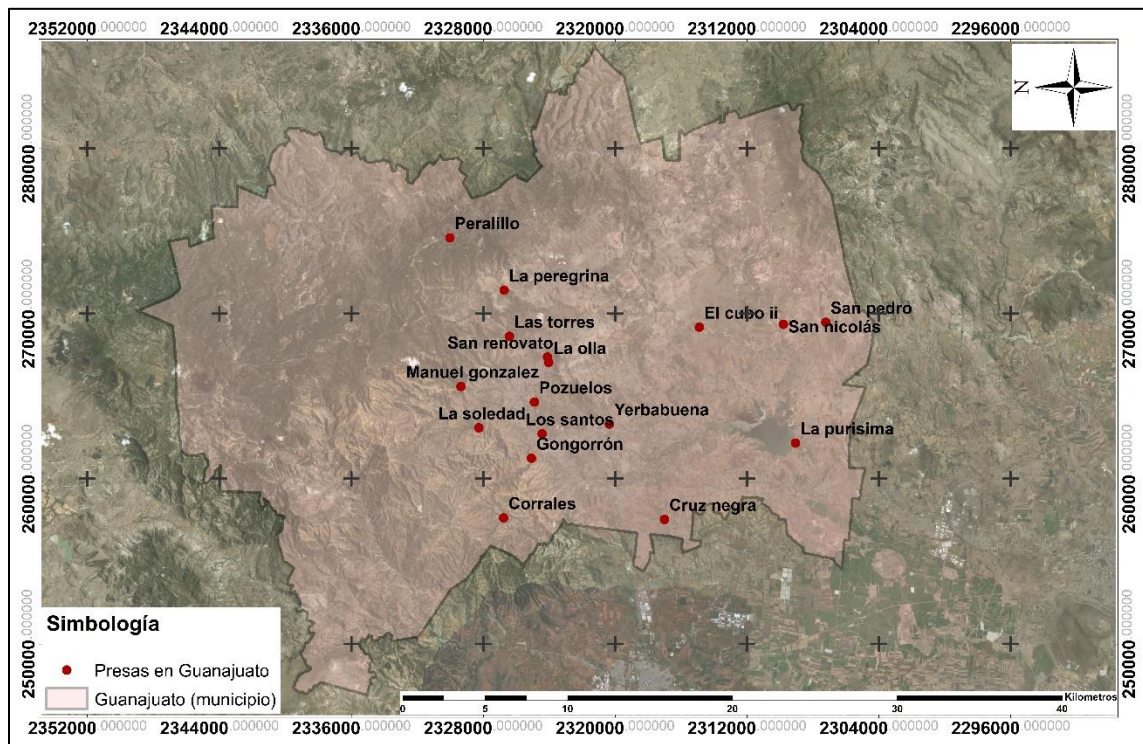


Figura 9 Ubicación de las presas en el municipio de Guanajuato (elaboración propia).

### 3.1.6 Posibles fallas en la presa de la Olla

Dada la información anterior es posible inferir el tipo de fallas que podrían presentarse en la presa de la Olla. Se identifican las siguientes posibles causas para una falla:

- Por su antigüedad, no se tiene la seguridad de que el diseño y construcción de la presa se haya realizado de la manera más efectiva para las condiciones meteorológicas de la zona.
- La intensidad de las tormentas a nivel nacional ha aumentado de manera considerable en los últimos años, por lo que, aún si el diseño de la presa en 1741 era correcto para las condiciones meteorológicas de la zona, podría ya no serlo actualmente.
- El nivel de azolve que la presa presentaba en 2001 es muy alto lo que reduce mucho el volumen útil de almacenamiento de la presa. Se desconoce el nivel de azolve actual.

- La edad de la infraestructura de la presa es un factor que podría provocar que la presa tuviera una falla debido a las cargas y al deterioro de los materiales.

Por lo que se considera que la presa es susceptible a presentar desbordamientos y posibles rompimientos de la cortina. Cabe mencionar que cuando la presa fue construida se encontraba en una zona alejada de la mancha urbana, sin embargo, actualmente es una zona muy habitada e incluso turística, por lo que los daños que provocaría actualmente serían mayores a los (posiblemente) estimados durante su diseño.

### 3.2 Modelización numérica

La modelización numérica consiste en simular un fenómeno real por medio de herramientas computacionales.

En hidráulica los modelos pueden clasificarse básicamente en tres: físicos, analógicos y matemáticos.

Los modelos físicos permiten la clara observación de la obra de ingeniería para poder ser optimizada, se utilizan factores de reducción o de ampliación (escala).

Los modelos analógicos consisten en utilizar las relaciones matemáticas existentes entre dos fenómenos, de manera que, se utiliza un modelo de un fenómeno más simple, aunque diferente al real para obtener información de éste.

Los modelos matemáticos utilizan ecuaciones matemáticas para definir el fenómeno de estudio, estos modelos matemáticos se clasifican también en tres: determinísticos (no consideran la probabilidad de ocurrencia del fenómeno), estocásticos (se utilizan variables aleatorias probabilísticas) y modelos de simulación numérica (se utilizan ecuaciones diferenciales que se resuelven con técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos).

Dentro de la modelación hidráulica se puede trabajar con modelos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. Cada uno de estos se utiliza para fines diferentes. Esta clasificación se ejemplifica en la Figura 10.



La modelación bidimensional es la más utilizada para modelos de presas, pues es más precisa que la unidimensional, pero no consume tantos recursos como una modelación tridimensional.

El software utilizado para la realización de este proyecto (el cual se describirá posteriormente) permite la realización de modelos de simulación numérica bidimensional y utiliza la técnica de volúmenes finitos.

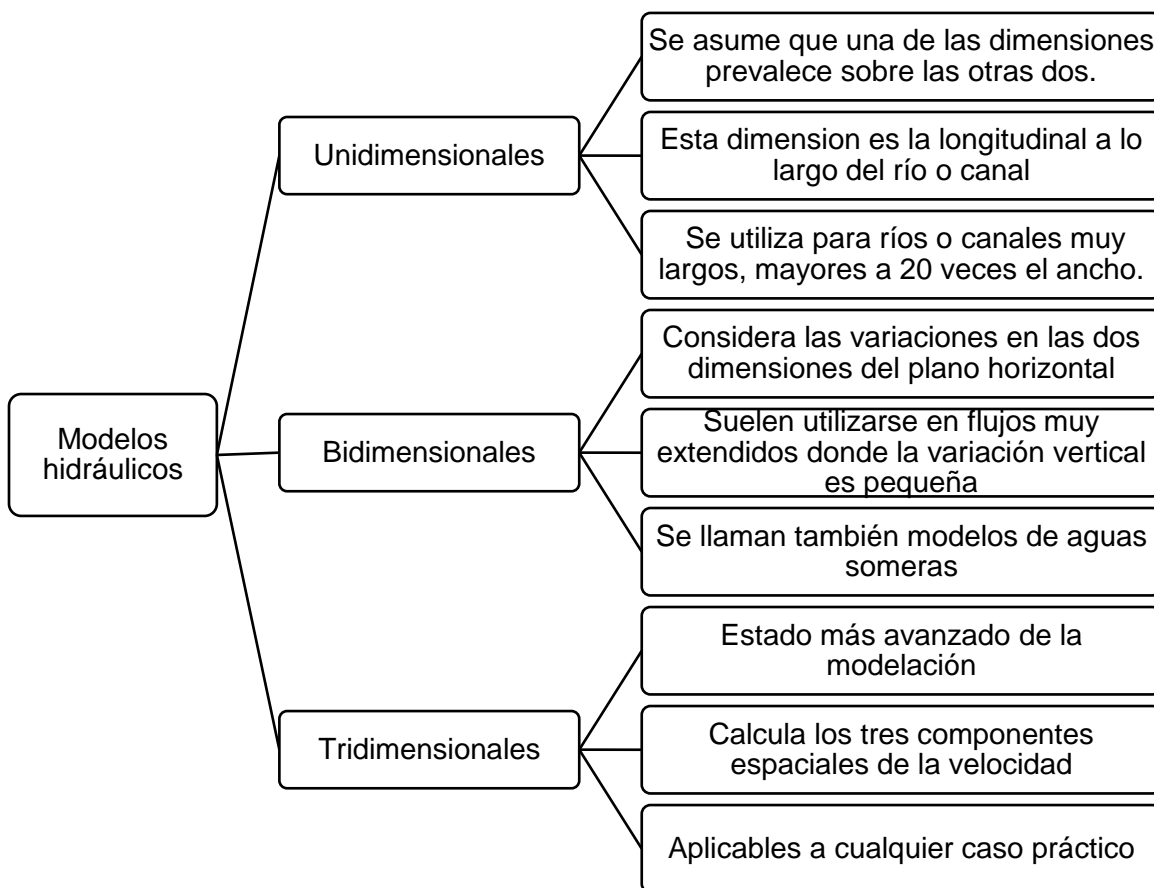


Figura 10 Dimensiones de los modelos hidráulicos (elaboración propia con información de (Vásquez Ojeda, 2003)).

Las herramientas para la resolución del flujo de agua en lámina libre en dos dimensiones más utilizadas son: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

El método de las diferencias finitas emplea el desarrollo en series de Taylor, tiene como ventaja la simplicidad teórica y que sus resultados se pueden volver más precisos aumentando el orden de aproximación de las derivadas, sin embargo, para poder utilizar este método se requiere de mallas estructuradas por lo que solo es útil en geometrías sencillas. El método de volúmenes finitos utiliza las ecuaciones de conservación en su forma integral, su ventaja es que es un método flexible por lo que puede implementarse en mallas estructuradas o no estructuradas, se basa en las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y la energía, es el método más utilizado para resolver flujos con geometrías complejas. El método de los elementos finitos se utiliza para mallas no estructuradas y para fluidos no newtonianos, no es tan utilizado debido a que en ciertos casos es equivalente al método de volúmenes finitos y el esfuerzo matemático es mucho mayor (Sánchez Vázquez, 2004).

Programas como Mike-21, Sobek o TufLOW2D, utilizan esquemas en diferencias finitas, lo que conlleva limitaciones en la flexibilidad de la malla y en el cálculo de soluciones con discontinuidades. Otras, como Telemac2D, los distintos módulos de cálculo de SMS y FLO-2D, utilizan elementos finitos, lo que permite más flexibilidad en la malla de cálculo al trabajar con mallas no estructuradas. La tendencia actual se decanta claramente hacia la metodología de volúmenes finitos, aprovechando los importantes desarrollos habidos en las últimas décadas con este tipo de esquemas para las ecuaciones de las aguas someras. Algunas de las herramientas disponibles y que utilizan volúmenes finitos son Infoworks, Guad2D, las últimas versiones de Mike-21 e Iber<sup>®</sup> (Bladé, y otros, 2012).

### 3.2.1 Modelo numérico Iber<sup>®</sup>

Iber<sup>®</sup>, es un software para simulación hidráulica en dos dimensiones que simula el flujo libre en ríos o en este caso en calles, puede resolver hidrodinámica (resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales), turbulencia, transporte de sedimentos y procesos de calidad de agua.

Es un programa de acceso libre que está disponible en los idiomas español e inglés y que puede descargarse desde su página de internet de donde también se pueden descargar algunos manuales, encontrar tutoriales y un foro de ayuda.

Iber<sup>®</sup> fue desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE).

Iber<sup>®</sup> se desarrolló a partir de 2 herramientas de modelización numérica bidimensional ya existentes, Turbillón y CARPA.

El programa Iber<sup>®</sup> cuenta con cuatro módulos de cálculo, los cuales trabajan sobre una malla estructurada o no estructurada. El software nos permite obtener valores de parámetros tales como velocidad, cota, caudal, número de Froude y tirantes.

Iber<sup>®</sup> tiene varias aplicaciones en el campo de la hidráulica, tales como la simulación del flujo libre en cauces naturales, la evaluación de zonas inundables, cálculos hidráulicos de canales, cálculos de procesos de transporte de sedimentos, entre otros.

### Ecuaciones

Los modelos numéricos trabajan basándose en ecuaciones que representan la realidad del fenómeno. Por lo que el programa Iber<sup>®</sup> utiliza las ecuaciones de Saint Venant incorporando turbulencia y rozamiento superficial por viento (Ecuaciones 1, 2 y 3).

### Condiciones de contorno y condiciones internas

Las condiciones de contorno, en ecuaciones diferenciales, se refieren a los valores que toman los campos en las fronteras de los dominios.

Iber<sup>®</sup> tiene contornos cerrados (impermeables, no permiten el paso del agua) y contornos abiertos por los cuales entra y sale el agua del dominio de cálculo.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) \\ = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) \\ = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

$h$  = Tirante

$U_x, U_y$  = Velocidades horizontales promediadas en profundidad

$g$  = Aceleración de la gravedad

$\rho$  = Densidad del agua

$Z_b$  = Cota de fondo

$\tau_s$  = Fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento

$\tau_b$  = Fricción debida al rozamiento del fondo

$v_t$  = Viscosidad turbulenta

Para las condiciones de contorno de entrada se pueden asignar caudales totales o específicos o una cota de agua. Para las condiciones de contorno de salida, si el régimen es subcrítico se puede utilizar una condición tipo vertedero, una condición de nivel dado o una curva de gasto, en el régimen supercrítico o crítico no es necesario asignar parámetros. (CEDEX, GEAMA, FLUMEN, & CIMNE, Iber Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario, 2015)

Las condiciones internas se utilizan para modelar estructuras hidráulicas tipo compuertas, vertederos o puentes que entran en carga. Los tipos de condiciones que Iber® permite utilizar son vertedero, compuerta, vertedero-compuerta, o coeficiente de pérdidas localizadas.

### Esquemas numéricos

Los esquemas numéricos utilizados en Iber<sup>®</sup> son especialmente apropiados para la modelización de cambios de régimen y de frentes seco-mojado (frentes de inundación) (Bladé, y otros, 2012). Los frentes seco-mojado son las celdas que están ubicadas entre una zona seca y una zona mojada, es importante su correcto tratamiento numérico para evitar soluciones inestables. El tratamiento de los frentes seco-mojado en Iber<sup>®</sup> es estable, conservativo y no-difusivo. (CEDEX, GEAMA, FLUMEN, & CIMNE, Iber Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico, 2015)

### Mallas de cálculo

Para que Iber<sup>®</sup> sea capaz de resolver las ecuaciones diferenciales se realiza un mallado, esta malla puede ser estructurada o no estructurada.

Las mallas estructuradas tienen elementos cuadrados, tienen ventajas numéricas, sin embargo, es difícil que estas formas se adapten en hidráulica fluvial. Las mallas no estructuradas tienen elementos irregulares que tienen la facilidad de adaptarse, lo que las hace especialmente útiles hidráulica fluvial (Cea & Bladé, 2008). Ejemplos de los dos tipos de mallas se observan en la Figura 11.

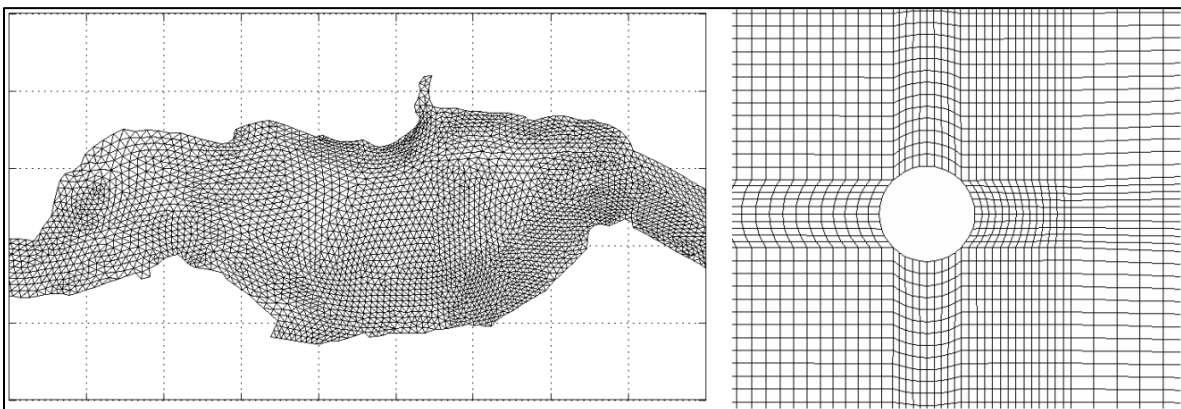


Figura 11 Ejemplos de malla no estructurada (izquierda) y estructurada (derecha) (Cea & Bladé, 2008).

### *Preproceso y postproceso*

La interfaz de Iber<sup>®</sup> está realizada en base al programa GiD, el cual es un pre y post procesador para simulaciones numéricas, integra modelado geométrico (CAD), generación de malla, análisis de datos, transferencia de datos, operaciones postproceso y visualización de resultados. Este programa ha sido desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). (CIMNE, 2018)

#### 3.2.2 Fallas de presas en Iber<sup>®</sup>

“El cálculo de las zonas afectadas por la rotura total o parcial de una presa o de una balsa de contención es una posible aplicación de los modelos de aguas someras bidimensionales, que proporcionan en estos casos una buena relación entre precisión en los resultados y complejidad del modelo de cálculo. El modelo debe ser capaz de resolver cambios de régimen y ondas de choque de forma estable y precisa. Los esquemas numéricos implementados en Iber<sup>®</sup> (de tipo Godunov) son especialmente adecuados para el cálculo de este tipo de flujos.” (Bladé, y otros, 2012)

Para el análisis de la rotura de presas Iber<sup>®</sup> cuenta con dos métodos de falla diferentes: el primero es un método de falla trapezoidal en el cual se deben ingresar todas las dimensiones finales de la brecha como coordenadas del eje de falla, cota de fondo de la brecha, ancho de fondo y ancho de cresta de la brecha, tiempo de inicio de la falla y tiempo final de la falla; el segundo método se basa en los criterios dados por la Guía Técnica de Clasificación de Presas en función del Riesgo Potencial. (Cuervo Muñoz, 2012).

La Guía Técnica de Clasificación de Presas en función del Riesgo Potencial es un documento de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente de Madrid, España (1996).

Esta guía tiene como objetivo plantear con carácter orientativo una metodología general de aplicación y el contenido mínimo de la información que ha de acompañar a las propuestas de clasificación (Madrid, 1996).

En este documento se plantea el segundo método mencionado por Muñoz (Cuervo Muñoz, 2012) que menciona que se deben ingresar las coordenadas de formación del eje de la brecha, la cota de elevación de la cresta de la presa, la cota de fondo de la brecha, el volumen del embalse (volumen de agua efectiva que afecta la formación de la brecha) y el instante de inicio de la falla. Las dimensiones finales de la brecha y el tiempo total de rotura serán calculadas por el programa de acuerdo con las especificaciones.

### 3.2.3 Integración de la información en Iber®

A continuación, se describen en orden, de manera resumida, los datos que deben ingresarse a Iber® para el preproceso del modelo de simulación, se ampliará y profundizará en cada uno de éstos en el siguiente capítulo.

- La geometría de la zona de estudio con las localidades amanzanadas y la creación de superficies NURBS (acrónimo inglés de non-uniform rational B-spline).
- Se define una condición de contorno en el perímetro de la zona de estudio.
- Se asigna el hietograma con los datos de la precipitación y se define el área de afectación.
- Se asignan pérdidas por el método de Horton, modelo lineal, Green & Ampt o SCS.
- Se genera la malla, en este caso no estructurada.
- Se integra al modelo la información de la rugosidad del terreno previamente estudiada y definida por los coeficientes de Manning.
- Se asignan las elevaciones a la malla por medio del modelo digital de elevaciones trabajado en el sistema de información geográfica.
- Se establecen las condiciones iniciales, dentro de las que se considera el bordo libre.
- Se selecciona el tiempo de simulación y el intervalo para poder realizar los cálculos.

## 4. METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para la construcción del modelo bidimensional de escurrimiento superficial en Iber® puede dividirse en dos: la caracterización de la zona de estudio y la integración de la información en Iber®. La zona de estudio se divide en tres: la zona urbana, la cuenca de aportación y la presa de la Olla, por lo que se definen las características de cada una, además de algunas en común como la rugosidad, las pérdidas por infiltración, las elevaciones del terreno y la precipitación. Una vez que se cuenta con la información referente a las características de la zona de estudio, dicha información se integra en el programa Iber® siguiendo los pasos que se muestran en el diagrama de la Figura 12. Cada uno de los procedimientos mostrados se definirá en este apartado.

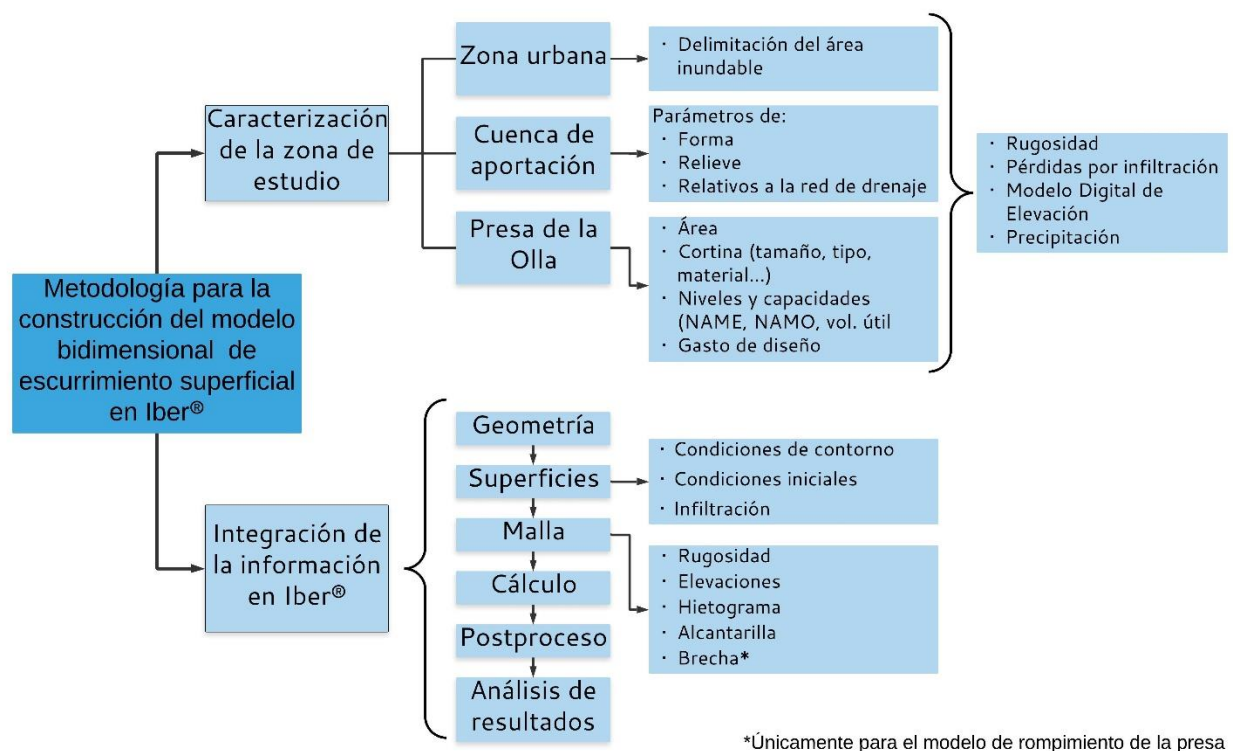


Figura 12 Metodología empleada para el desarrollo del proyecto (elaboración propia).



## 4.1 Caracterización de la zona de estudio

El área de estudio del proyecto está formada por:

- La cuenca de aportación a la presa de la Olla, que está definida, delimitada y caracterizada en el apartado 4.1.2.
- La presa de la Olla, cuya información se expone en el apartado siguiente (4.1.1).
- La zona urbana del municipio de Guanajuato con límites considerando los posibles alcances de inundaciones provocadas por la presa de la Olla.

### 4.1.1 Presa de la Olla

La Comisión Nacional del Agua cuenta con un inventario de presas (CONAGUA, 2012) disponible en línea para cualquier usuario, este catálogo fue la principal fuente de información de las características de la presa, sin embargo, debido a la antigüedad de la presa (se inició su construcción en 1741) hay información faltante. Los datos que se obtuvieron del inventario fueron los que se muestran desde la Tabla 2 hasta la Tabla 10.

La Tabla 2 presenta las generalidades de la presa, por ejemplo, que el año de inicio de la construcción de la presa es 1741 y se tardaron aproximadamente 8 años en terminarla pues quedó concluida en 1749. Gran parte de los gastos de la construcción fueron cubiertos por Sardaneta y Legaspi, dueño de la mina San Juan de Rayas.

*Tabla 2 Generalidades de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).*

<b>Año de construcción</b>	1741
<b>Diseñador</b>	Hacendados
<b>Constructor</b>	Hacendado Sardaneta y Legaspi (Mina San Juan de Rayas)
<b>Organismo Responsable</b>	Gobierno del Municipio
<b>Vía de Acceso</b>	Carretera

La Tabla 3 señala la ubicación de la presa de la Olla. Se encuentra en la región hidrológica Lerma Santiago que comprende una extensión territorial de 191,500 kilómetros cuadrados. La presa de la Olla está localizada en el municipio de Guanajuato.

Tabla 3 Ubicación de la Presa de la Olla (CONAGUA, 2012).

<b>Estado</b>	Guanajuato
<b>Municipio</b>	Guanajuato
<b>Región CNA</b>	Lerma Santiago Pacífico
<b>Región Hidrológica</b>	Lerma - Santiago
<b>Latitud</b>	21° 0' 22"
<b>Latitud decimal</b>	21.0022833333°
<b>Longitud decimal</b>	- 101.2410555556°
<b>Carta INEGI 1:50,000</b>	F14C43
<b>Zona Sísmica</b>	Baja Sismicidad

Los propósitos de la construcción de presas son variados, pueden ser para almacenar el agua y ser utilizada para riego o para abastecimiento de agua a la población, para producir energía hidroeléctrica o para evitar inundaciones en alguna población aguas abajo. La presa de la Olla se construyó con el propósito de abastecer de agua a la población de Guanajuato, sin embargo, actualmente únicamente se utiliza como obra de almacenamiento con fines recreativos, es una zona turística de la ciudad. Estos datos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Propósito de la obra y uso del agua (CONAGUA, 2012).

<b>Propósitos de la obra</b>	Almacenamiento
<b>Uso de agua</b>	Recreativo

La Tabla 5 proporciona información sobre la cuenca y escurrimiento. Como se mencionó en los antecedentes el Río Guanajuato atraviesa la ciudad, éste es un afluente del río Lerma que es uno de los ríos más largos de México. La cuenca de aportación de la que se hablará posteriormente tiene un área de 3.84km<sup>2</sup>.

Tabla 5 Cuenca y escurrimiento (CONAGUA, 2012).

<b>Región Hidrológica</b>	Lerma - Santiago
<b>Cuenca</b>	Río Lerma 5
<b>Área</b>	3.84 km <sup>2</sup>
<b>Corriente de</b>	Río Guanajuato
<b>Afluente de</b>	Río Lerma

La cortina de la presa de la Olla tiene cimentación de roca, es una cortina rígida de contrafuertes, su material es calicanto. Tiene una altura de 15m y longitud de 86m. Estos datos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Información sobre la cortina de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).

<b>Tamaño</b>	Grande > 15 m
<b>Comportamiento</b>	Rígida
<b>Tipo</b>	De Contrafuertes
<b>Material</b>	Calicanto
<b>Tipo de cimentación</b>	Roca
<b>Altura máxima</b>	15 m
<b>Longitud</b>	86 m
<b>Ancho</b>	5 m
<b>Altura sobre el cauce</b>	10 m

El vertedor es de cresta recta con una longitud de 7.50 metros, tiene una estructura disipadora rápida escalonada como se muestra en la Tabla 7 y en la Figura 13.

Tabla 7 Vertedor de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).

<b>Tipo</b>	<b>Cresta recta</b>
<b>Operación</b>	Libre
<b>Longitud de la cresta</b>	7.50 m
<b>Estructura disipadora</b>	Rápida escalonada



Figura 13 Vertedor de la presa de la Olla (fuente propia, junio 2018).

La Tabla 8 muestra el volumen al NAMO (Nivel de Aguas Máximo Ordinario), que es el nivel máximo en el que la presa trabaja con normalidad y el NAME (Nivel de Aguas Máximo Extraordinario) que es el máximo nivel que puede soportar la cortina en caso de alguna avenida extraordinaria.

Tabla 8 Niveles y capacidades del vaso de almacenamiento de la presa de la Olla (CONAGUA, 2012).

<b>Volumen al NAME</b>	0.075 hm <sup>3</sup>
<b>Volumen al NAMO</b>	0.070 hm <sup>3</sup>
<b>Volumen útil</b>	0.070 hm <sup>3</sup>
<b>Superalmacenamiento</b>	0.005 hm <sup>3</sup>

El periodo de retorno se establece según el tamaño de la obra, su cercanía a las poblaciones y los posibles daños que podría causar en caso de que fallara. El periodo de retorno utilizado para la presa de la Olla es de 100 años y el gasto máximo de diseño de 190 m<sup>3</sup>/s como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Gastos de diseño (CONAGUA, 2012).

<b>Gasto máximo de diseño</b>	190 m <sup>3</sup> /s
<b>Periodo de retorno</b>	100 años

La obra de toma es el conjunto de elementos que permiten la extracción controlada del agua para ser utilizada para los fines que se construyó, tales como abastecimiento de agua a la población, o riego. La información de la obra de toma y otros desfuegos se encuentra en la Tabla 10.

Tabla 10 Obra de toma y otros desfuegos (CONAGUA, 2012).

<b>Obra de toma</b>	Tipo torre – galería
<b>Otros desfuegos</b>	Tipo: compuerta deslizante Propósito: desagüe de fondo

#### 4.1.2 Cuenca de aportación

La delimitación de la cuenca de aportación es el área que comprende todos los afluentes que drenan en la presa. Para su delimitación se utilizaron las curvas de nivel y un sistema de información geográfica (SIG). Las curvas de nivel permiten trazar el parteaguas tomando en cuenta los puntos más altos que indican los límites entre cuencas.

Las características morfológicas se pueden dividir en tres parámetros: parámetros de forma, parámetros de relieve, y parámetros relativos a la red de drenaje (Gámez Morales, 2010).

##### Parámetros de forma

Los parámetros de forma determinan el comportamiento hidrológico de la cuenca y son el área, perímetro y la forma de la cuenca.

##### *a. Área y perímetro de la cuenca*

Conocer el tamaño de la cuenca de aportación es importante debido al escurrimiento; entre más grande sea la cuenca de aportación mayor será el volumen de escurrimiento. Las cuencas pueden clasificarse por su extensión como pequeñas, medianas o grandes.

El perímetro de la cuenca puede definirse utilizando un curvímetro o mediante un sistema de información geográfica o un programa de diseño por computadora.

El área de una cuenca hidrográfica se puede medir con distintos métodos:

- Planímetro, que es un instrumento de medición de superficies irregulares.
- Método de cuadrículado, que consiste en utilizar un papel cuadrículado con áreas definidas, contar los cuadros que abarca la cuenca y hacer una conversión de unidades.
- Método geométrico de triangulación, en el que se trazan triángulos en la cuenca y se calculan sus áreas por la fórmula geométrica.
- Utilización de un sistema de información geográfica o un programa de diseño por computadora
- Método de Simpson, consiste en trazar una recta horizontal que pase por el centro de la cuenca, trazar una vertical a esta recta en el extremo izquierdo, dividir la línea horizontal en intervalos y dibujar sus trazos verticales. A partir de esto se utiliza la fórmula 4. Se realiza el mismo proceso con la mitad restante de la cuenca. Se deben hacer las transformaciones correspondientes.

$$\frac{1}{2} \text{Área} = \frac{X}{3} (Y_0 + 4Y_1 + 2Y_2 + 4Y_3 + 2Y_4 + \dots + 4Y_{n+1} + 2Y_N) \quad (4)$$

Donde:

$X$  = Valor del intervalo

$Y$  = Valores verticales de cada franja

La cuenca de aportación del proyecto entra en la clasificación de cuenca pequeña, tiene una superficie de 3.84km<sup>2</sup> (la misma extensión señalada por los datos de la CONAGUA en el inventario de presas) y el perímetro, que fue calculado con un SIG, es de 11.9 km. La cuenca de aportación y su red de drenaje se muestran en la Figura 14 donde también se señala la ubicación de la presa de la Olla.



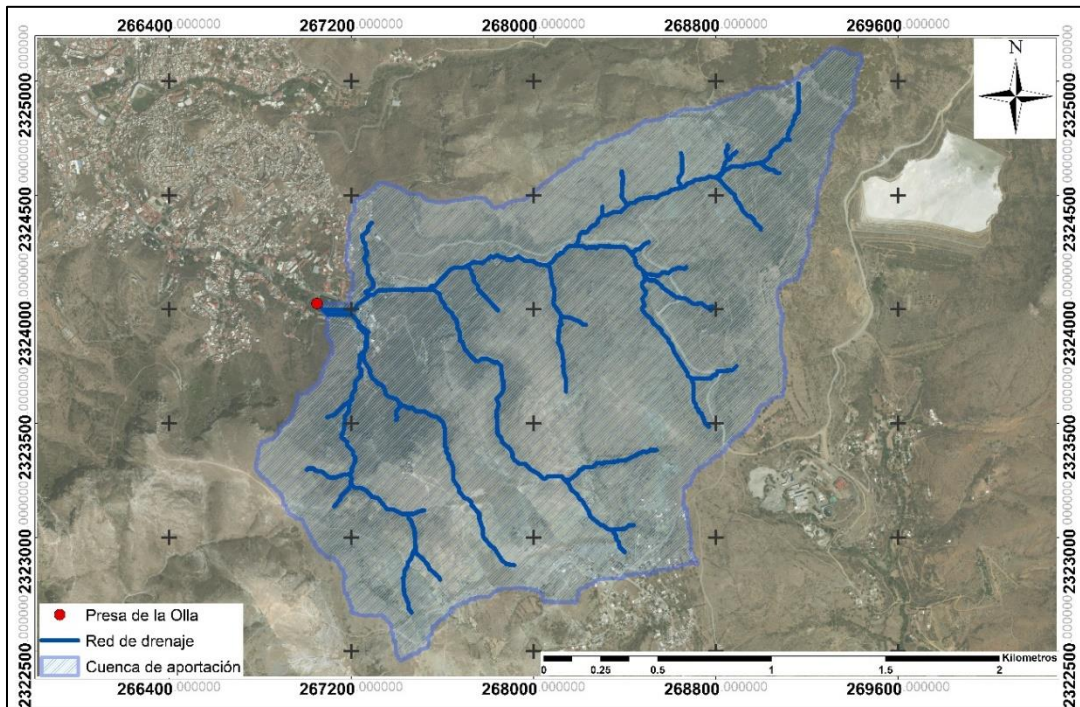


Figura 14 Cuenca de aportación (elaboración propia).

*b. Forma de la cuenca*

Para definir la forma de la cuenca se utiliza el factor de compacidad o índice de Gravelius, el cual compara la forma del perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de la misma área. Para calcularlo se utiliza la expresión 5.

$$k_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \tag{5}$$

$$k_c = 0.282 \frac{11.9km}{\sqrt{3.84km^2}} = 1.7125$$

Donde:

$P =$  Perímetro de la cuenca

$A =$  Área de la cuenca

Entre más cercano a la unidad sea el índice de Gravelius más redonda será la forma de la cuenca, esto es relevante para el escurrimiento de la cuenca dado que entre más redonda sea la forma de la cuenca más rápida será la concentración del escurrimiento.

El valor obtenido en la cuenca de estudio es de 1.7125, como se puede ver al realizar el cálculo anterior; por lo que la forma de la cuenca es ovalada y su escurrimiento será lento (aunque la velocidad del escurrimiento también se verá afectada por otros factores como la pendiente del terreno).

*Parámetros de relieve*

Los parámetros de relieve son importantes porque tienen mayor influencia en la respuesta hidrológica de la cuenca que la forma de la cuenca. Estos parámetros son la elevación media y la pendiente media de la cuenca.

*a. Elevación media de la cuenca (Curva hipsométrica)*

La curva hipsométrica en la Figura 15 muestra el área de la cuenca que se ubica en cada cota. A través de esta curva y por el método de interpolación es que se obtiene la elevación media de la cuenca que corresponde al 50% del área acumulada.

*Elevación media de la cuenca = 2327.77*

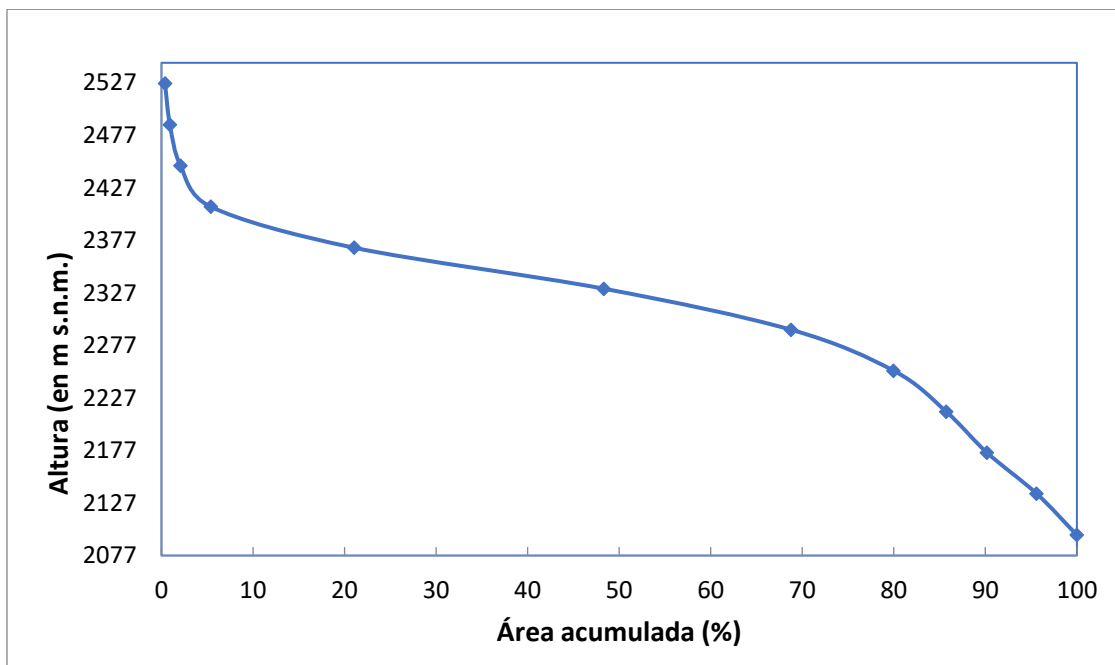


Figura 15 Curva hipsométrica de la cuenca de aportación (elaboración propia).

La forma de la cuenca refleja que está en su fase de madurez. Esta etapa de los ríos se caracteriza por tener un cauce estable y amplio.



*b. Pendiente media de la cuenca*

Se calculó con el método de *Alvord*, utilizando el sistema de información geográfica se obtuvieron las pendientes entre las curvas de nivel y se calculó el promedio pesado. En la Tabla 11 se muestran los cálculos realizados con los datos obtenidos del sistema de información geográfica.

Siendo que un terreno plano tendría una pendiente de 0% y un terreno muy accidentado una pendiente media mayor a 50%, se definió que la cuenca de estudio se encuentra ubicada en un terreno medianamente accidentado.

La pendiente de la cuenca está directamente relacionada con la velocidad del escurrimiento superficial y la infiltración de la cuenca de aportación.

*Tabla 11 Cálculo de la pendiente media de la cuenca (elaboración propia).*

	RANGO PENDIENTE %			Número de ocurrencias	Pendiente promedio x Número de ocurrencias
	Inferior	Superior	Promedio		
<b>1</b>	0	10	5	52941	264705
<b>2</b>	10	20	15	57871	868065
<b>3</b>	20	30	25	30101	752525
<b>4</b>	30	40	35	9702	339570
<b>5</b>	40	50	45	2117	95265
<b>6</b>	50	60	55	589	32395
<b>7</b>	60	70	65	186	12090
<b>8</b>	70	80	75	68	5100
<b>9</b>	80	90	85	15	1275
<b>10</b>	90	100	95	5	475
			<b>Totales</b>	<b>153595</b>	<b>2371465</b>
<b>Pendiente media de la cuenca</b>	$= \frac{\sum(\text{Pendiente promedio} \times \text{Número de ocurrencias})}{\sum \text{Número de ocurrencias}} =$				<b>15.44 %</b>

*Pendiente media de la cuenca = 15.44%*

### *Parámetros relativos a la red de drenaje*

Los parámetros relativos a la red de drenaje son el orden de la cuenca, densidad de corrientes, densidad de drenaje, cause principal y el tiempo de concentración.

#### *a. Orden de la cuenca*

Se utilizó el método de *Strahler*, el cual consiste en asignar el primer orden a las corrientes que no tienen tributarios, al juntarse dos corrientes de orden 1 habrá una corriente de orden 2, y así en lo sucesivo. En la Figura 16 se muestra el orden de cada corriente. La cuenca de estudio es de orden 4.

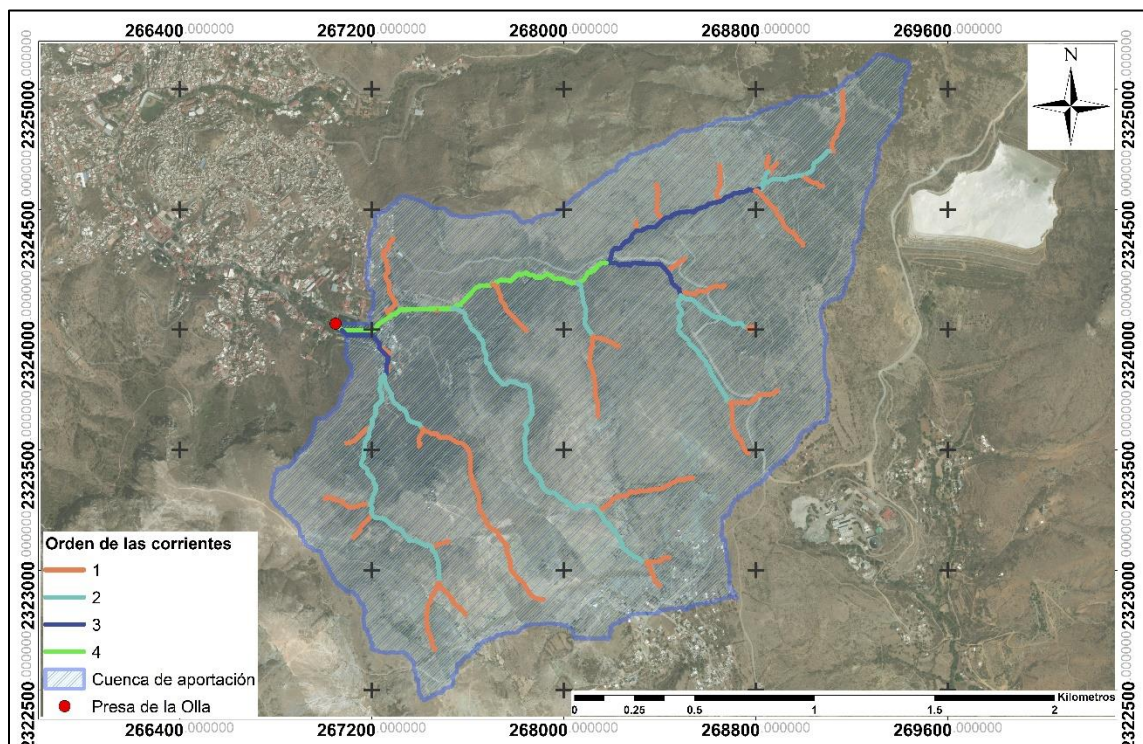


Figura 16 Orden de corrientes de la cuenca de aportación (elaboración propia).

#### *b. Densidad de corrientes*

Indica la eficacia de drenaje de la cuenca. Se calcula dividiendo el número de corrientes entre el área total de la cuenca como se muestra en la expresión 6.

Número de corrientes = 65

Área total de la cuenca = 3.84 km<sup>2</sup>

$$Dc = \frac{Nc}{A} \quad (6)$$

Donde:

$Dc$  = Densidad de corrientes

$Nc$  = Número de corrientes

$A$  = Área de la cuenca

$$Dc = \frac{65}{3.84 km^2} = 16.93 c/km^2$$

### *c. Densidad de drenaje*

La densidad de drenaje está definida por factores climáticos y de vegetación de la zona y representa la facilidad que tiene una cuenca para drenar el agua. Se obtiene de dividir la sumatoria de la longitud de todas las corrientes entre el área total de la cuenca como se muestra en la expresión 7.

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad (7)$$

Donde:

$Dd$  = Densidad de drenaje

$L$  = Longitud de las corrientes

$A$  = Área de la cuenca

$$Dd = \frac{13.31 km}{3.84 km^2} = 3.47 km/km^2$$

### *d. Cauce principal*

Es el cauce que pasa por la salida de la cuenca y tiene la mayor longitud.

La pendiente del cauce principal es la relación entre el desnivel entre sus extremos y la longitud del cauce. Estos datos se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12 Datos del cauce principal (elaboración propia).

<b>Longitud</b>	2793.8277 m
<b>Pendiente</b>	12.7717 %
<b>Cota extremo superior</b>	2434.48 m s.n.m.
<b>Cota extremo inferior</b>	2077.66 m s.n.m.

*e. Tiempo de concentración*

El tiempo de concentración de una cuenca se define como el tiempo que tardará el agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida.

Este tiempo de concentración puede calcularse mediante varias fórmulas empíricas, sin embargo, si las características de la cuenca de estudio no son similares a las de las cuencas que fueron utilizadas para deducir dichas fórmulas los resultados podrían ser erróneos; por lo que se recomienda usar varias para comparar los resultados y hacer una correcta estimación de este parámetro.

Las fórmulas utilizadas son la de Rowe (ecuación 8), Kirpich (ecuación 9), Chow (ecuación 10) y del Servicio de Conservación de Suelo en Estados Unidos (SCS) (ecuación 11).

**Fórmula de Rowe:**

$$T_c = \left( \frac{0.86 L^3}{\Delta H} \right)^{0.385} = \left( \frac{0.86 L^2}{S} \right)^{0.385} \quad (8)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración en horas

$L$  = Longitud del cauce principal en kilómetros

$S$  = Pendiente del cauce principal, expresada en millares, igual a la relación entre el desnivel en metros y la longitud en kilómetros.

$$T_c = \left( \frac{0.86 (2.7938277)^3}{(2434.48 - 2077.66)} \right)^{0.385} = \left( \frac{0.86 (2.7938277)^2}{127.717253} \right)^{0.385} = 0.3217 \text{ horas}$$

$$= 19.3019 \text{ minutos}$$

**Fórmula de Kirpich:**

$$T_c = 0.0003245 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (9)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración en horas

$L$  = Longitud del cauce principal en metros

$S$  = Pendiente del cauce principal

$$T_c = 0.0003245 \left( \frac{2793.8277}{\sqrt{12.7717}} \right)^{0.77} = 0.0548 \text{ horas} = 3.2888 \text{ minutos}$$

**Fórmula de Chow:**

(Cuencas pequeñas  $T_c \approx Tr$ ) (10)

(Cuencas grandes)  $T_c \approx Tr/0.6$ ; ó  $T_c = D/2 + Tr$

$$T_c \approx Tr = 0.00505 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64} \text{ (cuencas pequeñas)}$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración en horas

$T_r$  = Tiempo de retraso en horas

$L$  = Longitud del cauce principal en metros

$S$  = Pendiente del cauce principal en porcentaje

$$T_c \approx Tr = 0.00505 \left( \frac{2793.8277}{\sqrt{12.7717}} \right)^{0.64} = 0.3588 \text{ horas} = 21.5283 \text{ minutos}$$

**Fórmula del Servicio de Conservación del Suelo en Estados Unidos (SCS):**

$$T_c = \frac{L^{1.15}}{3085 \Delta H^{0.38}} \quad (11)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración

$\Delta H$  = Desnivel máximo en el cauce principal, en metros

$L$  = Longitud del cauce principal en metros

$$T_c = \frac{(2793.8277)^{1.15}}{3085 (356.82)^{0.38}} = 0.3191 \text{ horas} = 19.1467 \text{ minutos}$$

En la Tabla 13 se presentan los resultados para el tiempo de concentración, obtenidos con las diferentes fórmulas. Al analizar estos resultados, se decidió eliminar el obtenido con la fórmula de Kirpich por encontrarlo muy alejado de los otros tres valores. El valor que se ha tomado como tiempo de concentración para la cuenca de estudio es el promedio de los tres valores restantes, siendo éste 19.9923 minutos  $\approx$  20 minutos

Tabla 13 Resultados de las fórmulas para el tiempo de concentración (elaboración propia).

Fórmula	Resultados obtenidos	
	Horas	Minutos
Rowe	0.3217	19.3019
Kirpich	0.0548	3.2888
Chow	0.3588	21.5283
SCS	0.3191	19.1467

#### 4.1.3 Análisis hidrológico

##### *Fórmula de Manning*

Robert Manning fue un ingeniero irlandés que creó una ecuación para el cálculo de la velocidad del agua en tuberías y canales abiertos en 1889.

Esta ecuación se puede ver en la expresión 12.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Donde:

- $V =$  Velocidad
- $n =$  Coeficiente de Manning
- $R_h =$  Radio hidráulico
- $S =$  Pendiente

*Coefficiente de Manning*

El coeficiente “n” o coeficiente de Manning depende de varios factores y es importante seleccionar un valor adecuado para una correcta simulación.

Los factores más importantes de los que depende el coeficiente de Manning son: a) la rugosidad superficial que se representa por el tamaño y forma de los granos del material, éste suele ser el único factor que se menciona al referirse al coeficiente de Manning, sin embargo, los otros factores también son importantes, tales como, b) la altura, densidad y distribución de la vegetación, c) irregularidad del canal, sobre todo los cambios que no son graduales o uniformes, d) alineamiento del canal, curvas suaves tendrán un coeficiente bajo mientras que las curvas bruscas tendrán un coeficiente mayor, en este punto los meandros tienen una gran importancia para la selección del coeficiente (Chow, 1994). Se utilizaron la Tabla 14 y la Tabla 15 con valores de referencia para la elección del valor “n”, la Tabla 16 muestra las áreas que se definieron y los valores de coeficiente “n” que se asignó a cada área.

Tabla 14 Valores del coeficiente de rugosidad n (Chow, 1994).

<b>Tipo de canal y descripción</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Normal</b>	<b>Máximo</b>
<b>D-2 Planicies de inundación</b>			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160

Tabla 14 (continuación) Valores del coeficiente de rugosidad  $n$  (Chow, 1994).

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160

Tabla 15 Coeficiente  $n$  de Manning para escorrentía superficial (McCuen, Johnson, & Ragan, 1996).

Superficie	$n$
Asfalto liso	0.011
Hormigón liso	0.012
Revestimiento de hormigón basto	0.013
Madera pulida	0.014
Ladrillo con mortero de cemento	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
Fundición de hierro	0.015
Tuberías de metal corrugado	0.024
Superficie de escombrera	0.024
Terreno improductivo (libre de residuos)	0.05
Terreno cultivado	
Cubierta de residuos < 20%	0.06
Cubierta de residuos > 20%	0.17
Pasto natural	0.13
Hierba	
Corta, pradera	0.15
Densa	0.24
Hierba <i>Bermuda</i>	0.41
Bosque	
Con cubierta ligera de arbustos	0.40
Con cubierta densa de arbustos	0.80



Se consideró la información de localidades amanzanadas de INEGI utilizada anteriormente, además de las imágenes satelitales de Google Earth para definir más específicamente el tipo de superficie de cada fragmento del área de estudio. En la Figura 17 puede verse el mapa obtenido de la separación de áreas y cada coeficiente.

Tabla 16 Valores del coeficiente n para el área de estudio (elaboración propia).

Tipo de área	n
Zona urbana	0.012
Áreas verdes	0.120
Camino terracería	0.050
Camino pavimentado	0.012
Camino empedrado	0.024
Callejón	0.029
Bosque de encino	0.100
Pastizal inducido	0.030
Pastizal natural	0.035

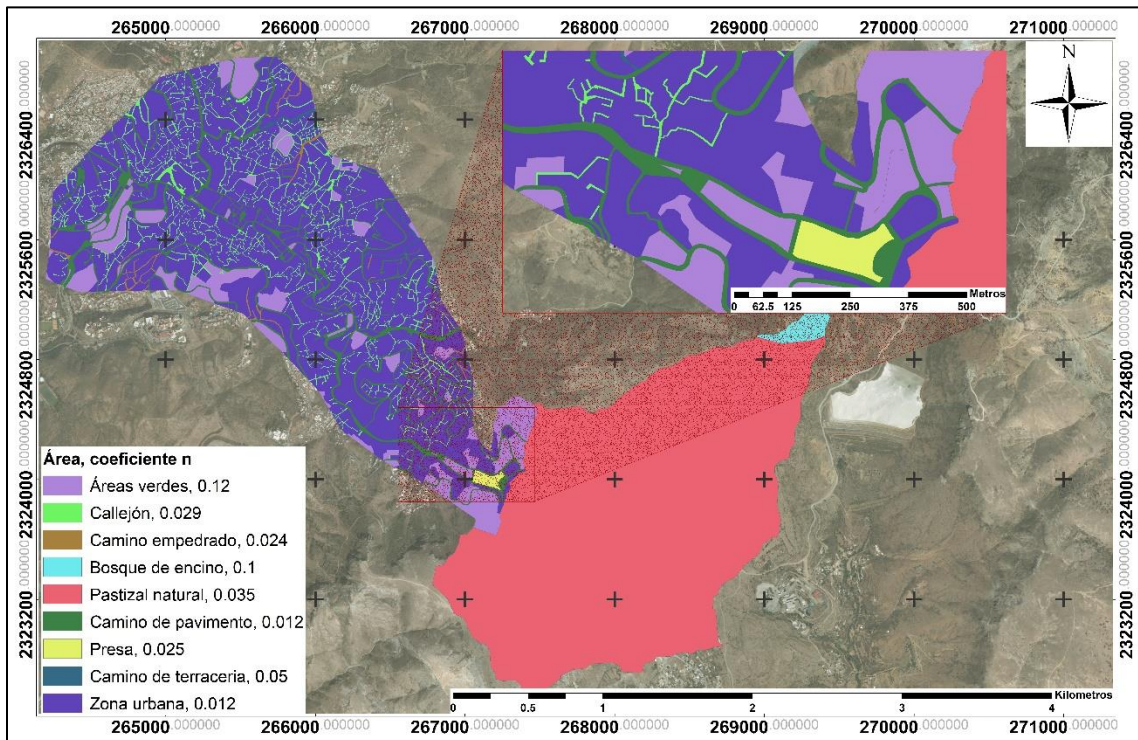


Figura 17 Áreas y coeficientes de Manning para la zona de estudio (elaboración propia).

### Pérdidas por infiltración

Se conoce como infiltración al movimiento del agua hacia adentro del suelo. La diferencia entre la cantidad de agua que llueve y la que escurre se conoce como pérdidas, estas pérdidas están constituidas por la intercepción de las plantas, los techos de construcciones, la retención en depresiones, la evaporación y la infiltración, sin embargo, estos factores son difíciles de separar, por lo que, como la infiltración es la mayor porción, en la práctica se ha optado por calcularlas todas con este nombre (Aparicio Mijares, 1992).

Existen varios criterios empíricos para la estimación de estas pérdidas. El que se ha utilizado para el desarrollo de este proyecto es el método del número de curva o método de los números de escurrimiento del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos (SCS). Este método asigna números considerando las características del suelo, entre mayor sea el número, mayor será la impermeabilidad del suelo.

Se utilizaron los mapas de INEGI “Edafología” y “Uso de suelo y vegetación” con una escala 1:250,000, cartas F14-7 y F14-10. Se trabajó con estos mapas en un sistema de información geográfica utilizando también la Tabla 17 y la Tabla 18.

Tabla 17 Tipos de suelo (Aparicio Mijares, 1992).

Tipo de suelo	Textura del suelo
<b>A</b>	Arenas con poco limo y arcilla; Suelos muy permeables
<b>B</b>	Arenas finas y limos
<b>C</b>	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla
<b>D</b>	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables

Tabla 18 Números N para cada tipo de suelo (Aparicio Mijares, 1992).

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
<b>Sin cultivo</b> <b>Cultivos en surco</b>	Surcos rectos		77	86	91	94
	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
<b>Cereales</b>	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
	Contorneo	>1	63	74	82	85
	Contorneo	<1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
	Terrazas	>1	59	70	78	81
<b>Leguminosas o praderas con rotación</b>	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Contorneo	>1	64	75	83	85
	Contorneo	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
<b>Pastizales</b>		>1	68	79	86	89
		<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
<b>Pradera permanente</b>		<1	30	58	71	78
<b>Bosques naturales</b>						
Muy ralo			56	75	86	91
Ralo			46	68	78	84
Normal			36	60	70	77
Espeso			26	52	62	69
Muy espeso			15	44	54	61
<b>Caminos</b>						
De terracería			72	82	87	89
Con superficie dura			74	84	90	92

De los mapas y las tablas se obtuvo que la cuenca de estudio se encuentra toda en la misma unidad de suelo, por lo que le corresponde el tipo de suelo B y se encontraron tres áreas en el mapa de “uso de suelo y vegetación”: bosque de encino, pastizal natural y zona urbana, por lo que los valores de número de infiltración son 60, 67 y 84 respectivamente como se observa en el mapa de la Figura 18.

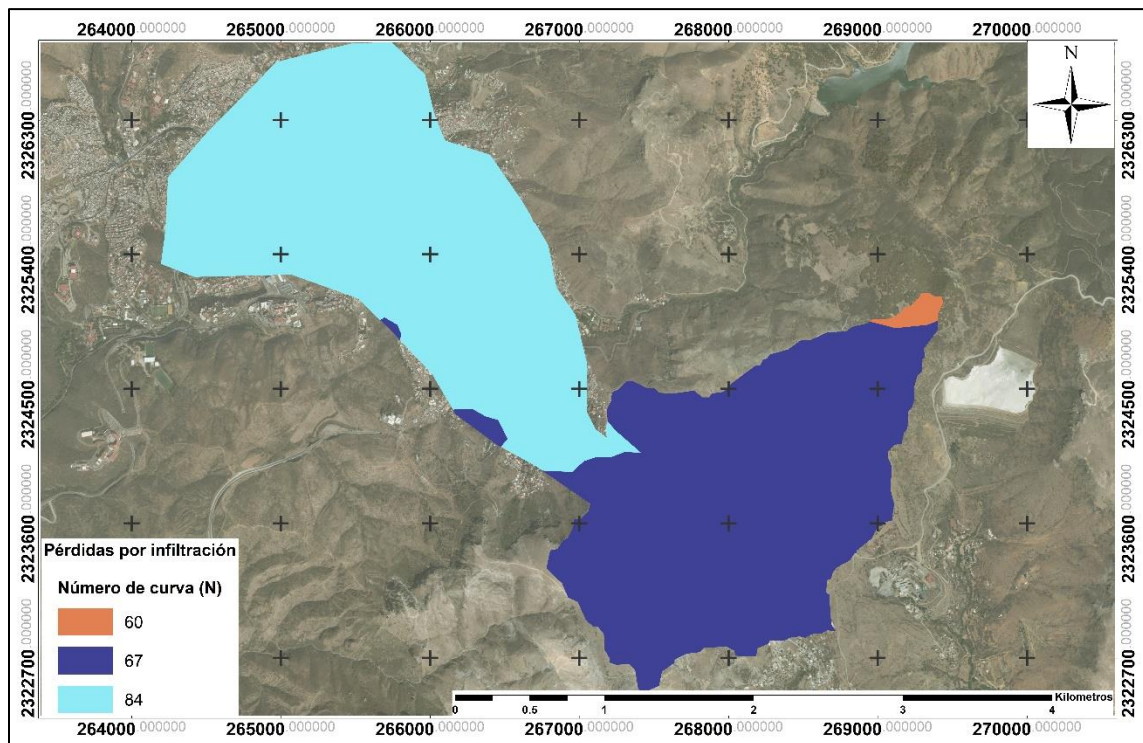


Figura 18 Números de curva asignados para la cuenca de estudio (elaboración propia).

### Modelo Digital de Elevación

Los modelos digitales de elevación caracterizan las alturas respecto al nivel del mar de determinada zona. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron tres tipos de información que se detallan a continuación.

#### *a. Guanajuato*

Se utilizaron los datos de modelos digitales de elevación con tecnología LiDAR de tipo terreno con una resolución horizontal de 5 metros de la página del Instituto Nacional de

Estadística y Geografía (INEGI), “El LiDAR es un sistema activo de rayos láser que emite un haz de luz sobre la superficie terrestre (pulsos) para luego recoger sus reflejos, también denominados retornos o rebotes.” (INEGI).

Se utilizaron las cartas F14C43D4, F14C43E3, F14C53A2 y F14C53B1 que abarcan toda la zona de estudio como se muestra en la Figura 19. Las cartas se descargaron y se unieron en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

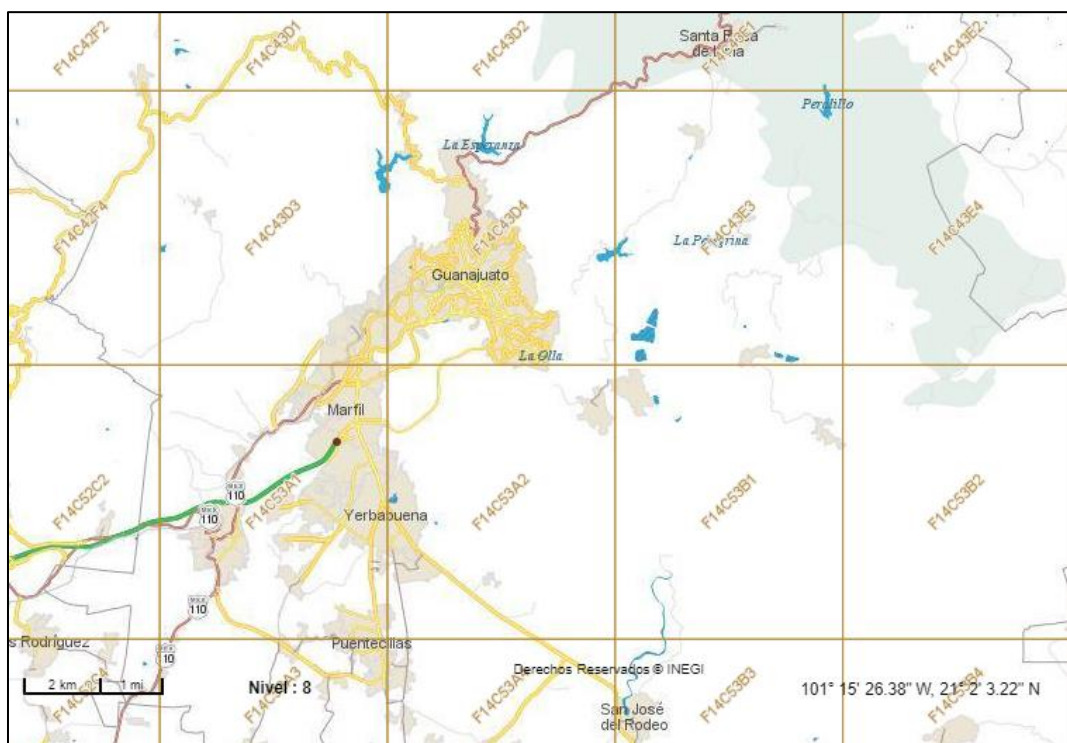


Figura 19 Cartas topográficas de la zona de estudio (INEGI).

### *b. Zona Urbana*

Para el área de inundación que es la zona urbana de la ciudad se utilizó la capa de datos LiDAR ya mencionada además de información vectorial de localidades ameznadas que se encuentra también disponible en la página del INEGI y que se muestra en la Figura 20.



Con esta información se trabajó en un sistema de información geográfica (SIG) para dar elevaciones a las manzanas y generar un nuevo modelo digital de elevaciones que incluyera las elevaciones de las manzanas.

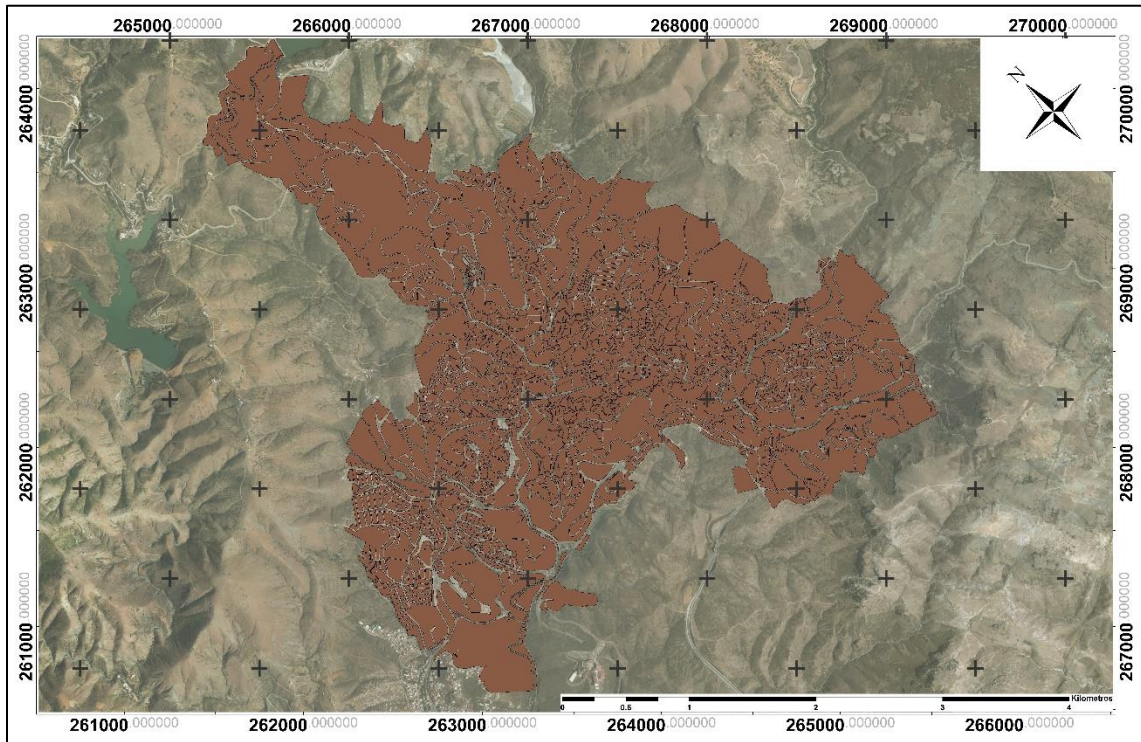


Figura 20 Localidades ameznadas de Guanajuato (elaboración propia).

### c. Batimetrías proporcionadas por la CEAG

Una batimetría es la técnica que se utiliza para conocer las profundidades de los cuerpos de agua. Para el presente proyecto se hizo una solicitud de información pública a la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) y se obtuvo una respuesta afirmativa y muy completa de un estudio topobatimétrico que se realizó en el año 2001.

La información proporcionada incluye la batimetría de la presa de la Olla y de la presa de San Renovato con un nivel de azolve alto (para la presa de la Olla entre 4 y 9 metros de espesor, y para la presa de San Renovato entre 7 y 10 metros). Dicho estudio se realizó en 2001 y posteriormente, en el año 2010 se efectuó un desazolve de la presa.

Los datos de niveles de agua de ambas presas obtenidos del estudio mencionado se muestran en la Tabla 19 y Tabla 20.

*Tabla 19 Niveles de agua de la presa de la Olla en 2001 (CEAG, 2001).*

<b>Conceptos</b>	<b>Elevación m s.n.m.</b>	<b>Capacidad (año 2001) m<sup>3</sup></b>
Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME)	2083.89	64,623.205
Nivel de Aguas Normales (NAN)	2083.61	12,820.056
Nivel de la Cresta Vertedora (NAMO)	2083.13	9,925.625
Nivel de Aguas Para la Capacidad Muerta (NAMINO)	2072.39	AZOLVADO
Desplante de Rejilla (Capacidad de Azolves)	2071.93	AZOLVADO
Nivel de Aguas Durante el Estudio de Batimetría.	2082.06	38,028.376

*Tabla 20 Niveles de agua de la presa de San Renovato en 2001 (CEAG, 2001).*

<b>Conceptos</b>	<b>Elevación m s.n.m</b>	<b>Capacidad (año 2001) m<sup>3</sup></b>
Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME)	2098.616	16,176.652
Nivel de Aguas Normales (NAN)	2098.241	12,820.056
Nivel de la Cresta Vertedora (NAMO)	2097.873	9,925.625
Nivel de Aguas Para la Capacidad Muerta (NAMINO)	2085.386	AZOLVADO
Desplante de Rejilla (Capacidad de Azolves)		AZOLVADO
Nivel de Aguas Durante el Estudio de Batimetría.	2095.672	1,477.451

Con la información mencionada se elaboraron las curvas elevación-área-volumen para la presa de la Olla, con el objetivo de representar de una manera gráfica los volúmenes almacenados y el área de inundación para cada altura dentro del embalse. Las curvas elevación-área-volumen se muestran en la Figura 21.

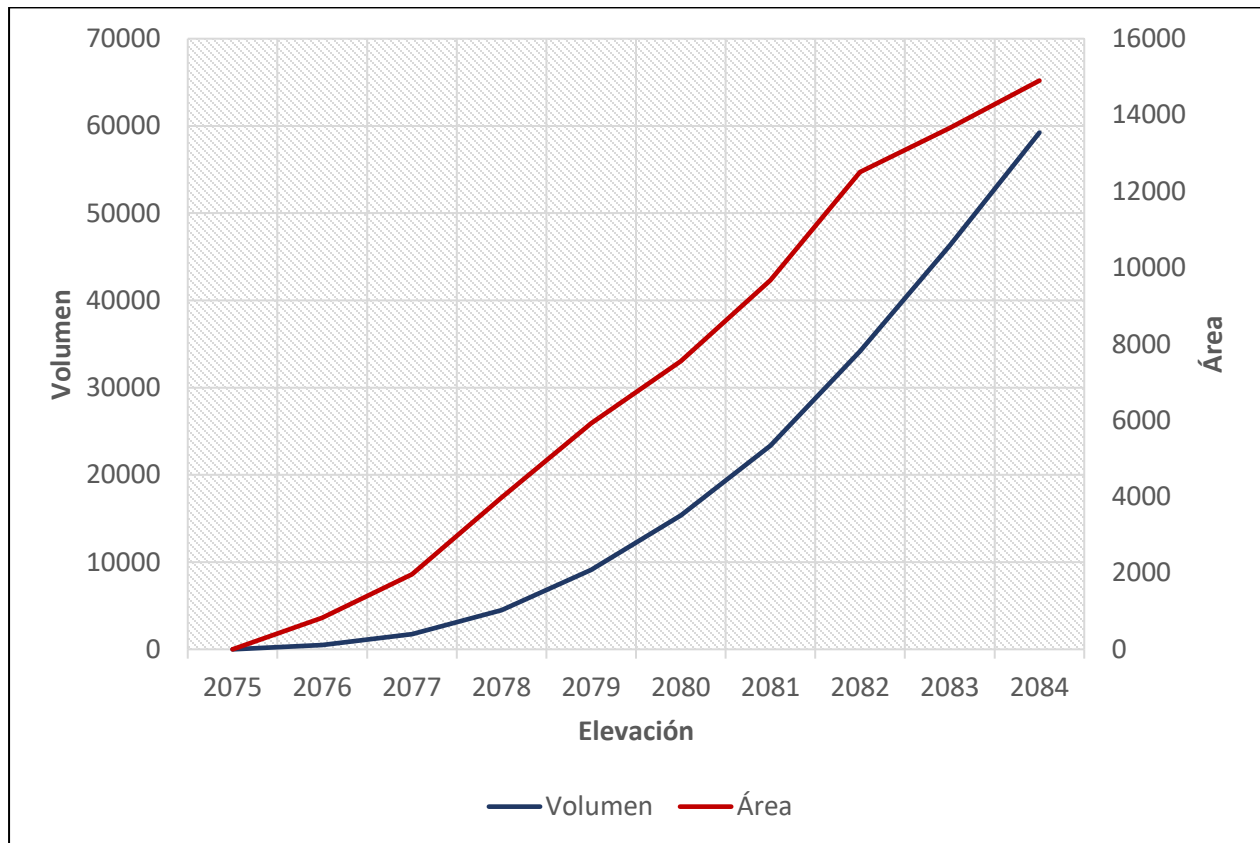


Figura 21 Curvas elevación - área - volumen para la presa de La Olla (elaboración propia).

El plano de la batimetría de la presa de la Olla proporcionado por la CEAG se muestra en la Figura 22 y la de la presa de San Renovato en la Figura 23.





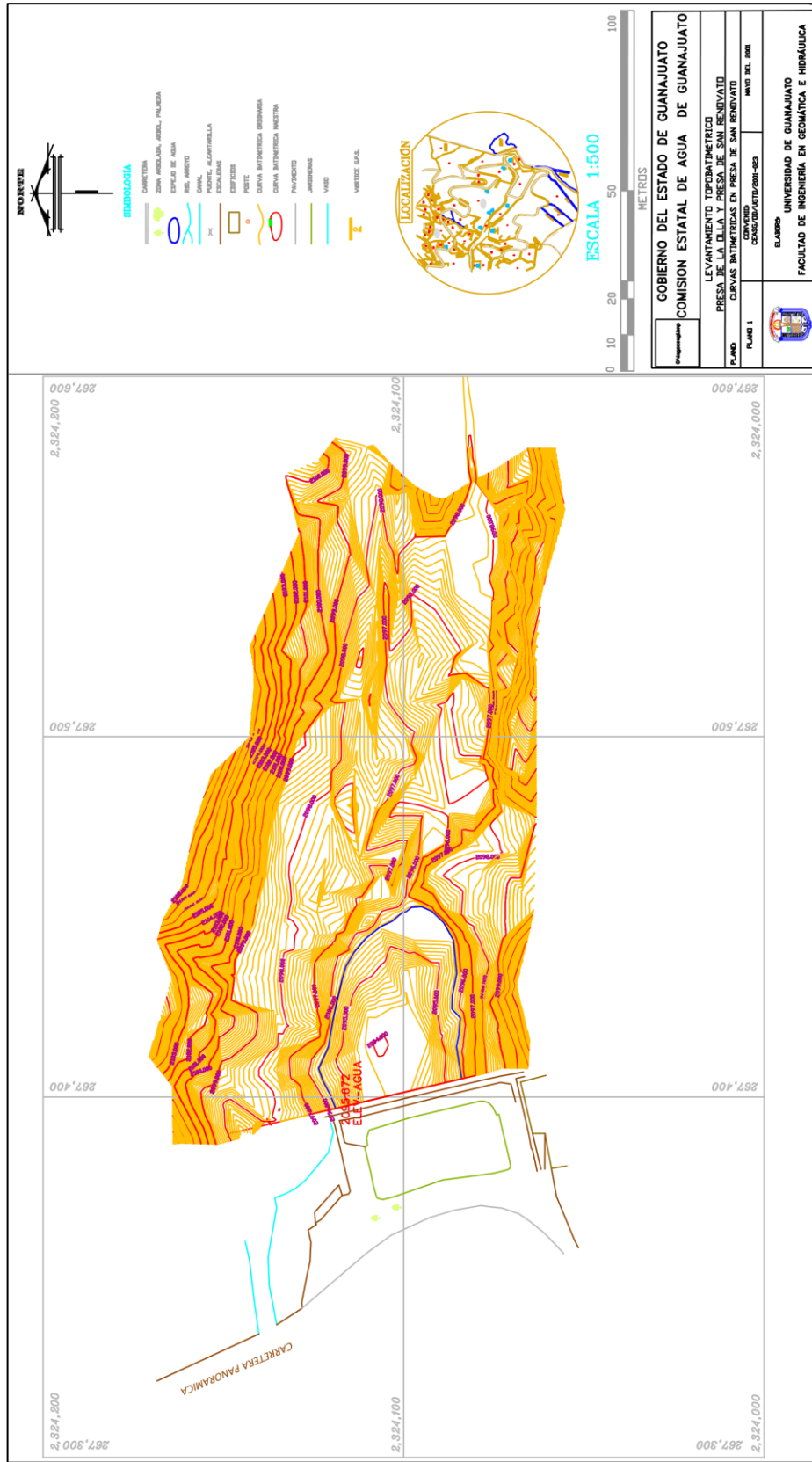


Figura 23 Plano de la batimetría de la presa de San Renovato (CEAG, 2001).

Finalmente, mediante un sistema de información geográfica, se reunieron los tres tipos de información mencionados hasta ahora (el modelo digital obtenido de INEGI, el modelo creado con los datos de las manzanas para la zona urbana de la ciudad, y las dos batimetrías proporcionadas por la CEAG) para formar un solo modelo digital de elevaciones que contara con todos los datos necesarios para posteriormente poder realizar la simulación del escenario 1.

### *Análisis de los datos de precipitación*

“La precipitación es la fuente primaria de agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua.” (Aparicio Mijares, 1992).

Para el proyecto se utilizaron dos conjuntos de información de precipitación: la información histórica del evento del 13 y 14 de junio de 2018 y una lluvia de diseño estimada. La obtención y análisis de dicha información se presenta a continuación.

#### *a. Precipitación del desbordamiento de la presa (13 y 14 de junio de 2018)*

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMAS) Y Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIMES) que son dispositivos que miden las variables atmosféricas cuya información está disponible en internet. En la ciudad de Guanajuato se encuentra ubicada una ESIME con el nombre “GUANAJUATOob”, en la latitud 21.0167 N, longitud -101.25 O, altitud 1999.

Dicha estación cuenta con información como la dirección del viento, humedad relativa, precipitación, radiación solar, temperatura del aire y presión atmosférica. La estación muestra datos obtenidos cada 10 minutos.

Los datos de la precipitación del 13 y 14 de junio se muestran en el hietograma de la Figura 24 que se generó conforme a la información de la ESIME. La precipitación total del evento fue de 117mm en 26 horas y 40 minutos; se considera que es un evento extraordinario, pues al analizar los datos del SMN para el municipio de Guanajuato entre los años 1981 y 2010 la precipitación normal acumulada en todo el mes de junio es de 122.5 mm; y la precipitación máxima diaria del mismo mes es de 72.3 mm.

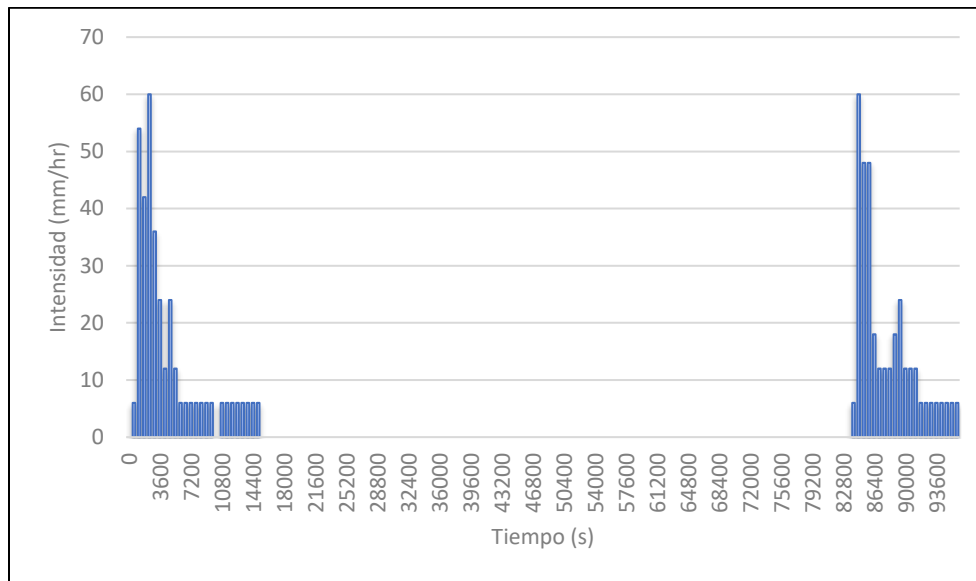


Figura 24 Hietograma del evento de junio 2018 (elaboración propia).

### b. Análisis de la lluvia de diseño

La lluvia de diseño se basa en información histórica de precipitaciones y sirve para conocer la forma de la lluvia en la zona de estudio. Consiste en analizar la información histórica disponible de las estaciones meteorológicas para crear un hietograma unitario que pueda aplicarse para diseñar un hietograma dado un periodo de retorno. El proceso realizado para el diseño de los hietogramas se detalla a continuación.

#### b.1 Polígonos de Thiessen

En la zona de estudio se encontraron tres estaciones meteorológicas cercanas, las cuales se muestran en la Tabla 21. Cada una de estas estaciones registra los datos de precipitación diarios y estos pueden consultarse en la página del Servicio Meteorológico Nacional.

Para obtener la lluvia media en la zona existen tres métodos principales (Aparicio Mijares, 1992): el método aritmético, el método de isoyetas y el método de polígonos de Thiessen que es el que se utilizó para este trabajo por su precisión y practicidad, los resultados y las áreas que se obtuvieron se observan en la Figura 25.

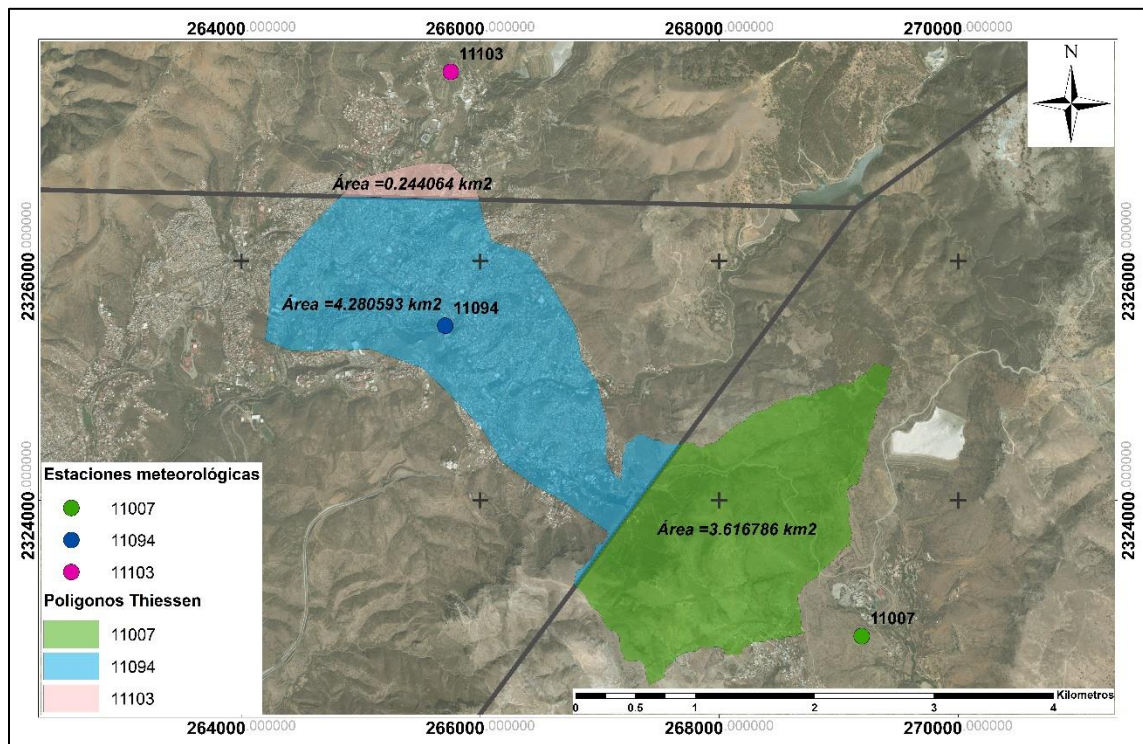


Figura 25 Polígonos de Thiessen (elaboración propia).

Tabla 21 Datos de las estaciones cercanas a la zona de estudio (elaboración propia).

Id	11103	11007	11094
Estación	VALENCIANA-GTO	CALDERONES-GTO	GUANAJUATO (DGE)-GTO
Posición	21.0341666667N -101.2541666667W	20.9916666667N -101.2202777778W	21.0147222222N -101.2541666667W
Fecha Inicial	09/01/1973	04/01/1949	01/01/1969
Fecha Final	07/01/2016	09/01/2016	01/01/1969

b.2 Estimación de datos faltantes

De cada una de las tres estaciones cercanas se obtuvieron los datos de precipitación diaria del periodo 1980 – 2015. Para completar los datos faltantes se utilizó el método inverso de la distancia al cuadrado, para el cual se utilizan las expresiones 13, 14 y 15 para estimar cada uno de los datos faltantes.

$$P_x = \sum_{i=1}^n (p_i w_i) / W_i \quad (13)$$

$$w_i = 1/d_i^2 \quad (14)$$

$$W = \sum w_i \quad (15)$$

Donde:

$P_x$  = Dato de precipitación faltante.

$p_i$  = Precipitación en la estación con datos.

$d_i$  = Distancia de la estación con datos a la estación de la que se calculan los datos faltantes.

### b.3 Análisis de frecuencias

Para cada estación se realizó un análisis buscando la función de distribución de probabilidad que más se ajustara a los datos para posteriormente, mediante un proceso de extrapolación, determinar la magnitud de un evento asociado a un periodo de retorno.

Se utilizaron los datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con los datos faltantes estimados y habiendo seleccionado las precipitaciones máximas anuales. De tal manera que se tienen 36 datos de precipitación por cada estación (uno por cada año, desde 1980 hasta 2015).

El análisis de frecuencias se realizó utilizando el programa AFA V.1.1 (IMTA, 2010) que permite agilizar el proceso y con los resultados que genera se hizo una comparación para definir la función de probabilidad que se ajusta más a los datos de cada estación meteorológica. El programa permite analizar los datos con 12 funciones de distribución diferentes, la Tabla 22 muestra una recopilación de los datos del manual del programa sobre cada una de las funciones.

Se analizaron los datos de las tres estaciones por separado, buscando el error de ajuste menor para cada uno y así elegir la función de distribución de probabilidad que se ajuste mejor a los datos. Los resultados se muestran en la Tabla 23.



Tabla 22 Funciones de distribución de AFA V.1.1 (IMTA).

<p><b>Distribución Normal</b></p>	<p>Esta es la distribución de mayor importancia pues se pueden encontrar muchas variables aleatorias que aparecen en relación con experimentos u observaciones prácticas que están distribuidas normalmente y otras que están distribuidas normalmente en forma aproximada.</p>	$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$ <p>Donde:</p> <p><math>\mu =</math> Parámetro de ubicación</p> <p><math>\sigma =</math> Parámetro de escala</p>
<p><b>Distribución Exponencial de 1 Parámetro</b></p>	<p>También se conoce como distribución Exponencial Negativa. La ventaja de la distribución exponencial radica en que es fácil estimar el parámetro a partir de la información observada. Su desventaja es que requiere que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente (Ven Te Chow et al., 1988).</p>	$F(x) = 1 - \beta e^{-\beta x}$
<p><b>Distribución Exponencial de 2 Parámetros</b></p>	<p>La distribución Doble Exponencial también se conoce como distribución de Laplace, nombrada así en honor a Pierre Simón Laplace (1799-1827), matemático y astrónomo francés. El nombre de distribución Doble Exponencial se debe a que su gráfica es simétrica y similar a dos distribuciones exponenciales (Wikipedia contributors, 2005).</p>	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}$
<p><b>Distribución Log Normal de 2 Parámetros</b></p>	<p>La distribución Log Normal corresponde a una variable aleatoria X cuyos logaritmos están distribuidos en forma normal. Se ha encontrado que esta distribución describe la distribución de la conductividad hidráulica en un medio poroso (Freeze, 1975), la distribución del tamaño de las gotas de lluvia en una tormenta y otras variables hidrológicas. La distribución Log-Normal tiene ventajas sobre la normal ya que está limitada (<math>X &gt; 0</math>) y de que la transformación logarítmica reduce la asimetría positiva que comúnmente se presenta en los datos hidrológicos pues la reducción con los logaritmos es más notable en los valores grandes que en los pequeños (Ven Te Chow et al., 1988).</p>	$F(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$ <p>Donde:</p> <p><math>\mu_y =</math> Parámetro de ubicación</p> <p><math>\sigma_y =</math> Parámetro de escala</p>
<p><b>Distribución Log Normal de 3 Parámetros</b></p>	<p>Tal como la distribución log-normal representa la distribución normal de los logaritmos de una variable x, la distribución log-normal de 3 parámetros representa la distribución normal de los logaritmos de una variable (x-x<sub>0</sub>) donde x<sub>0</sub> es un límite inferior de la función (Kite, 1988).</p>	$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{(x-x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$ <p>Donde:</p> <p><math>x_0 =</math> Parámetro de ubicación</p> <p><math>\mu_y =</math> Parámetro de escala</p> <p><math>\sigma_y =</math> Parámetro de forma</p>
<p><b>Distribución Gamma de 2 Parámetros</b></p>	<p>Describe el tiempo de ocurrencia de un número <math>\beta</math> de eventos en un proceso de Poisson, la cual es la distribución de una suma de <math>\beta</math> variables aleatorias independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente. Tiene como límite inferior cero, siendo esto una desventaja para la aplicación a variables que tienen un límite inferior menor a cero. (Ven Te Chow et al., 1988).</p>	$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-x/a}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} dx$ <p>Donde:</p> <p><math>\alpha =</math> Parámetro de escala</p> <p><math>\beta =</math> Parámetro de forma</p> <p><math>\Gamma(\beta) =</math> Función Gamma completa</p>

Tabla 22 (Continuación) Funciones de distribución de AFA V.1.1 (IMTA).

<p><b>Distribución Gamma de 3 Parámetros</b></p>		$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{\alpha T(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} dx$
<p><b>Distribución Log Pearson Tipo III</b></p>	<p>Su aplicación en hidrología está estrictamente limitada. Respecto a su aplicación, en 1967 el Federal Water Resources Council de Estados Unidos sugirió que las agencias de tipo gubernamental adoptaran la distribución Log Pearson tipo III como la distribución de frecuencias estándar para inundaciones; a lo que Benson agrega que no existe un criterio estadístico riguroso en el cual basarse para la aplicación de la distribución Log Pearson tipo III y por lo tanto esta elección es hasta cierto punto subjetiva (Kite, 1988).</p>	$F(x) = \frac{1}{\alpha T(\beta)x} \left(\frac{\text{Ln}x - y_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{\text{Ln}x - y_0}{\alpha}\right)}$ <p>Donde:</p> <p><math>y_0 =</math> Parámetro de ubicación  <math>\alpha =</math> Parámetro de escala  <math>\beta =</math> Parámetro de forma</p>
<p><b>Distribución General de Valores Extremos</b></p>	<p>La distribución General de Valores Extremos tiene sus bases en la Teoría de Valores Extremos, dicha teoría proporciona una descripción del comportamiento aleatorio de los n-ésimos valores más grandes o más pequeños de una muestra. Las distribuciones de valor extremo han sido ampliamente utilizadas en hidrología. (Ven Te Chow et al., 1996)</p>	$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)^k\right]^{1/k}}$
<p><b>Distribución Gumbel</b></p>	<p>La distribución de Valores Extremos Tipo I o Distribución Gumbel nace con Fisher y Tippett, en los años veinte con la Teoría de Valores Extremos. Jenkinson (1955) demostró que esta distribución es un caso especial de la Distribución General de valores Extremos (Ven Te Chow et al., 1996).</p>	$F(x) = e^{-e^{-\left[\frac{x-\beta}{\alpha}\right]}}$
<p><b>Distribución Gumbel Doble</b></p>	<p>En zonas costeras como el Golfo de México el tratar de ajustar variables climatológicas como la precipitación máxima en 24 horas o los gastos máximos anuales a una función de distribución de probabilidad de una población (por ejemplo Gumbel) no sería del todo razonable, ya que se puede observar con claridad la existencia de dos grupos con características diferentes, el primero originado por precipitaciones debido a los fenómenos dominantes en la región y el segundo, originado por precipitaciones de origen ciclónico, que comúnmente provocan las avenidas más grandes. Por esto es necesario estudiar y hacer un análisis de frecuencias considerando que los gastos máximos anuales se originan por dos procesos diferentes que dan lugar a una función de distribución mezclada o de dos poblaciones (Campos, 1989). Para realizar el análisis de frecuencias, aplicando la función de distribución doble Gumbel se plantea la función de distribución de probabilidad para dos poblaciones considerando que los grupos son mutuamente excluyentes, es decir el valor de la variable se debe a un evento ciclónico o no (Haan, 1977).</p>	$F(x) = P \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x - \beta_1}{\alpha_1}\right)\right\} + (1 - P) \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x - \beta_2}{\alpha_1}\right)\right\}$



Tabla 23 Error estándar de ajuste para cada función y estación (elaboración propia).

Función de probabilidad	Estación 11007			Estación 11094			Estación 11103		
	Error estándar de ajuste			Error estándar de ajuste			Error estándar de ajuste		
	Momentos	Max Verosimilitud	Error cuadrático mínimo	Momentos	Max Verosimilitud	Error cuadrático mínimo	Momentos	Max Verosimilitud	Error cuadrático mínimo
Normal	2.4			5			2.5		
Exponencial (1 parámetro)	39			35.5			37.7		
Exponencial (2 parámetros)	5.521	12.2		3.172	5.3		5.999	11.4	
Log Normal (2 parámetros)	2.7			3.7			2.8		
Log Normal (3 parámetros)	2.332	2.4		2.856	2.4		2.405	2.5	
Gamma (2 parámetros)	2.438	2.4		3.645	4.1		2.527	2.5	
Gamma (3 parámetros)	2.328	2.4		2.685	4.9		2.399	2.5	
Log Pearson (tipo III)	3.519	2.8		3.096	3.7		3.993	2.9	
General de Valores Extremos	2.2			14.9			2.3		
Gumbel	3.455	3.2		2.838	3.6		3.612	3.3	
Gumbel Doble (P) fija			2.1			2.4			2.3
Gumbel Doble (P) optimizada			1.8			2.4			
			P= 0.9			P= 0.5			P= 0.86
			P= 0.87			P= 0.51			P=

Se utilizó la distribución de probabilidad Gumbel doble por ser la que presentó un error menor en todas las estaciones, posteriormente se obtuvieron los datos para un periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. La gráfica de la Figura 26 muestra la distribución doble Gumbel para la estación 11007, los valores medidos y ajustados, mientras que en la Figura 27 se observa la misma estación con los valores extrapolados. A estos datos se les agrega un factor de corrección por intervalo fijo de observación, equivalente al 13%. Los datos resultantes del programa AFA y los valores con el factor de corrección se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24 Precipitación máxima (elaboración propia).

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima (mm)						
	Estación 11007		Estación 11094		Estación 11103		Promedio ponderado
	Dato	Corregido	Dato	Corregido	Dato	Corregido	
10	82.79	93.55	83.52	94.37	86.82	98.11	94.12
25	87.69	99.09	95.92	108.39	94.41	106.68	104.20
50	95.39	107.79	104.97	118.61	101.35	114.53	113.68
100	103.60	117.06	113.89	128.70	109.51	123.75	123.38

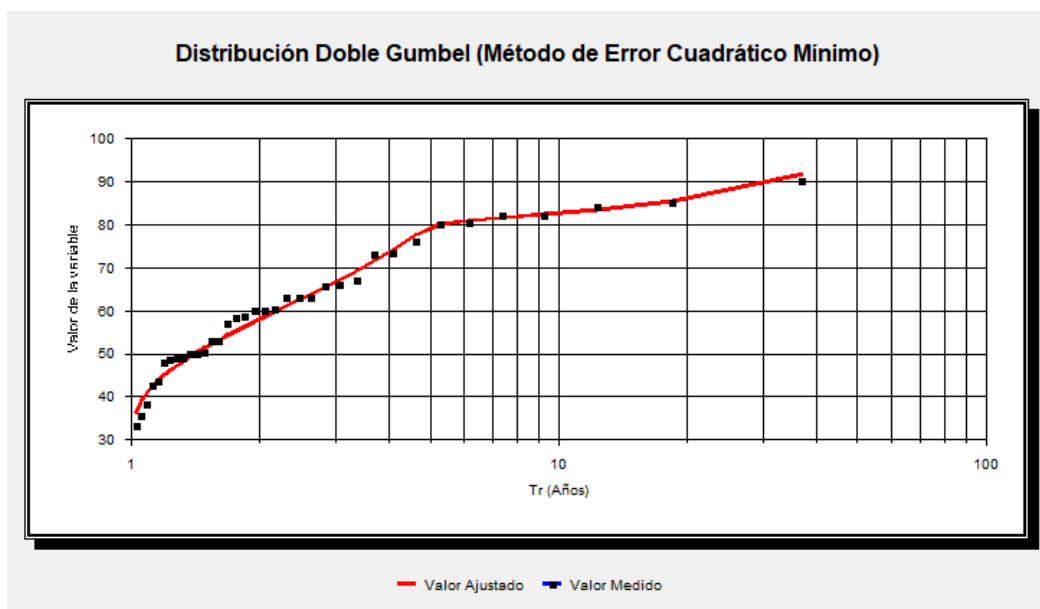


Figura 26 Distribución Gumbel. Estación 11007. Valores medidos y ajustados (obtenido de AFA V1.1).

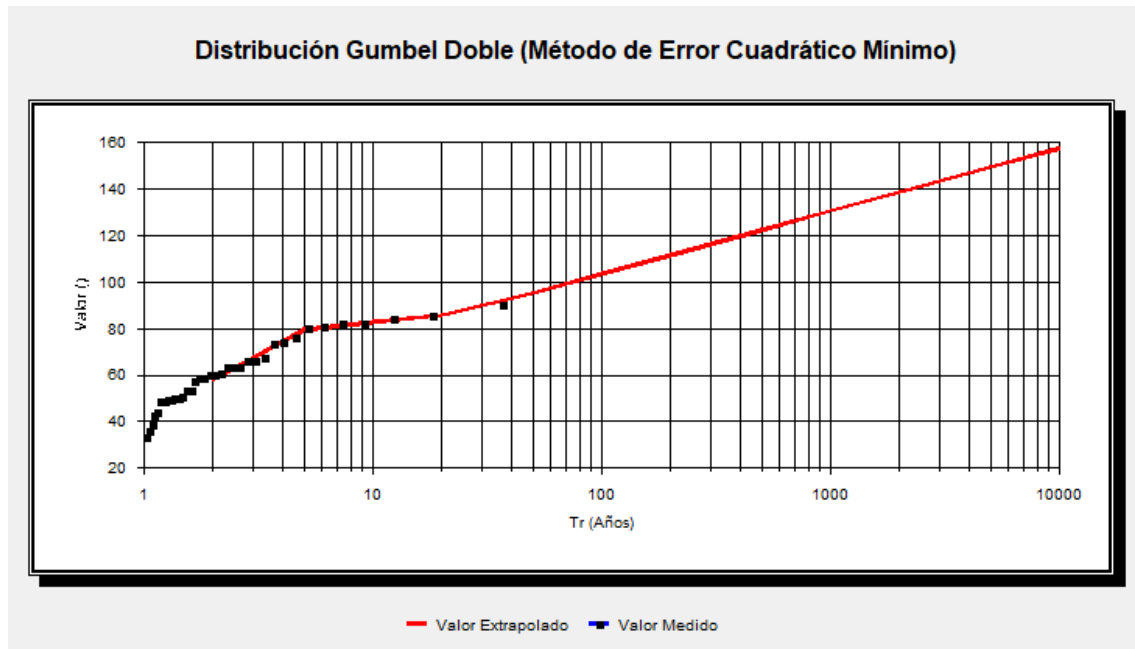


Figura 27 Distribución Gumbel. Estación 11007. Valores extrapolados (obtenido de AFA V1.1).

#### b.4 Curvas $i-d-T$

Para la generación de las curvas Intensidad – Duración – Periodo de retorno se utilizó el método propuesto por Campos-Aranda (Campos Aranda, 2010). Se consultaron las isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) de donde se obtuvo información de la intensidad (mm/hr) para el periodo de retorno de 10 años.

Los datos obtenidos de las distribuciones de probabilidad para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años se multiplicaron por 1.13 que es el factor de corrección por intervalo fijo de observación. Con estos datos se calcula  $R$  con la expresión 16 y  $R$  promedio que se utilizan para la obtención de los parámetros  $a$  (ecuación 18),  $b$  (ecuación 19) y  $c$  (ecuación 20). Las expresiones fueron calculadas con base en las curvas de las gráficas que presenta Chen y son válidas únicamente en el intervalo  $0.10 \leq R \leq 0.60$ .

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (16)$$

$$i_d^{Tr} = \frac{a (P_1^{10}) \log[10^{(2-F_{ch})} (T_{ra}^{(F_{ch}-1)})]}{(d+b)^c} \quad (17)$$

$$a = -2.297536 + 100.0389 R_{ch} - 432.5438 R_{ch}^2 + 1256.228 R_{ch}^3 - 1028.902 R_{ch}^4 \quad (18)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 R_{ch} - 341.4349 R_{ch}^2 + 757.9172 R_{ch}^3 - 598.7461 R_{ch}^4 \quad (19)$$

$$c = -0.0649834 + 5.069294 R_{ch} - 16.08111 R_{ch}^2 + 29.09596 R_{ch}^3 - 20.06288 R_{ch}^4 \quad (20)$$

Donde:

$i_d^{Tr}$  = Intensidad de la lluvia para cualquier periodo de retorno y cualquier duración.

$P_1^{10}$  = Precipitación (mm) con un periodo de retorno de 10 años y con duración de una hora.

$d$  = Duración de la lluvia ( $5 \text{ minutos} \leq d \leq 24 \text{ horas}$ ).

$a, b, c$  = Parámetros que se calculan con las expresiones 5, 6 y 7.

$$F_{ch} = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}}$$

$T_{ra}$  = Periodo de retorno (años) analizado en el año  $a$ .

Se obtuvo una gráfica de curvas  $i-d-T$  para cada una de las tres estaciones (Figura 28, Figura 29 y Figura 30) y, utilizando los polígonos de Thiessen, aplicando un promedio ponderado que se muestra en la Tabla 24, se realizó una gráfica con las curvas  $i-d-T$  con valor promedio para toda la cuenca de estudio (Figura 31).

Tabla 25 Estación 11007 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno (elaboración propia).

Duración (min)	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	250	500	1000	1440
<b>Intensidad de Lluvia en mm/h</b>														
<b>5</b>	119.30	93.96	78.25	67.46	53.47	41.41	34.16	27.97	23.85	20.89	12.07	7.09	4.14	3.11
<b>10</b>	129.06	101.65	84.65	72.98	57.85	44.80	36.95	30.25	25.80	22.60	13.06	7.68	4.48	3.37
<b>25</b>	141.97	111.82	93.12	80.28	63.63	49.28	40.65	33.28	28.38	24.86	14.37	8.44	4.93	3.71
<b>50</b>	151.74	119.51	99.53	85.81	68.01	52.68	43.45	35.57	30.33	26.57	15.36	9.02	5.27	3.96
<b>100</b>	161.50	127.20	105.93	91.33	72.39	56.07	46.24	37.86	32.28	28.28	16.34	9.60	5.61	4.22

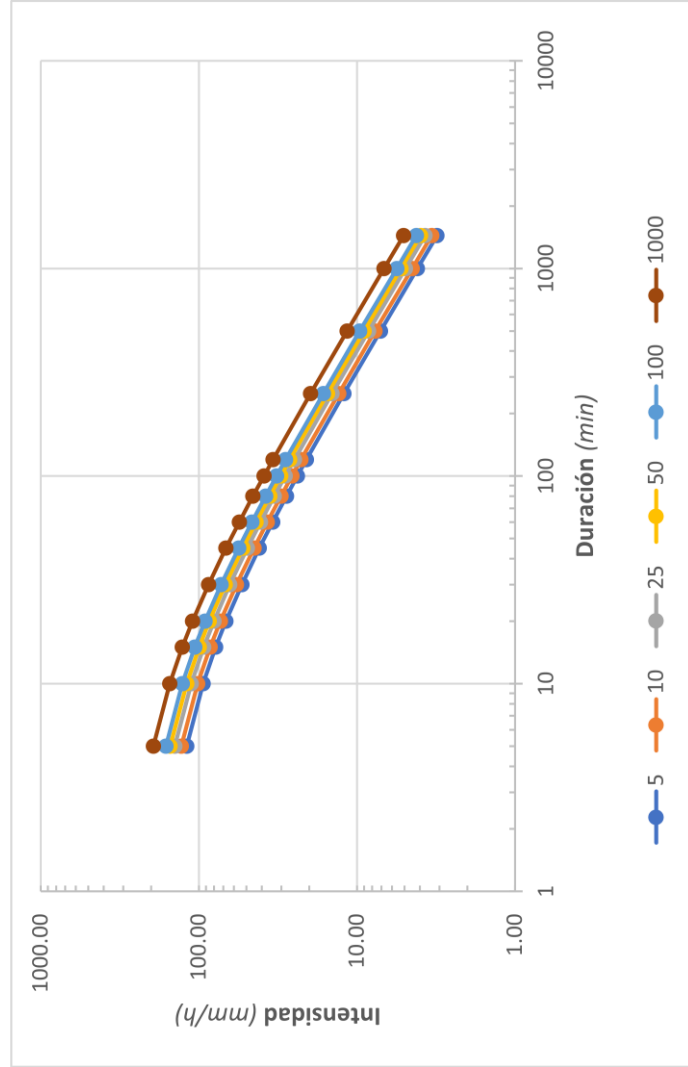


Figura 28 Estación 11007. Curvas i-d-T (elaboración propia).

Tabla 26 Estación 11094 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno (elaboración propia).

Duración (min)	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	250	500	1000	1440	
<b>Intensidad de Lluvia en mm/h</b>															
<b>T (años)</b>															
<b>5</b>	117.38	91.88	76.38	65.86	52.31	40.70	33.72	27.75	23.78	20.92	12.32	7.38	4.40	3.35	
<b>10</b>	131.81	103.17	85.77	73.95	58.74	45.70	37.86	31.17	26.70	23.49	13.83	8.29	4.94	3.76	
<b>25</b>	150.89	118.10	98.19	84.65	67.24	52.31	43.34	35.68	30.57	26.89	15.84	9.49	5.66	4.30	
<b>50</b>	165.32	129.40	107.58	92.75	73.67	57.32	47.49	39.09	33.49	29.46	17.35	10.40	6.20	4.71	
<b>100</b>	179.75	140.69	116.97	100.85	80.10	62.32	51.63	42.50	36.41	32.03	18.86	11.31	6.74	5.13	

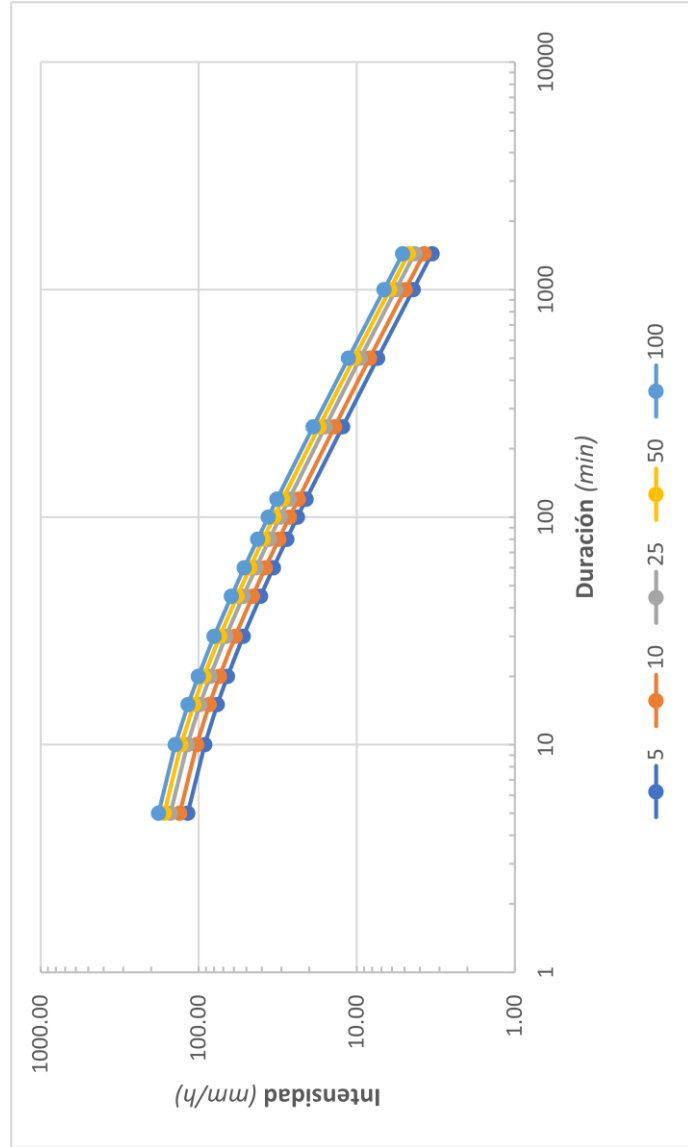


Figura 29 Estación 11094. Curvas i-d-T (elaboración propia).

Tabla 27 Estación 11103 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno (elaboración propia).

Duración (min)	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	250	500	1000	1440	
<b>T (años)</b>	<b>Intensidad de Lluvia en mm/h</b>														
<b>5</b>	121.01	94.83	78.87	68.00	53.99	41.97	34.74	28.57	24.45	21.49	12.61	7.53	4.47	3.39	
<b>10</b>	131.34	102.93	85.60	73.80	58.60	45.55	37.71	31.01	26.54	23.33	13.69	8.18	4.85	3.68	
<b>25</b>	145.00	113.64	94.51	81.48	64.69	50.29	41.63	34.23	29.30	25.75	15.11	9.03	5.36	4.07	
<b>50</b>	155.34	121.73	101.24	87.29	69.30	53.87	44.60	36.67	31.39	27.59	16.19	9.67	5.74	4.36	
<b>100</b>	165.67	129.83	107.98	93.09	73.91	57.45	47.56	39.11	33.48	29.42	17.27	10.31	6.12	4.65	

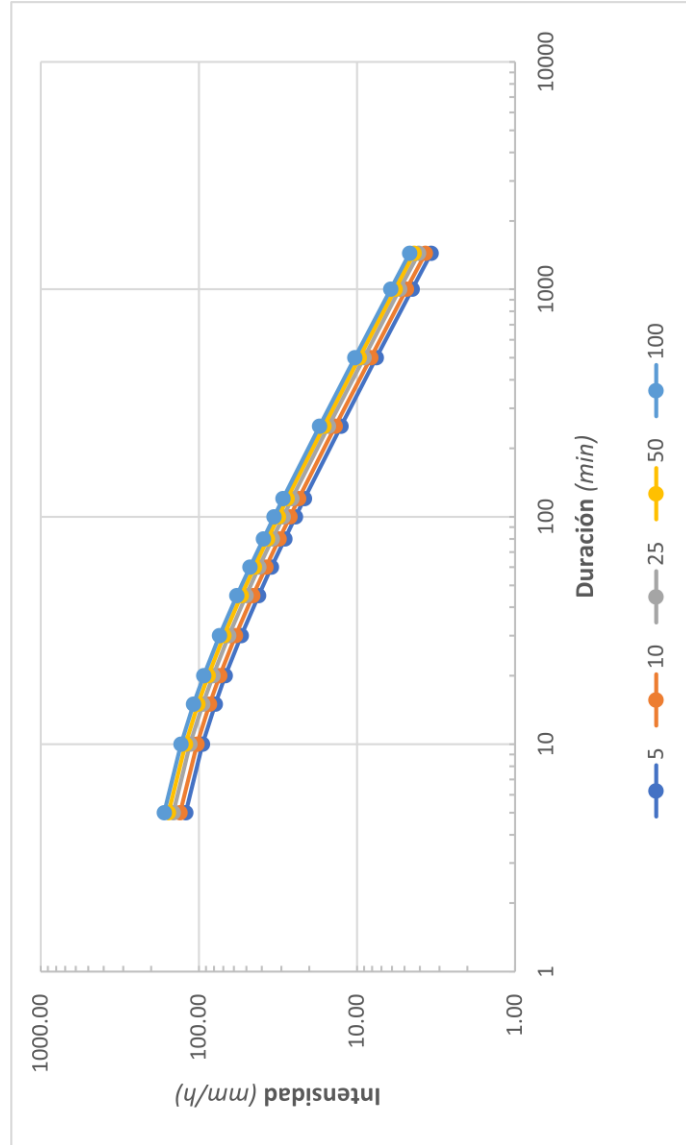


Figura 30 Estación 11103. Curvas i-d-T (elaboración propia).

Tabla 28 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno promediado (elaboración propia).

Duración (min)	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	250	500	1000	1440	
<b>T (años)</b>	<b>Intensidad de Lluvia en mm/h</b>														
<b>5</b>	118.46	92.98	77.36	66.70	52.93	41.10	33.98	27.91	23.86	20.95	12.24	7.27	4.30	3.25	
<b>10</b>	130.69	102.58	85.35	73.58	58.39	45.34	37.49	30.79	26.32	23.11	13.50	8.02	4.74	3.59	
<b>25</b>	146.86	115.27	95.91	82.69	65.62	50.95	42.13	34.60	29.58	25.97	15.17	9.02	5.32	4.03	
<b>50</b>	159.09	124.87	103.89	89.57	71.08	55.19	45.64	37.48	32.04	28.13	16.43	9.77	5.77	4.37	
<b>100</b>	171.32	134.47	111.88	96.46	76.55	59.43	49.15	40.36	34.51	30.30	17.70	10.52	6.21	4.70	

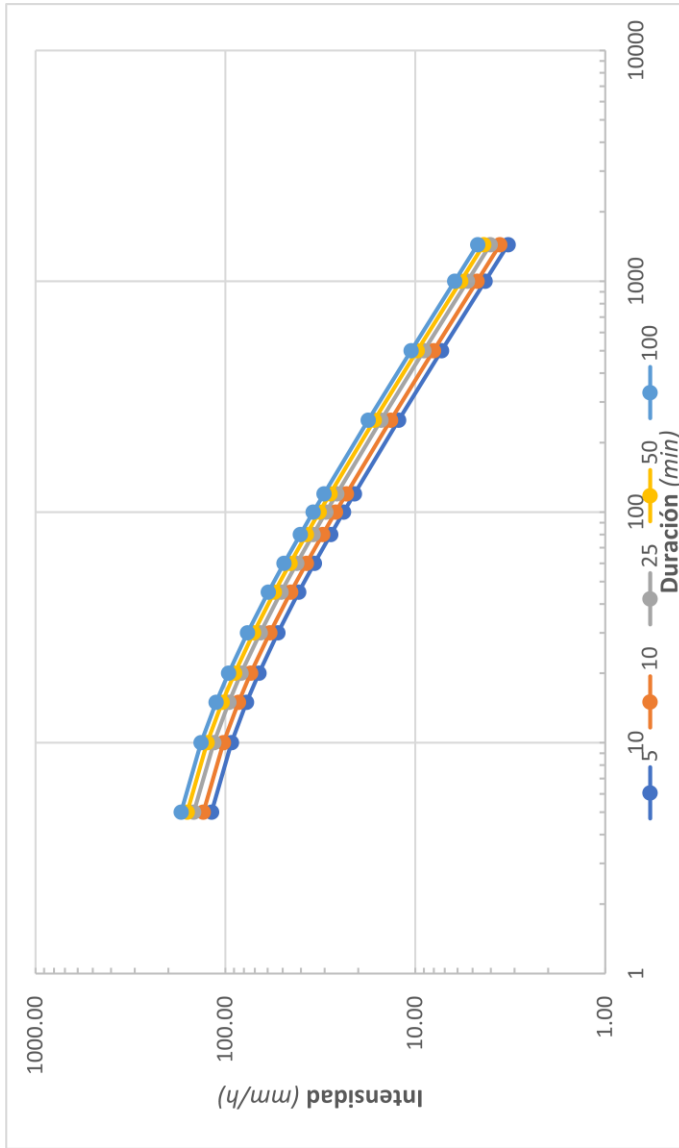


Figura 31 Curvas i-d-T con valores promediados de la cuenca (elaboración propia).



b.5 Clasificación de tormentas por duración

Se siguió el procedimiento conforme a la información del manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, libro 19 (drenaje pluvial y urbano) (CONAGUA, 2015), donde se señala que deben definirse intervalos de duración. Los intervalos definidos son los que se muestran en la Tabla 29, en la que se señala la frecuencia con que se presentan dichas duraciones en los 4.5 años que se analizaron (enero 2014- junio 2018).

Tabla 29 Frecuencias de cada intervalo de lluvia (elaboración propia).

<b>Año</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018*</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Intervalo (min)</b>						
<b>10-30</b>	95	207	174	89	18	583
<b>40-60</b>	7	24	28	31	5	95
<b>70-90</b>	4	19	16	7	3	49
<b>100-120</b>	3	5	12	8	1	29
<b>130-240</b>	11	10	17	9	6	53
<b>250-480</b>	6	12	3	13	3	37
<b>490-960</b>	0	4	1	0	0	5
<b>970-1920</b>		1				1

Acorde a la información de la Tabla 29, el intervalo de lluvia que se presenta con mayor frecuencia es el de 10 a 30 minutos, sin embargo, no es probable que una precipitación de esa duración cause alguna inundación, por lo que se eligió trabajar con los datos del intervalo 130 – 240 pues se considera que tienen una frecuencia alta, y una lluvia de esa duración podría provocar inundaciones.

b.6 Obtención del hietograma de precipitación.

“El registro de las lluvias históricas permite calcular la forma de la precipitación que en promedio se presenta más veces en el sitio de estudio. Dicha forma de lluvia se emplea para determinar el histograma de diseño” (CONAGUA, 2015).

Lo primero que se hizo para obtener la forma de la lluvia fue el cálculo de la curva masa (acumulado de la precipitación durante su duración). Posteriormente se creó una curva masa adimensional (resultado de dividir el incremento de precipitación entre la lámina de lluvia total), también es necesario adimensionar el tiempo, pues la clasificación incluye precipitaciones con distintas duraciones. La Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44, incluidas en los anexos muestran el proceso mencionado. Los resultados generales se muestran en la Figura 32 donde cada línea representa la curva masa de cada evento de lluvia analizado y la línea roja gruesa es la curva masa media.

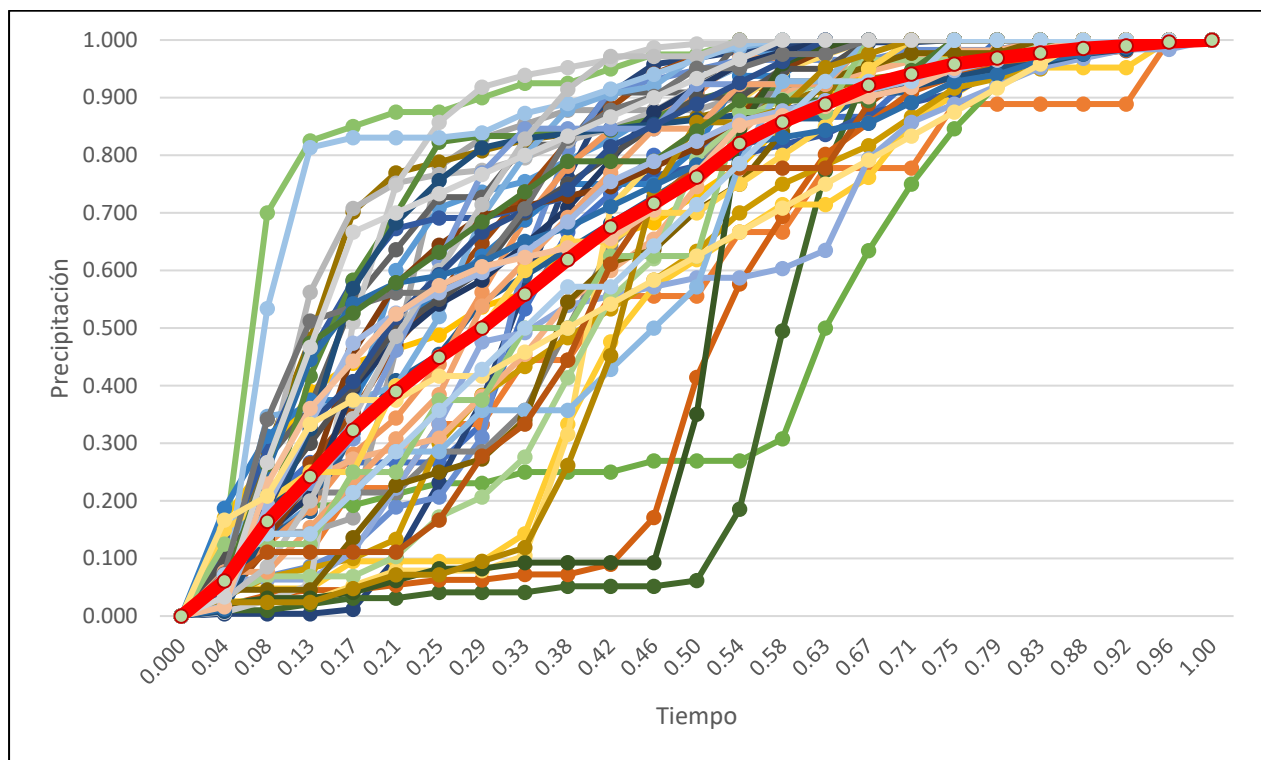


Figura 32 Curva masa de cada evento de lluvia y curva masa media (elaboración propia).

A partir de la curva masa media mostrada en la Figura 32 se genera la distribución acumulada adimensional de la lluvia que muestra el comportamiento de la lluvia (forma de la lluvia) en la zona de estudio.

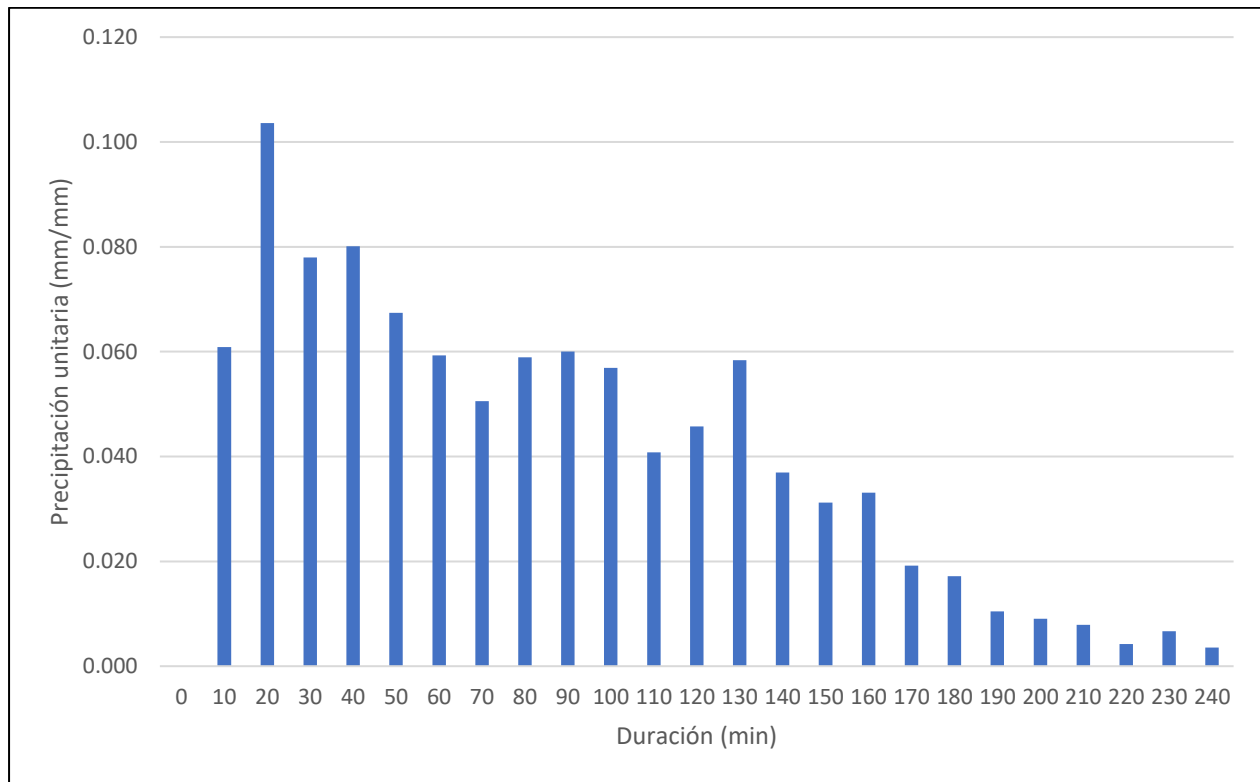


Figura 33 Hietograma unitario de diseño para una duración de 240 minutos (elaboración propia).

Con el hietograma de diseño obtenido (Figura 33) es posible generar un hietograma para cualquier altura de precipitación, en este caso se utilizará un hietograma para cada periodo de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años) por lo que se utilizó la información obtenida de las curvas *i-d-T* con valores promediados de la cuenca (Tabla 28 y Figura 31) para obtener la intensidad para cada periodo de retorno y calcular la altura de precipitación. Esta información se encuentra contenida en la Tabla 30.

Tabla 30 Datos obtenidos y calculados para hietogramas (elaboración propia).

Periodo de retorno (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
Duración (min)	240	240	240	240	240	240	240	240
Intensidad (mm/hr)	10.89	12.61	13.92	15.64	16.94	18.24	19.55	21.27
Precipitación (mm)	43.56	50.44	55.68	62.56	67.76	72.96	78.2	85.08

Tabla 31 Altura de precipitación para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).

Tiempo (min)	Altura de precipitación unitaria	Periodo de retorno (años)											
		2	5	10	25	50	100	200	500				
0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.062	2.715	3.144	3.471	3.900	4.224	4.548	4.875	5.304				
20	0.108	4.716	5.460	6.028	6.772	7.335	7.898	8.465	9.210				
30	0.081	3.516	4.072	4.495	5.050	5.470	5.890	6.313	6.868				
40	0.083	3.616	4.188	4.623	5.194	5.626	6.057	6.492	7.063				
50	0.069	3.021	3.498	3.861	4.338	4.699	5.059	5.423	5.900				
60	0.061	2.641	3.058	3.376	3.793	4.109	4.424	4.742	5.159				
70	0.051	2.232	2.584	2.853	3.205	3.472	3.738	4.007	4.359				
80	0.060	2.623	3.038	3.353	3.768	4.081	4.394	4.710	5.124				
90	0.061	2.675	3.097	3.419	3.842	4.161	4.480	4.802	5.224				
100	0.058	2.530	2.930	3.234	3.634	3.936	4.238	4.542	4.942				
110	0.041	1.774	2.054	2.267	2.548	2.759	2.971	3.185	3.465				
120	0.046	2.004	2.321	2.562	2.879	3.118	3.357	3.598	3.915				
130	0.060	2.599	3.009	3.322	3.732	4.043	4.353	4.665	5.076				
140	0.037	1.593	1.844	2.036	2.288	2.478	2.668	2.859	3.111				
150	0.030	1.324	1.533	1.692	1.902	2.060	2.218	2.377	2.586				
160	0.032	1.414	1.637	1.807	2.031	2.199	2.368	2.538	2.762				
170	0.017	0.762	0.882	0.974	1.094	1.185	1.276	1.368	1.488				
180	0.015	0.669	0.774	0.855	0.960	1.040	1.120	1.200	1.306				
190	0.008	0.352	0.408	0.450	0.506	0.548	0.590	0.632	0.688				
200	0.007	0.287	0.332	0.367	0.412	0.447	0.481	0.515	0.561				
210	0.005	0.232	0.268	0.296	0.333	0.360	0.388	0.416	0.452				
220	0.001	0.061	0.070	0.078	0.087	0.094	0.102	0.109	0.119				
230	0.004	0.176	0.204	0.225	0.253	0.274	0.295	0.316	0.344				
240	0.001	0.028	0.033	0.036	0.041	0.044	0.047	0.051	0.055				

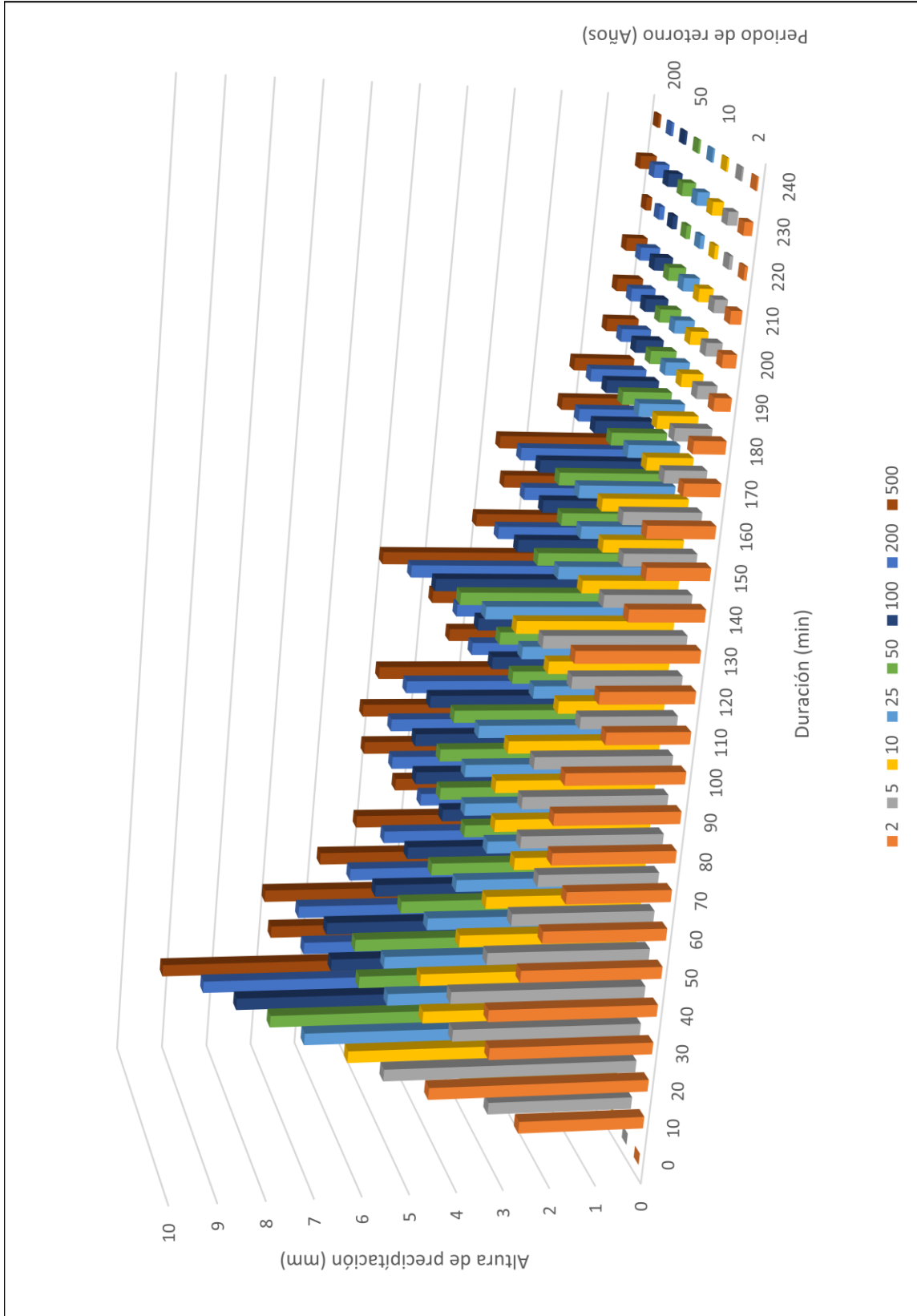


Figura 34 Hietograma de altura de precipitación para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).

Tabla 32 Intensidad de lluvia para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).

Tiempo (min)	Periodo de retorno (años)									
	2	5	10	25	50	100	200	500		
	Intensidad de lluvia (mm/hr)									
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	16.29	18.87	20.83	23.40	25.34	27.29	29.25	31.82		
20	28.29	32.76	36.17	40.63	44.01	47.39	50.79	55.26		
30	21.10	24.43	26.97	30.30	32.82	35.34	37.88	41.21		
40	21.70	25.13	27.74	31.16	33.75	36.34	38.95	42.38		
50	18.12	20.99	23.17	26.03	28.19	30.36	32.54	35.40		
60	15.85	18.35	20.26	22.76	24.65	26.54	28.45	30.95		
70	13.39	15.51	17.12	19.23	20.83	22.43	24.04	26.16		
80	15.74	18.23	20.12	22.61	24.48	26.36	28.26	30.74		
90	16.05	18.58	20.51	23.05	24.97	26.88	28.81	31.35		
100	15.18	17.58	19.40	21.80	23.61	25.43	27.25	29.65		
110	10.64	12.32	13.60	15.29	16.56	17.83	19.11	20.79		
120	12.03	13.93	15.37	17.27	18.71	20.14	21.59	23.49		
130	15.59	18.06	19.93	22.39	24.26	26.12	27.99	30.46		
140	9.56	11.07	12.22	13.73	14.87	16.01	17.16	18.67		
150	7.94	9.20	10.15	11.41	12.36	13.31	14.26	15.52		
160	8.48	9.82	10.84	12.18	13.20	14.21	15.23	16.57		
170	4.57	5.29	5.84	6.57	7.11	7.66	8.21	8.93		
180	4.01	4.64	5.13	5.76	6.24	6.72	7.20	7.83		
190	2.11	2.45	2.70	3.03	3.29	3.54	3.79	4.13		
200	1.72	1.99	2.20	2.47	2.68	2.89	3.09	3.36		
210	1.39	1.61	1.78	2.00	2.16	2.33	2.49	2.71		
220	0.36	0.42	0.47	0.52	0.57	0.61	0.65	0.71		
230	1.06	1.22	1.35	1.52	1.64	1.77	1.90	2.06		
240	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.31	0.33		

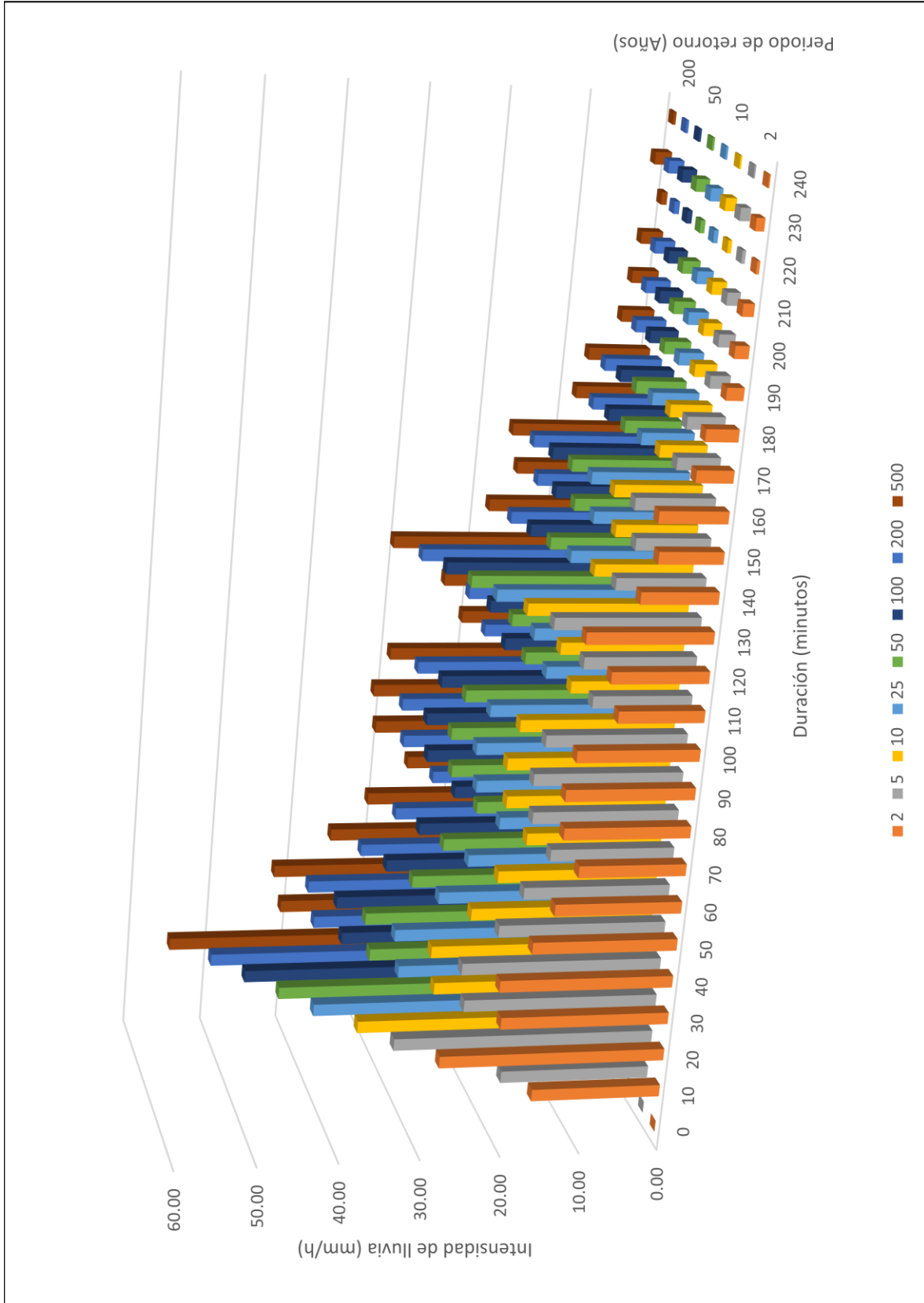
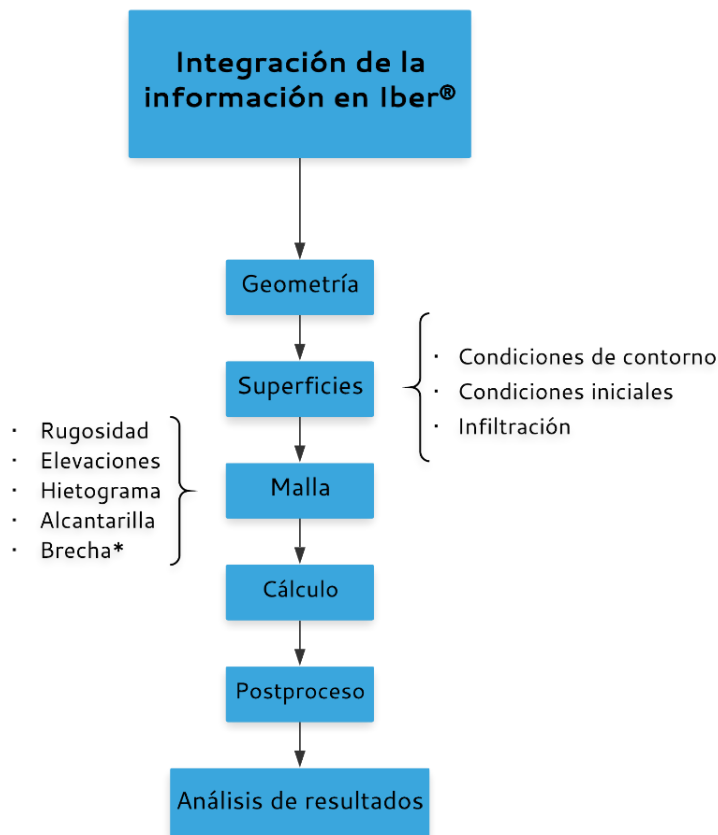


Figura 35 Hietograma de intensidad de lluvia para cada periodo de retorno para una lluvia de 240 minutos (elaboración propia).

Con la información de la Tabla 30 y utilizando el hietograma de diseño, se genera un hietograma de altura de precipitación para cada periodo de retorno como se muestra en la Tabla 31 y en la Figura 34 y posteriormente se genera también un hietograma de intensidades como se muestra en la Tabla 32 y en la Figura 35.

#### 4.2 Integración de la información en Iber®

En este apartado se describe el procedimiento que se realizó para integrar en el programa Iber® la información ya obtenida y procesada en el Sistema de Información Geográfica (SIG). Iber® trabaja con un preproceso y postproceso; en este apartado se describirá el preproceso, para posteriormente, en el apartado 5, ver los resultados en el postproceso. Para llevar a cabo la construcción del modelo en Iber®, se realizó el proceso que se muestra en la Figura 36



\*Únicamente para el modelo de rompimiento de la presa

Figura 36 Esquema de la integración de la información en Iber® (elaboración propia).



#### 4.2.1 Importación de la geometría

Se utilizó la geometría de la zona de estudio con las localidades amanzanadas, información que se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Iber® permite la importación de dicha información desde distintos formatos entre los que están IGES, DXF, Parasolid, ACIS, VDA, Rhinoceros, Shapefile, Puntos XYZ, KML. Se hizo la importación de un archivo shapefile como se observa en la Figura 37.

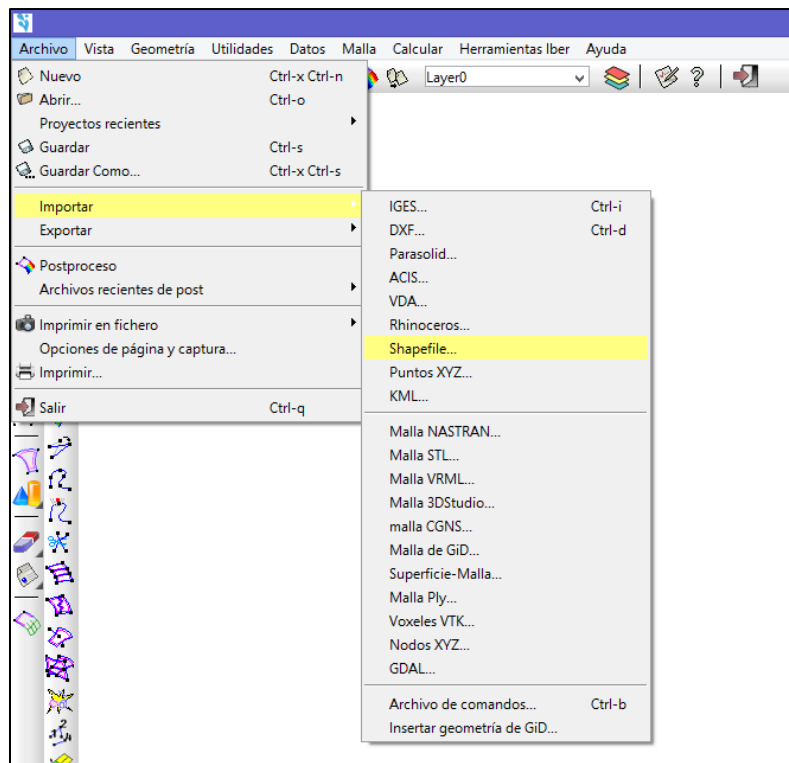


Figura 37 Importación de geometría en Iber® (elaboración propia).

Las localidades amanzanadas importadas a Iber® se observan en la Figura 38 con un acercamiento a la zona de la presa de la Olla, siendo editables las líneas (color azul) y los puntos (color negro).

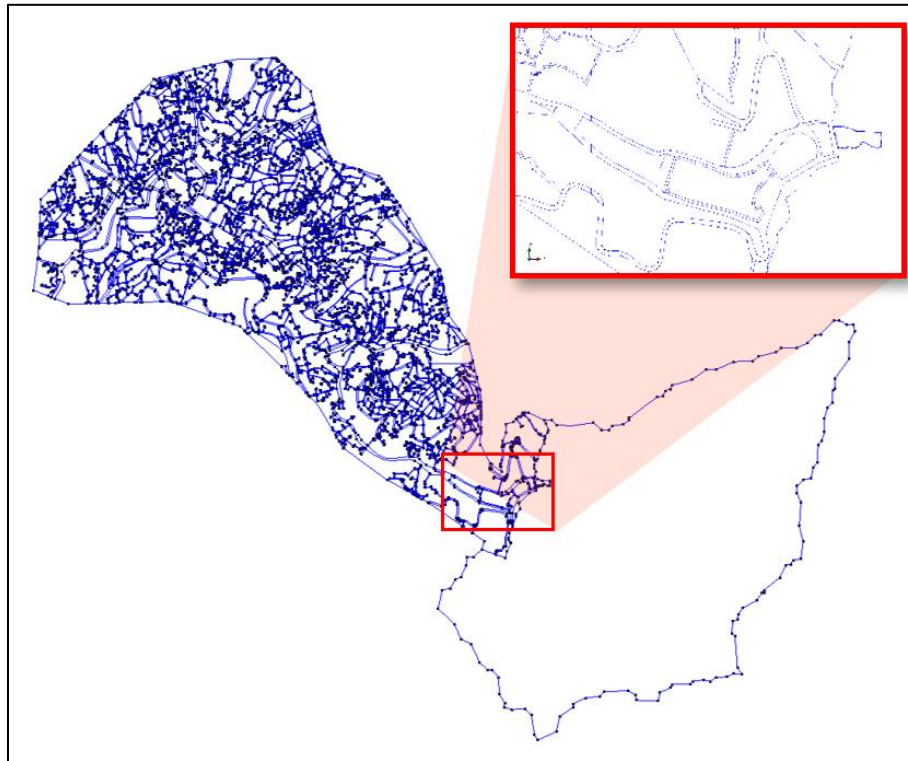


Figura 38 Geometría en Iber® (elaboración propia).

#### 4.2.2 Creación de superficies

Posteriormente se crearon 813 superficies NURBS (B-splines racionales no uniformes de acuerdo con su acrónimo inglés de non-uniform rational B-spline). Las superficies NURBS son muy utilizadas en modelación, sirven para representar la geometría en tercera dimensión y se pueden crear y editar con alta flexibilidad y precisión.

En Iber® se pueden crear las superficies basadas en la geometría mediante el menú *Geometría/Crear/Superficie NURBS*. Como se observa en la Figura 39 pueden crearse por contorno, automático, recortada, no recortada, por líneas paralelas, por puntos, por puntos de líneas y por búsqueda, acorde al modelo a realizar.

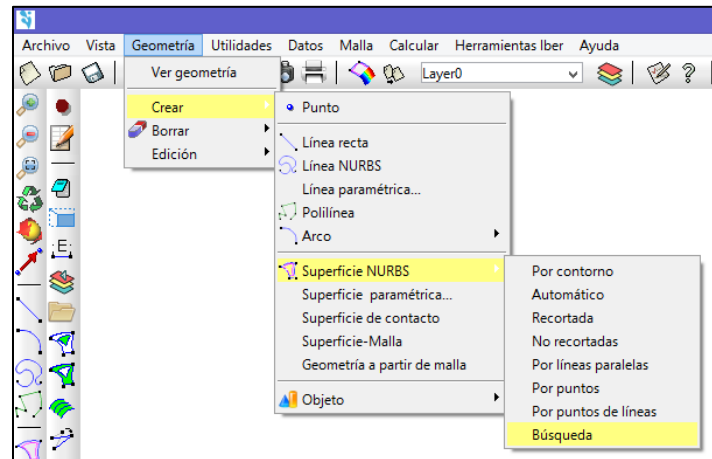


Figura 39 Creación de las superficies en Iber® (elaboración propia).

Las opciones utilizadas para el modelo fueron *Automático*, que crea superficies por orden según el número de lados de cada geometría hasta 20; posteriormente se utilizó *Búsqueda*, que crea superficies al seleccionar uno o dos lados de la figura; finalmente se utilizó *Por contorno* para las formas con más lados que aún no tenían una superficie, esta función requiere la selección de todos los lados de una figura para la creación de la superficie como se muestra en la Figura 40, (al seleccionar las líneas de la geometría éstas cambian de color azul a rojo, y las superficies se presentan en color rosa).

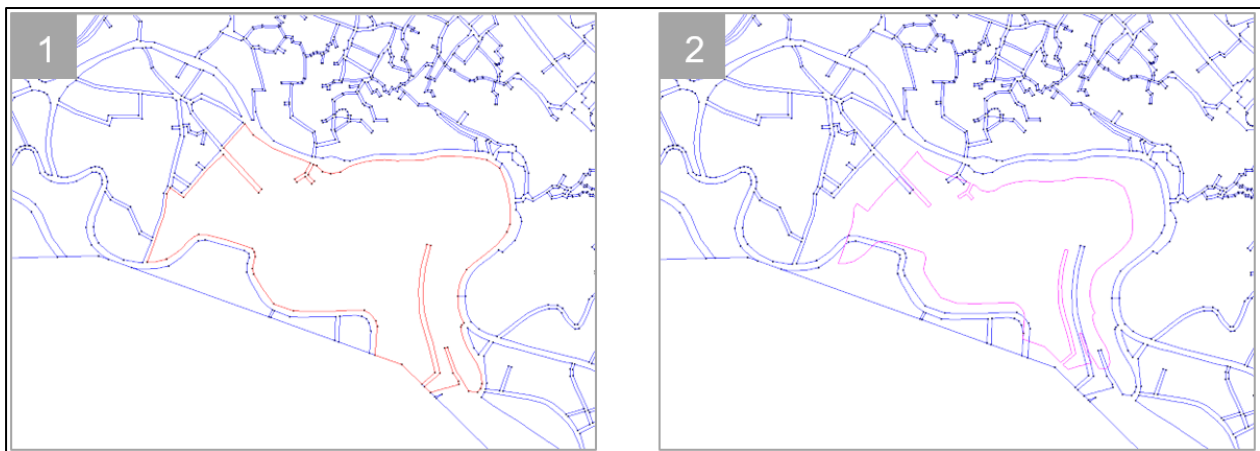


Figura 40 Creación de una superficie por contorno (elaboración propia).

En la Figura 42 puede observarse la geometría importada de un shapefile (líneas azules) y las superficies NURBS (líneas rosas), donde además se ha agregado una imagen georreferenciada de fondo para una mejor visualización desde *Vista/Imagen de fondo* como se observa en la Figura 41.

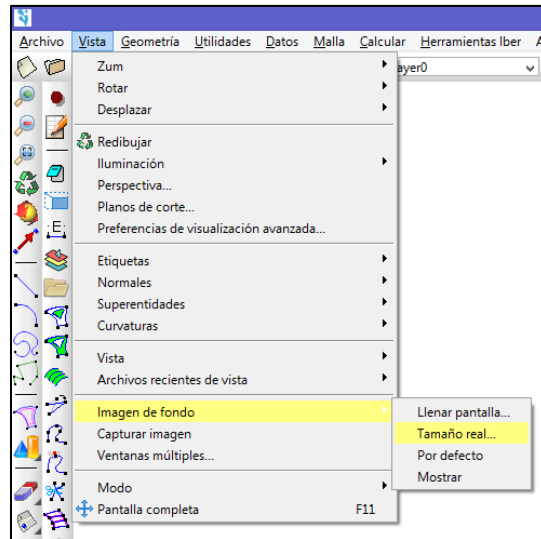


Figura 41 Imagen de fondo (elaboración propia).

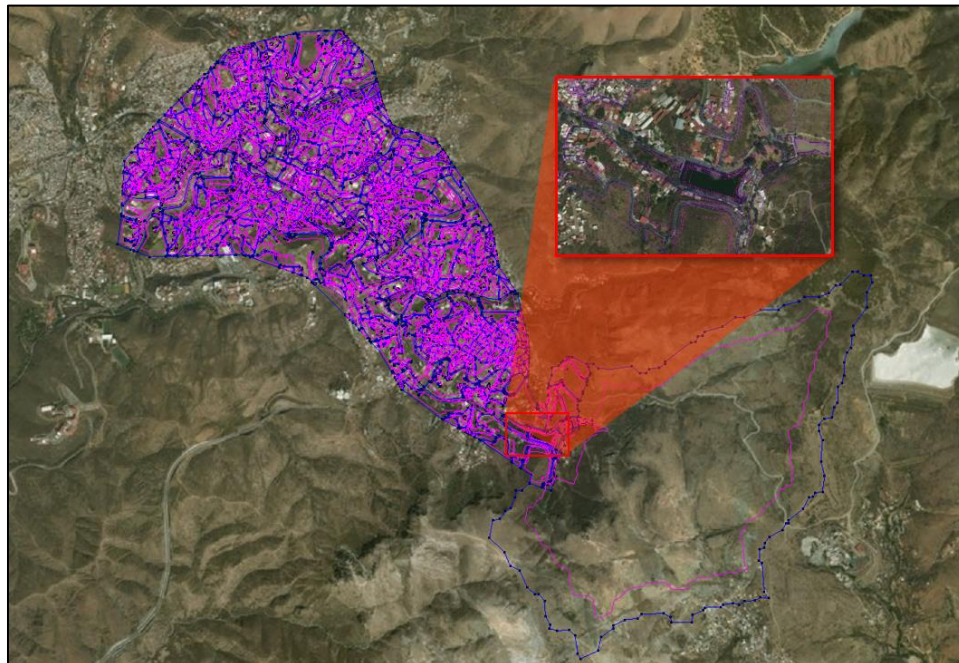


Figura 42 Geometría y superficies (elaboración propia).

### 4.2.3 Asignación de tamaños a las superficies

Las superficies NURBS creadas se utilizan para la generación de la malla. Se detallará sobre la malla en el apartado 4.2.7, sin embargo, es importante mencionar que debe asignarse un valor de tamaño a cada superficie para que la malla adquiera estos valores al ser creada. Dichos valores dependen de la precisión y nivel de detalle que se requiera para el proyecto; una malla más pequeña permitirá mayor precisión, pero alargará el tiempo computacional.

Para asignar los tamaños a las superficies se accede al menú *Malla/Agregar tamaño a superficies* como se muestra en la Figura 43, esto abrirá una nueva ventana donde se escribirá el valor que quiere asignarse a las superficies para después seleccionar cada superficie que tendrá dicho valor.

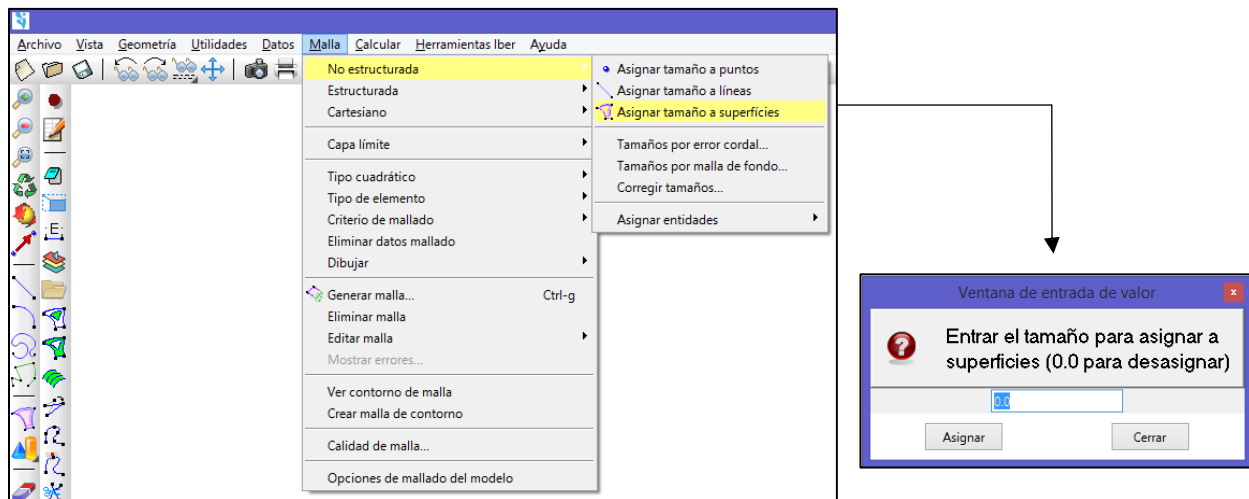


Figura 43 Asignación de tamaños a superficies (elaboración propia).

Se asignaron diferentes valores de tamaño de superficie de acuerdo con lo mencionado, asignando valores mayores a las zonas que no requieren de tantos detalles (como la cuenca de aportación) y valores menores a las zonas que deben ser bien detalladas (como la cortina de la presa).



Los valores asignados son: para la cuenca de aportación 40 m, manzanas 20 m, calles 10 m, embalses y la zona más próxima aguas abajo de la presa de la Olla 5 m, borde y cortina de ambas presas 2 m. Los resultados de este proceso se muestran en la Figura 44.

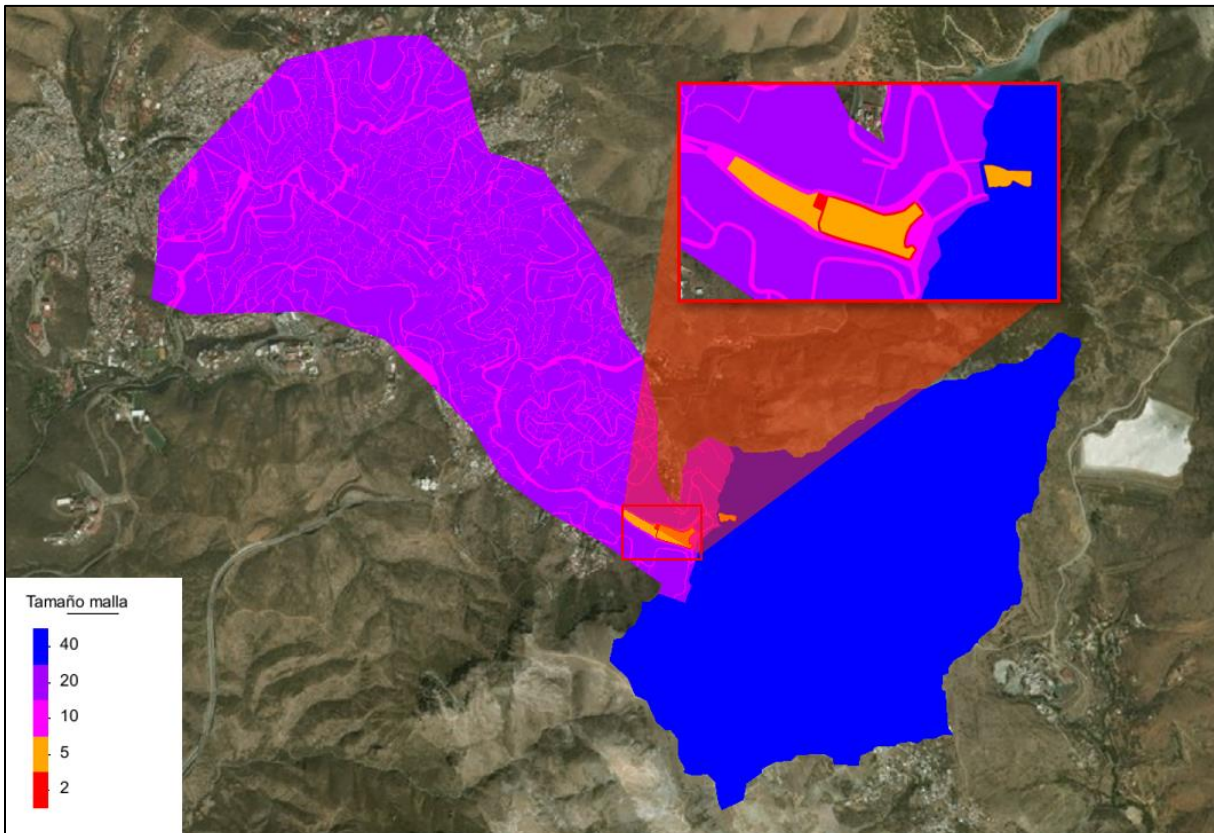


Figura 44 Tamaños de malla asignados en Iber® (elaboración propia).

#### 4.2.4 Condiciones de contorno

Iber® permite asignar condiciones de contorno tanto para entradas como para salidas, estas condiciones se utilizan para establecer lo que sucede en el contorno del modelo y asignar detalles sobre lo que ingresa y lo que sale. Las condiciones de entrada pueden asignarse como caudal total, caudal específico o cota de agua y se puede elegir entre un régimen crítico y subcrítico como se puede ver en la Figura 45.

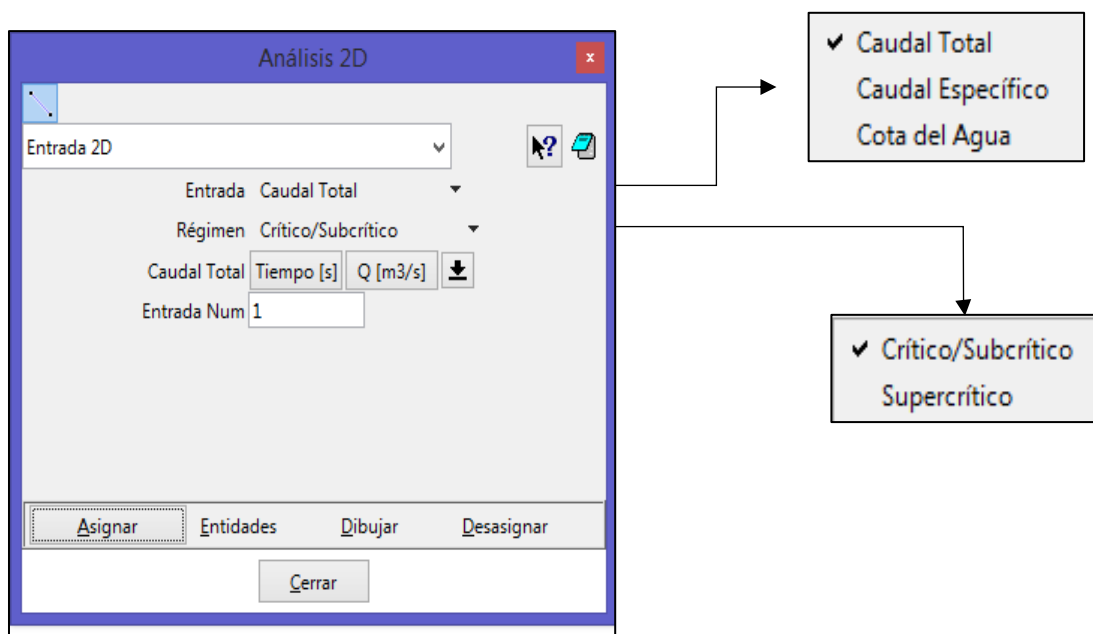


Figura 45 Condiciones de contorno, entradas (elaboración propia).

Las condiciones de salida se pueden definir para una condición de flujo supercrítico/crítico o subcrítico. Para el régimen subcrítico se puede utilizar una condición tipo vertedero, una condición de nivel dado o una curva de gasto, para el caso del régimen supercrítico/crítico no hay parámetros adicionales.

Las condiciones de salida definidas para el proyecto fueron: régimen subcrítico, condición tipo vertedero, con una condición de nivel dado (calado) de 20 centímetros en todo el perímetro del área de inundación como se señala en la Figura 46.



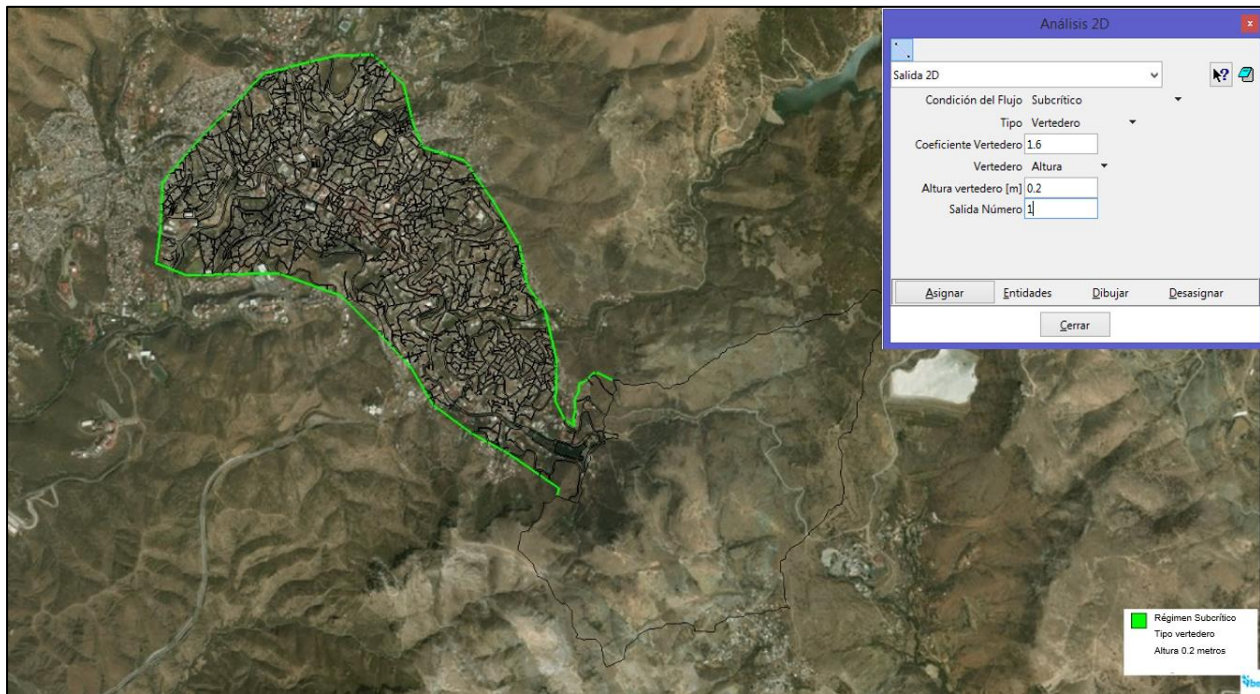


Figura 46 Condiciones de contorno, salidas (elaboración propia).

#### 4.2.5 Condiciones iniciales

Dentro del módulo de hidrodinámica, Iber® permite establecer las condiciones iniciales, desde donde se asigna el nivel de agua que tienen algunas superficies o elementos de la malla al inicio de la simulación. Con esta herramienta se puede definir el nivel de agua en ríos, presas, lagos, embalses o algún otro cuerpo de agua como cota o como calado. Esta condición se puede asignar sobre las superficies NURBS o sobre la malla; al igual que las condiciones de contorno se estableció antes de la generación de la malla buscando precisión y rapidez.

El espejo de agua en la presa, acorde a la información de la batimetría del año 2001, es de 2082.06 m s.n.m. para la presa de la Olla y 2095.672 m s.n.m. para la presa de San Renovato. Dicha información se observa gráficamente en la Figura 47.



Figura 47 Condiciones iniciales (elaboración propia).

#### 4.2.6 Infiltración

La infiltración es el tipo de pérdida con mayor importancia en cantidad, depende de la edafología, uso de suelo y vegetación de la zona. Iber<sup>®</sup> admite ingresar pérdidas por infiltración mediante diferentes métodos, tales como Horton, modelo lineal, Green & Ampt y SCS. Se asignaron pérdidas según el modelo del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) siguiendo el procedimiento que se detalló en el apartado 4.1.3

Con el objetivo de facilitar el proceso en Iber<sup>®</sup> se separó el área de estudio en dos: la cuenca de aportación y el área inundable. Por lo que se realizó un promedio ponderado con las áreas planteadas y se obtuvo un número de curva para cada área. De manera que los números obtenidos y su ubicación se muestran en la Figura 48. Estos datos se asignaron a cada una de las superficies NURBS antes de la creación de la malla por facilidad, el tamaño de las superficies es mayor al de los elementos de la malla y en cantidad son menores las superficies que los elementos de la malla. Lo malla adquirirá los datos que hayan sido asignados a las superficies.

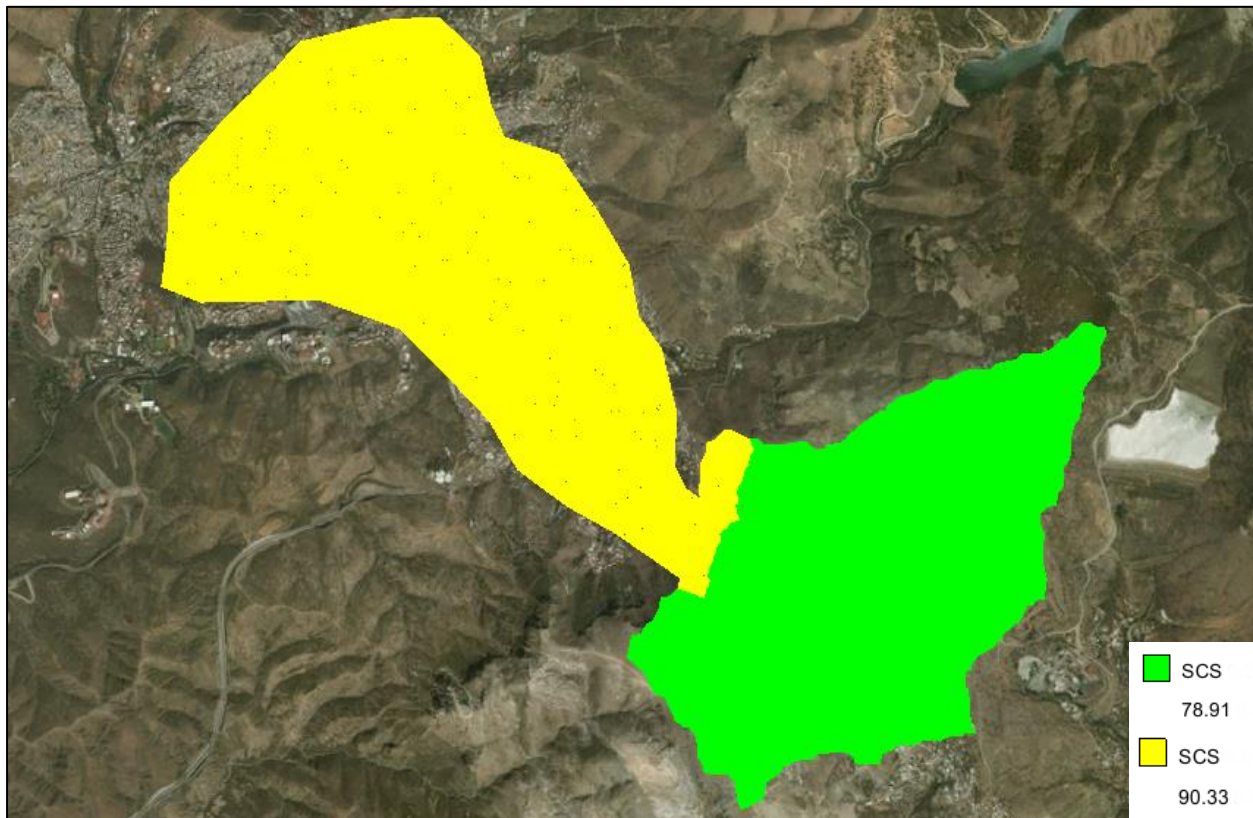


Figura 48 Números de curva asignados a la cuenca de estudio (elaboración propia).

#### 4.2.7 Malla

Para que Iber® resuelva las ecuaciones en el modelo es necesaria una malla que puede ser estructurada o no estructurada como se señaló en el apartado 3.2.1. La malla generada tendrá los tamaños que fueron asignados a cada superficie además de que adquirirá las propiedades que hayan sido establecidas en las superficies (las condiciones de contorno, condiciones iniciales, infiltración).

Se generó una malla no estructurada que se muestra en la Figura 49. Donde se agregó un acercamiento de la misma malla en la zona de la presa de la Olla y presa de San Renovato donde pueden apreciarse los diferentes tamaños de malla para cada zona.



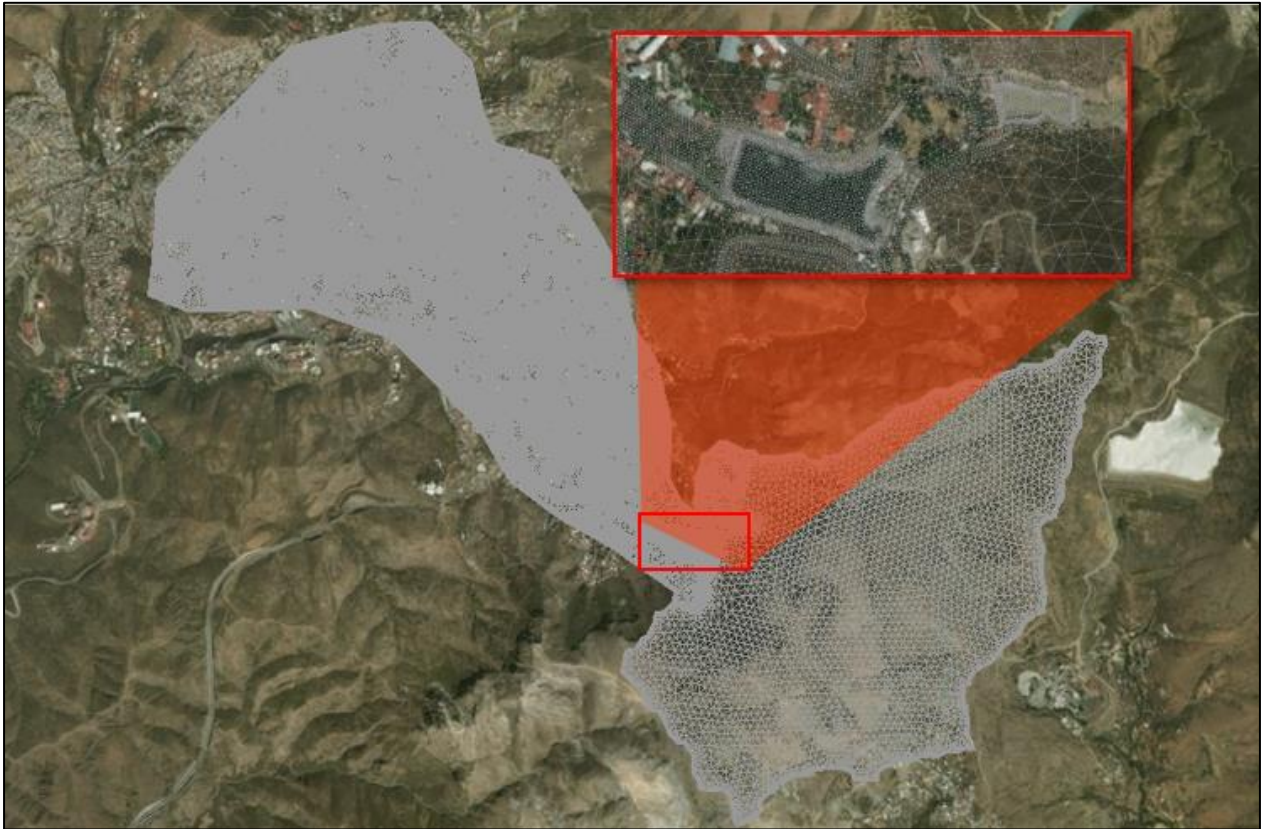


Figura 49 Malla no estructurada y acercamiento en la zona de la presa de la Olla y presa de San Renovato (elaboración propia).

#### 4.2.8 Rugosidad

En el apartado 4.1.3 se definieron las áreas y los coeficientes “n” de Manning. Los factores de rugosidad que se obtuvieron se integraron al modelo mediante asignación automática.

El proceso de asignación automática en Iber® permite ingresar los datos mediante dos archivos: un archivo ASCII Grid que contiene la distribución de los coeficientes de rugosidad y se genera mediante un sistema de información geográfica (un fragmento del archivo utilizado se muestra en la Figura 50 y en la Figura 51); y un archivo CSV que contiene la lista de los usos de suelo empleados (los datos del archivo utilizado se observan en la Figura 52).



Figura 50 Archivo ASCII Grid para asignación automática de la rugosidad (elaboración propia).

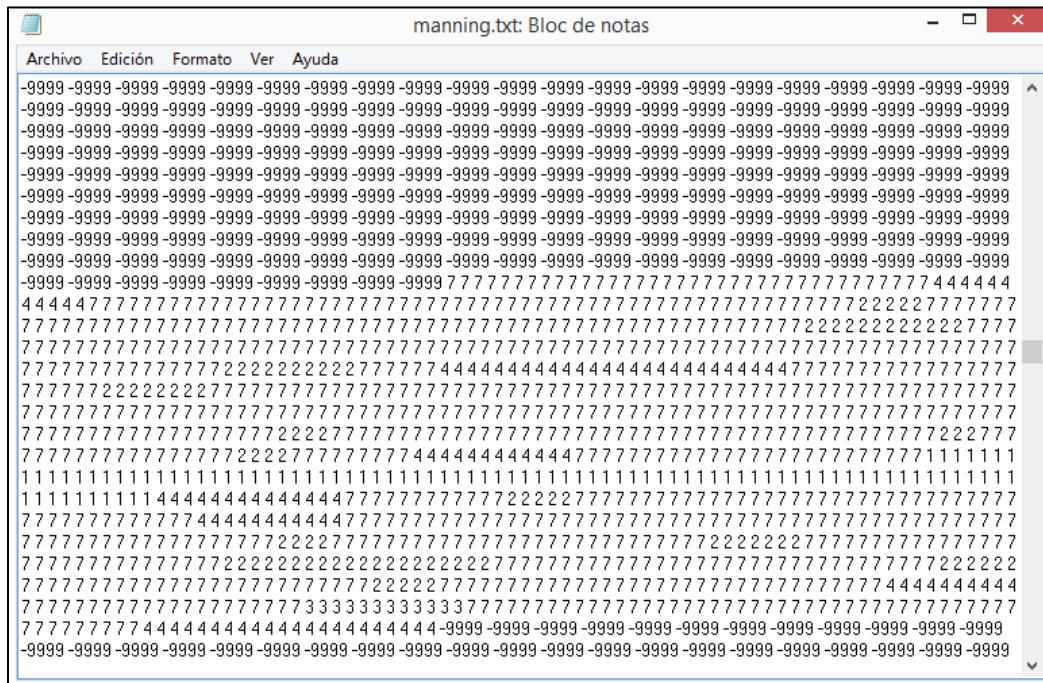


Figura 51 Fragmento del archivo ASCII Grid para asignación automática de la rugosidad (elaboración propia).

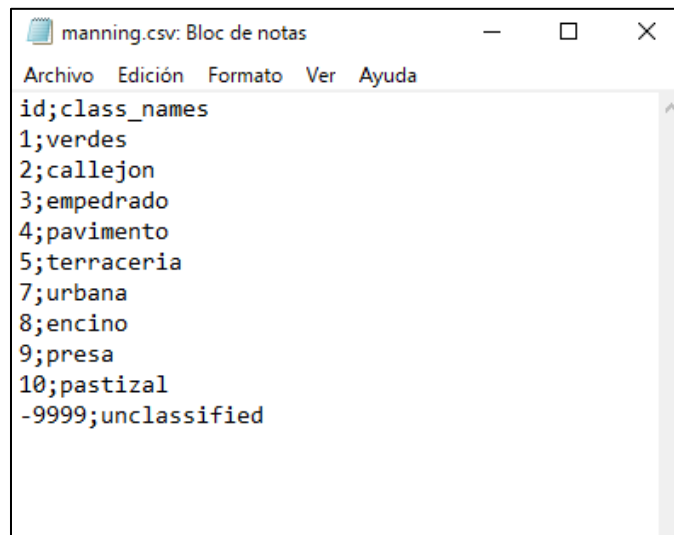


Figura 52 Archivo .csv para asignación automática de la rugosidad (elaboración propia).

Iber® lee el archivo ASCII Grid y el archivo CSV y genera la asignación automática de la rugosidad sobre cada elemento de la malla, de manera que los resultados obtenidos se muestran en la Figura 53.

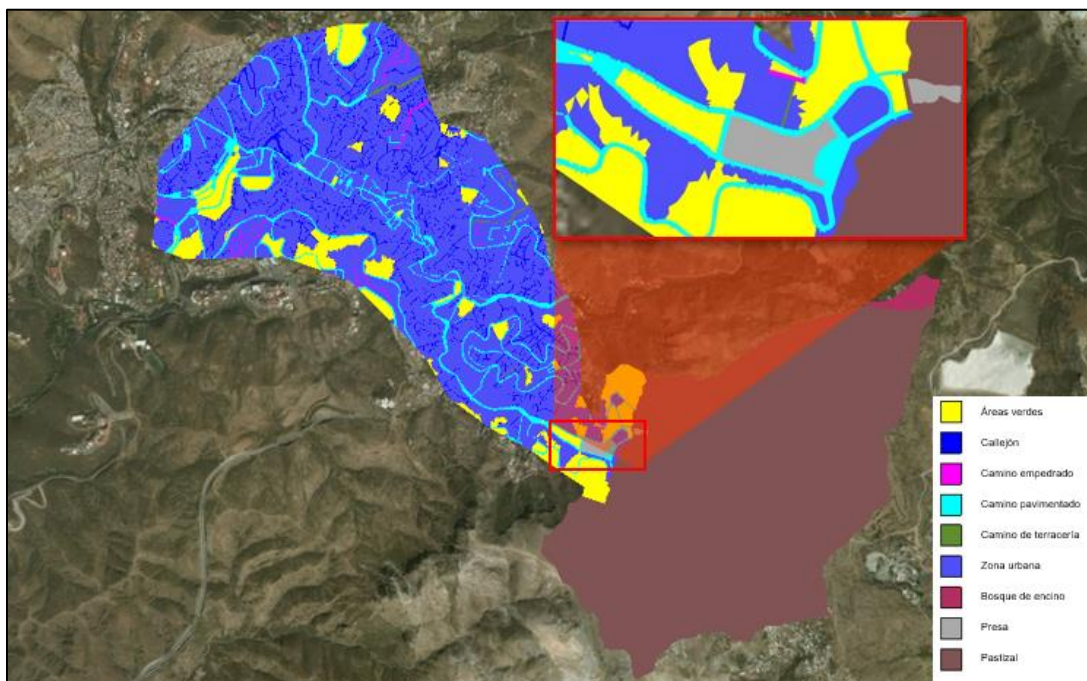


Figura 53 Valores de rugosidad asignados a la cuenca de estudio (elaboración propia).

#### 4.2.9 Asignación de elevaciones a la malla

Iber® permite definir las elevaciones para la malla mediante dos opciones: asignar elevación desde archivo, o asignar elevación constante. La opción asignar elevación constante es útil si se pretende decidir la elevación a asignar a cada elemento de la malla. La opción asignar elevación desde archivo fue la que se utilizó para el proyecto; se puede acceder a ésta en el menú “Herramientas Iber”, opción “Malla”, opción “Editar”, esto abrirá una ventana para selección del archivo en diferentes tipos de formato como puede observarse en la Figura 54.

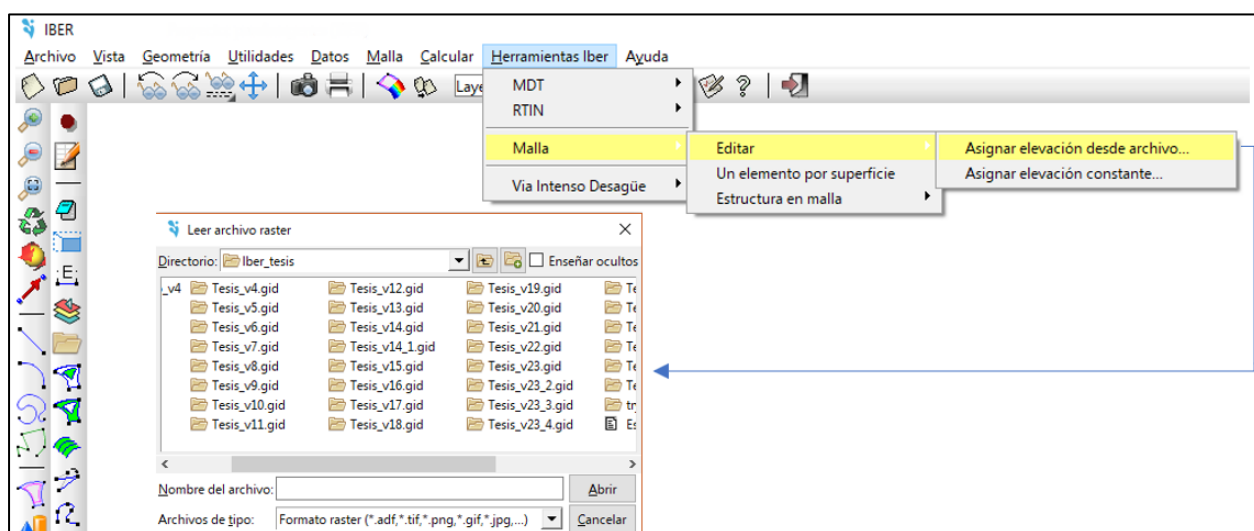


Figura 54 Proceso para asignar elevación desde archivo en Iber® (elaboración propia).

Para el proyecto se asignaron las elevaciones desde los archivos de los Modelos Digitales de Elevación que fueron señalados en el apartado “Modelo Digital de Elevación” (la información LiDAR obtenida de INEGI, los datos de las localidades amanzanadas y las batimetrías de la presa de la Olla y presa de San Renovato). Además, se hicieron algunas modificaciones para calibrar el modelo, pues se observó que las batimetrías no permitían suficiente claridad en la delimitación de las presas, lo cual es muy necesario sobre todo para el modelo de rompimiento. En la Figura 55 se observa la presa de la Olla con las delimitaciones y en una vista a tercera dimensión.



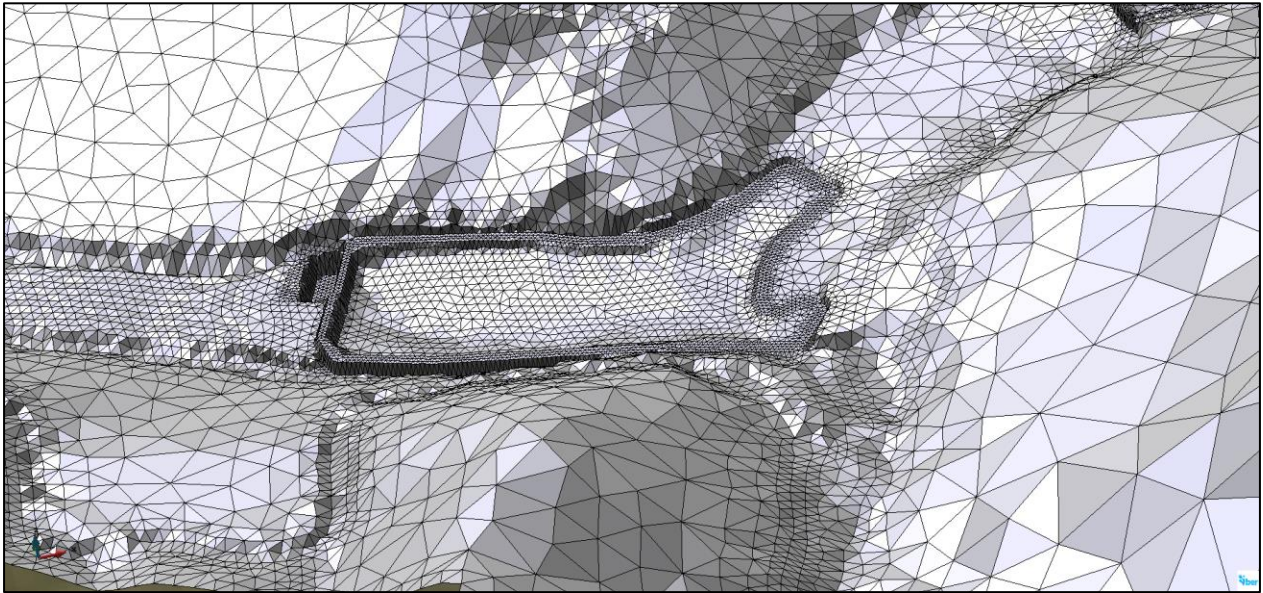


Figura 55 Detalles de la malla de la presa de la Olla al asignar las elevaciones (elaboración propia).

#### 4.2.10 Hietograma

Un hietograma es un diagrama de barras que presenta las variaciones de intensidad de lluvia (mm/h) respecto al tiempo (segundos).

En el apartado Análisis de los datos de precipitación se hizo el análisis de los datos de precipitación del evento histórico (junio 2018) y de la lluvia de diseño. Por lo que se asignaron distintos hietogramas a cada modelo. A los modelos de rompimiento de la presa no se les asignó ningún hietograma.

En Iber<sup>®</sup> se definen primero los hietogramas a utilizar y posteriormente se asignan estos a las superficies de la malla que se verán afectadas por el hietograma. Para la definición de hietogramas se accede desde el menú “Datos”, opción “Procesos hidrológicos”, como se observa en la Figura 56; este procedimiento abrirá una ventana como la de la Figura 57 en la que se le asigna un nombre al hietograma y se van agregando los datos de precipitación (tiempo e intensidad), además puede observarse el hietograma generado con los datos que se han ingresado.

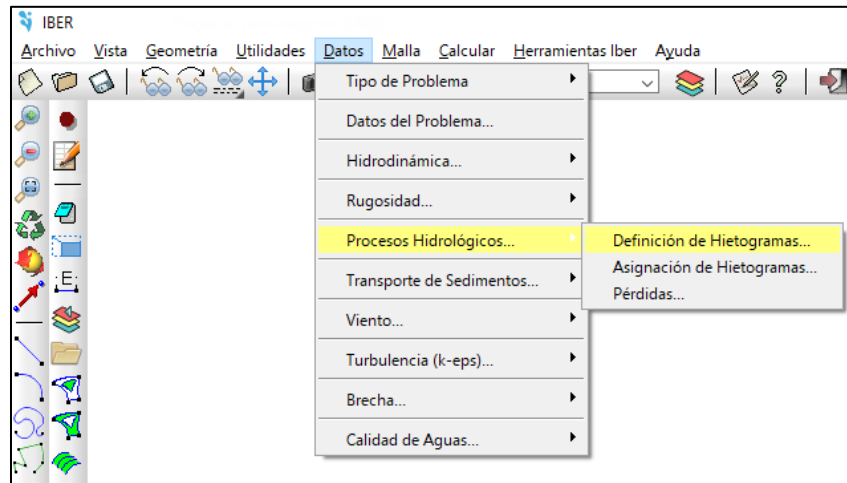


Figura 56 Proceso para definición de hietogramas en Iber® (elaboración propia).

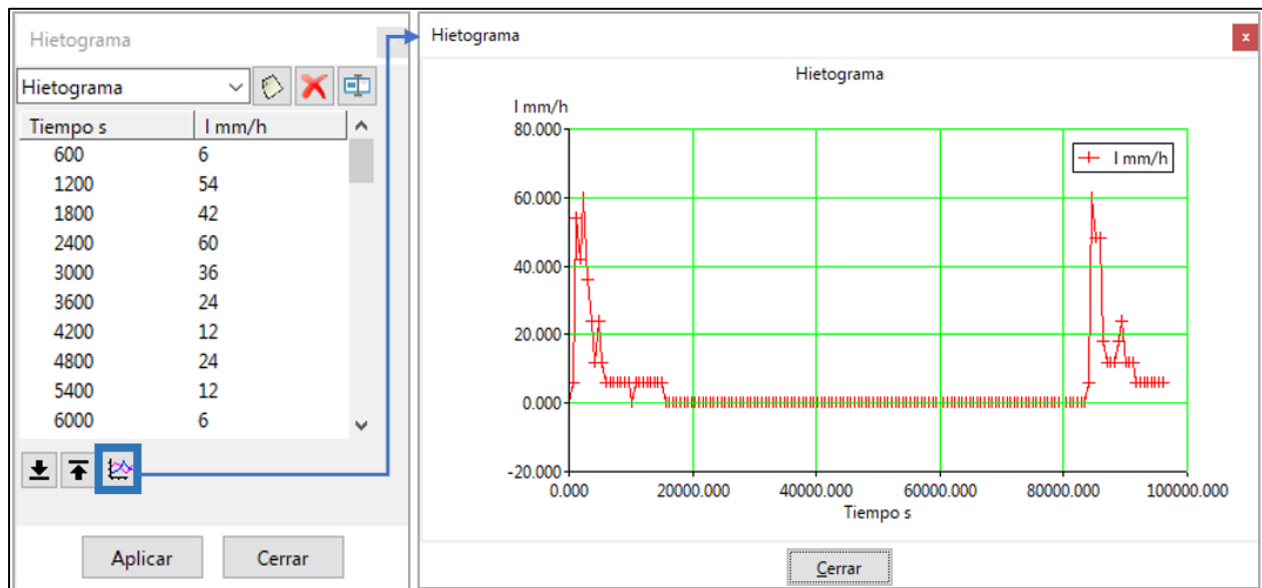


Figura 57 Datos de hietogramas en Iber® (elaboración propia).

#### 4.2.11 Trazo de alcantarilla

Los primeros modelos que se realizaron se hicieron sin tomar en cuenta la calle subterránea Miguel Hidalgo, lo que hacía que en la zona centro de la ciudad los resultados estuvieran algo alejados de los que se esperaban acorde a la información obtenida de fotos y videos. Por ese motivo se trabajó en la modelación de dicha calle, se consideró que una manera de aproximar los resultados sería agregando una alcantarilla con las características de la calle al modelo.

Para agregar una alcantarilla al modelo en Iber® se hace desde el menú “Datos”, opción “Hidrodinámica”, opción “Estructuras”. Esto abrirá una nueva ventana donde deberán ingresarse las coordenadas de inicio y fin de la alcantarilla, el coeficiente de Manning acorde al material de la tubería (en este caso se estableció 0.025 por la mampostería de la calle subterránea); y el tipo de alcantarilla, que puede ser circular (en cuyo caso se requerirá de un diámetro) o rectangular (se requerirá los valores de ancho y altura). Este procedimiento se visualiza en la Figura 58.

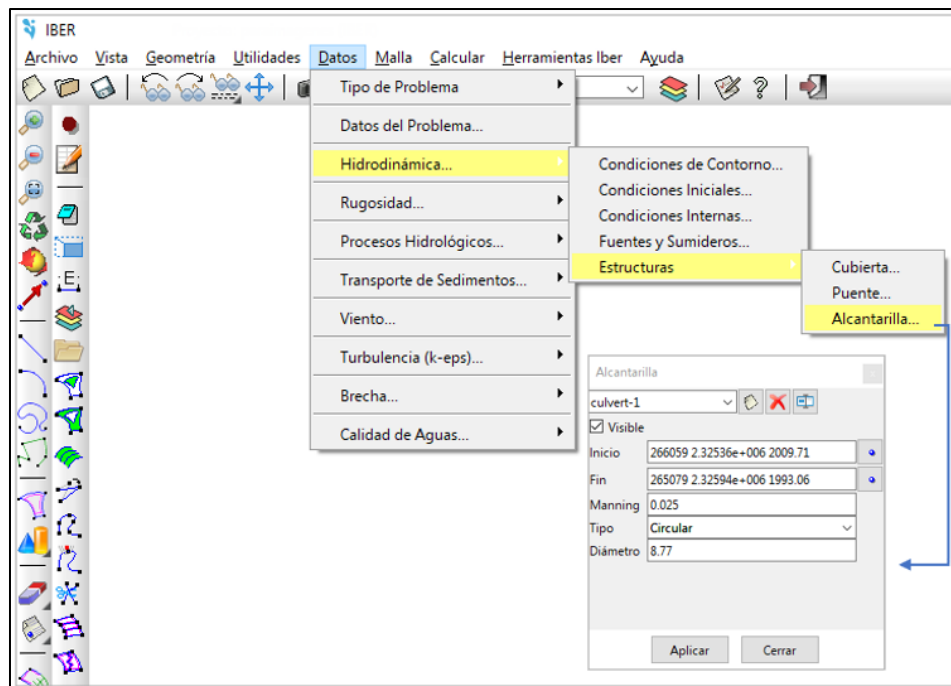


Figura 58 Proceso de trazo de alcantarilla en Iber® (elaboración propia).

#### 4.2.12 Formación de la brecha

Para los modelos de rotura de la presa de la Olla se utilizó una brecha, la cual permite establecer parámetros para definir la forma de la rotura y el tiempo que tardará en romperse.

La brecha puede añadirse en Iber® desde el menú “Datos”, opción “Brecha...” como se muestra en la Figura 59, lo que abrirá una ventana nueva en la que deberán ingresarse las coordenadas de inicio y fin, el tipo de brecha, que puede ser Trapezoidal o de acuerdo con la Guía Técnica Española. Si se elige la opción trapezoidal Iber® solicitará el valor de la cota o tiempo de inicio, la cota de la cresta, la cota de fondo, el ancho de fondo y el tiempo de rotura. Si se elige la opción de la Guía Técnica Española deberán ingresarse valores para la cota o tiempo de inicio, la cota de la cresta, la cota de fondo y el volumen del embalse en  $\text{Hm}^3$ .

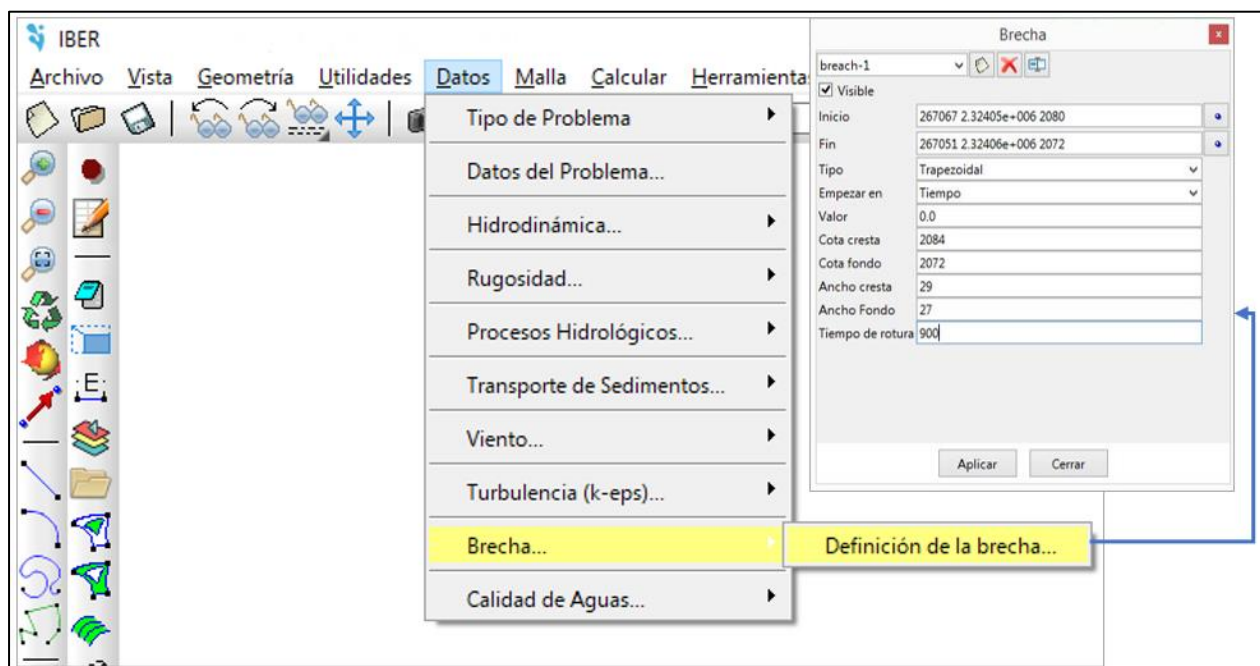


Figura 59 Proceso para la definición de la brecha en Iber® (elaboración propia).

Para asignar el valor a cada parámetro se consideró la información de la Guía Técnica de Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial (Madrid, 1996) donde se especifican las recomendaciones respecto al modo y tiempo de rotura. Para presas de gravedad y contrafuertes el tiempo de rotura señalado por la Guía Técnica es de 10 a 15 minutos, la forma de rotura es rectangular, siendo la profundidad de la brecha hasta el contacto con el cauce y el ancho el mayor de los dos valores siguientes: 1/3 de la longitud de coronación o 3 bloques de construcción.

#### 4.2.13 Características de la simulación

En la pestaña “Datos del problema” se asigna la información referente a la simulación, tales como el tiempo de inicio de la simulación, el tiempo máximo y el intervalo de los resultados. Para el modelo de desbordamiento se asignó como tiempo de simulación 108,000 segundos (30 horas) con un intervalo de 1,200 segundos (20 minutos) como se muestra en la Figura 60.

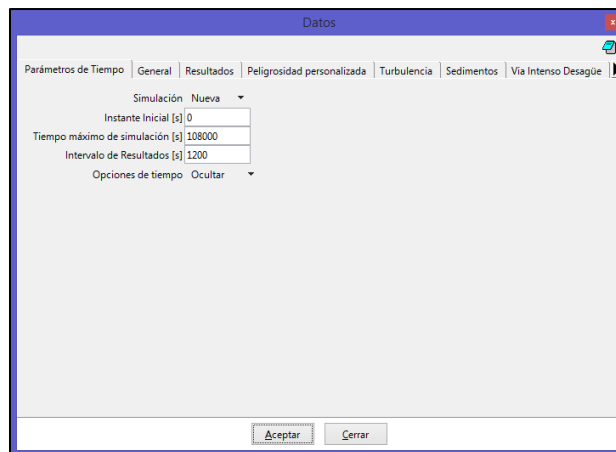


Figura 60 Ventana "Datos del problema" en Iber® (elaboración propia).

Para el modelo de rompimiento de la presa el tiempo de simulación fue de 32 400 segundos (9 horas), con un intervalo de resultados de 300 segundos. Es importante, en la pestaña “Brecha” (Figura 61) habilitar la formación de la brecha, de no ser así el modelo no tomará en cuenta la brecha que se ha creado.

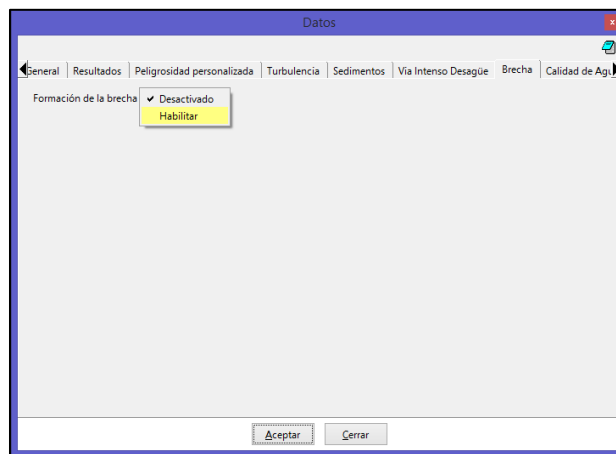


Figura 61 Habilitar la formación de la brecha (elaboración propia).

### 4.3 Definición de escenarios

Para el desarrollo del proyecto se trabajaron 4 escenarios de los cuales se irán definiendo sus objetivos, características de la simulación y los resultados que se obtuvieron en el apartado 5. En la Figura 62 se señalan los escenarios y sus características básicas que definen a cada uno.



Figura 62 Escenarios que se trabajaron en el proyecto (elaboración propia).



## 5. RESULTADOS

### 5.1 Escenario 1

Para el primer escenario se utilizaron los datos de precipitación del evento de junio 2018, el objetivo de este modelo es obtener resultados que puedan ser validados con las alturas de las placas de la inundación del año 1905 (Comparación con eventos históricos) para verificar la utilidad del modelo y hacer ajustes para calibrarlo. Las principales características de este modelo se enlistan a continuación

#### 5.1.1 Características de la simulación

##### Tamaños de malla

Se asignaron tamaños a las superficies con valores más pequeños en ciertas zonas con la finalidad de obtener mayor claridad y precisión en los resultados. Los tamaños de malla utilizados son para la cuenca de aportación 40 m, para las manzanas 20 m, para las calles 10 m, para los embalses y la zona más próxima aguas abajo de la presa de la Olla 5 m, y para el borde y cortina de ambas presas 2 m. Los tamaños de malla para el escenario 1 pueden observarse en la Figura 63.

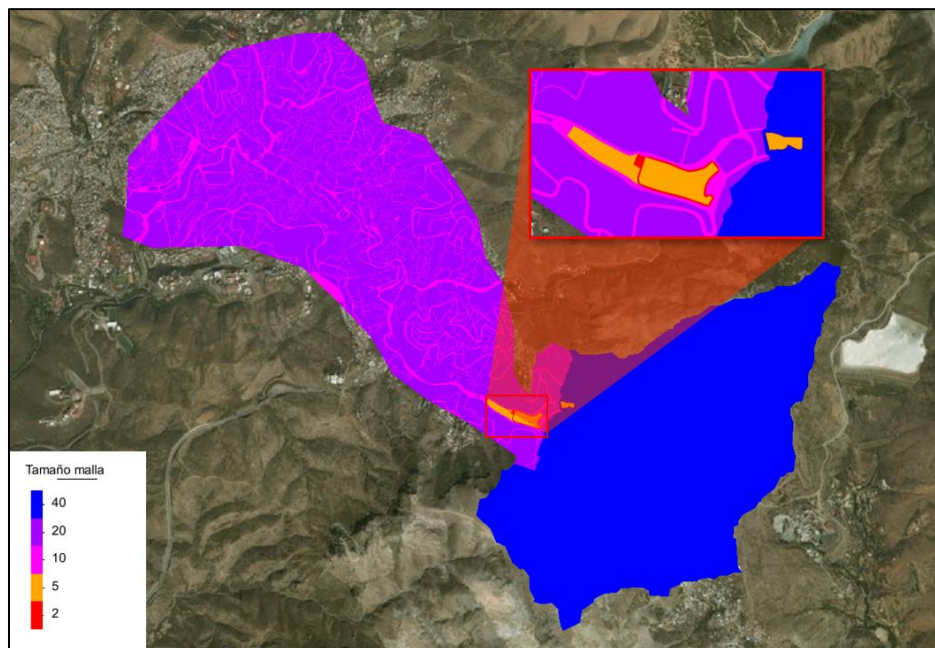


Figura 63 Tamaños de malla asignados para el escenario 1 (elaboración propia).



### *Hietograma de junio 2018*

El hietograma asignado al modelo fue el descrito en el apartado “Precipitación del desbordamiento de la presa (13 y 14 de junio de 2018)” y se observa como en la Figura 64, la altura de lluvia total asignada al modelo es de 117mm en un tiempo de 26 horas y 40 minutos.

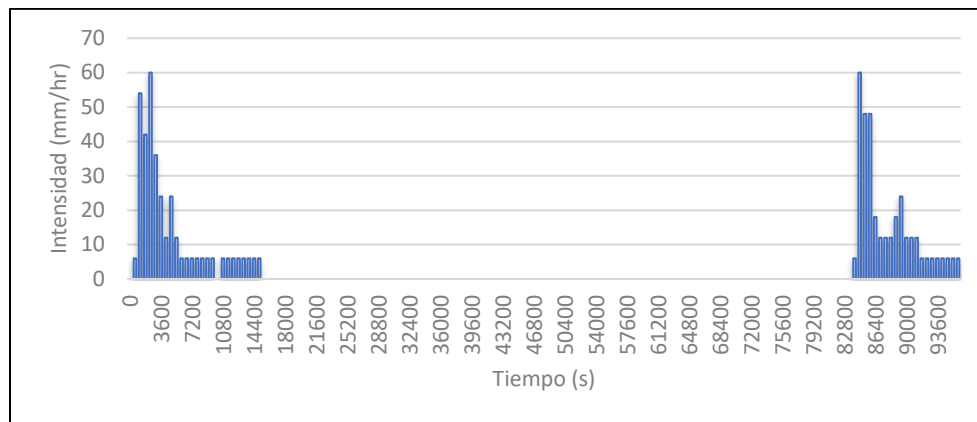


Figura 64 Hietograma del evento de junio 2018 (elaboración propia).

### *Elevaciones*

Los tamaños de malla más pequeños en la zona de la presa permiten una mayor claridad en el DEM donde se realizaron algunos ajustes basados en el DEM de INEGI y las batimetrías proporcionadas por la CEAG. En la Figura 65 se muestra la diferencia entre el DEM antes de los ajustes y el DEM utilizado para el escenario 1 en la zona de la presa de la Olla y San Renovato.

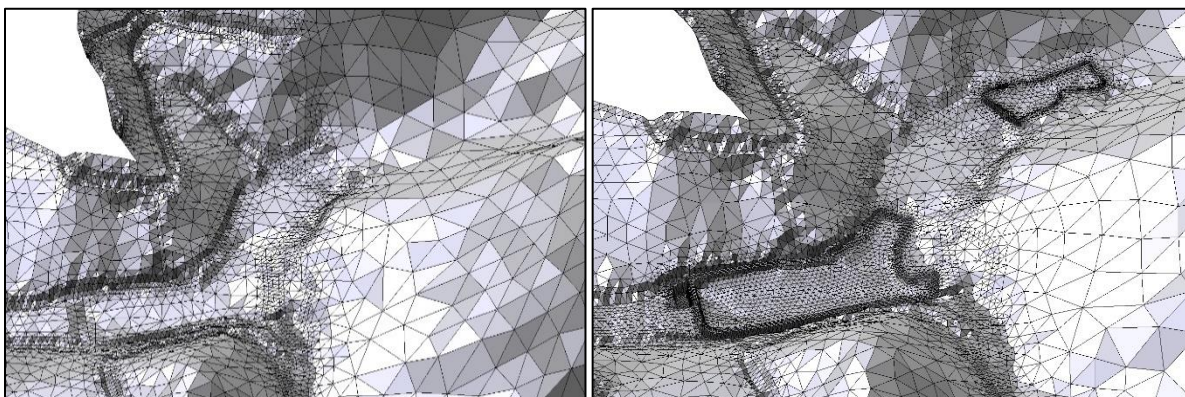


Figura 65 Vista de la malla con elevaciones antes de los ajustes (izquierda) y del escenario 1 (derecha) (elaboración propia).

### 5.1.2 Resultados

El análisis de los resultados consta de mapas de máximos tirantes, velocidades y caudales, hidrogramas en tres secciones de control y análisis de las velocidades y tirantes máximos en cinco lugares específicos.

#### Mapas de máximos

En el postproceso de Iber® se pueden observar los mapas de tirantes, velocidades y gastos máximos, los cuales se muestran en la Figura 67, Figura 68 y Figura 69 respectivamente. Estos mapas señalan los máximos presentados en toda la simulación y tienen un acercamiento a la zona de la presa de la Olla.

Como referencia, se muestra en el mapa de la Figura 66 las calles y lugares principales por los que fluye el agua en los modelos.

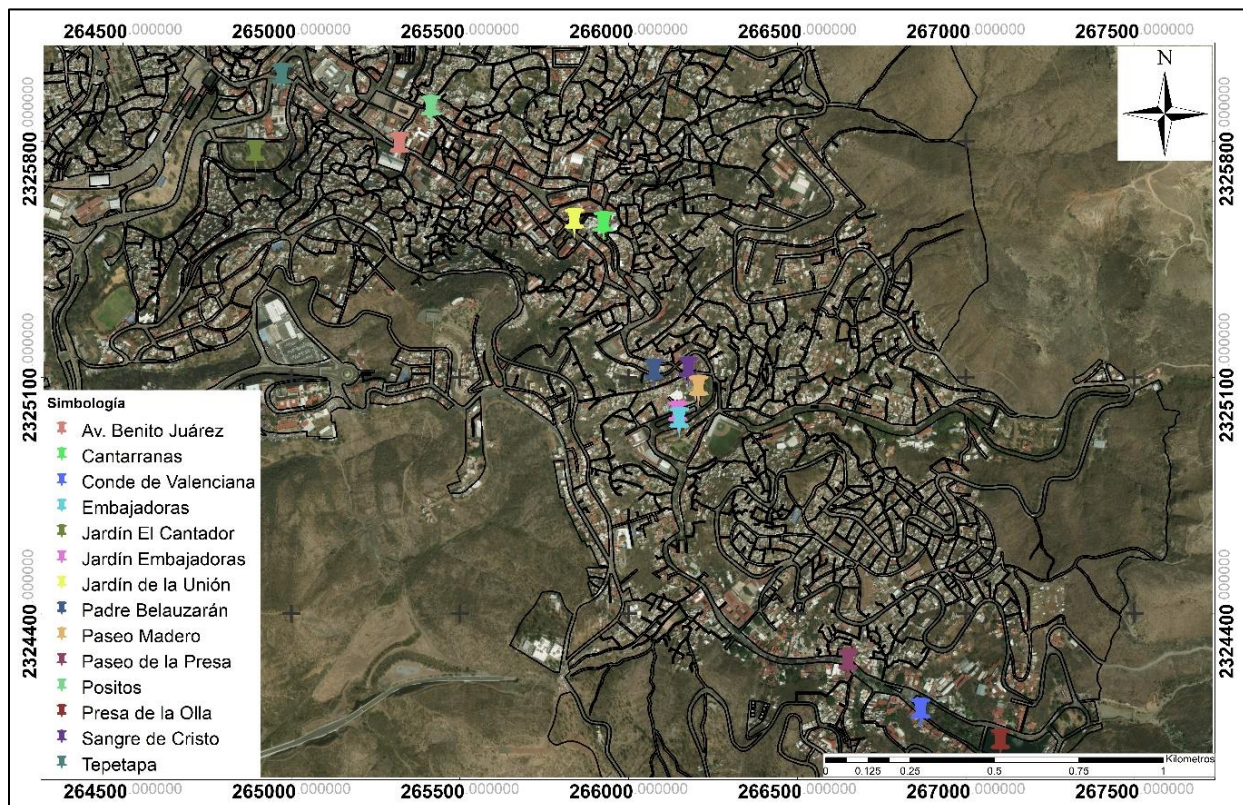


Figura 66 Calles y lugares principales en Guanajuato (elaboración propia).



El mapa de tirantes máximos (Figura 67) muestra que el tirante máximo se presenta en la Avenida Benito Juárez y llega a ser hasta de 8.85 metros frente al mercado Hidalgo y de hasta 6.9 metros en la Plaza de la Paz

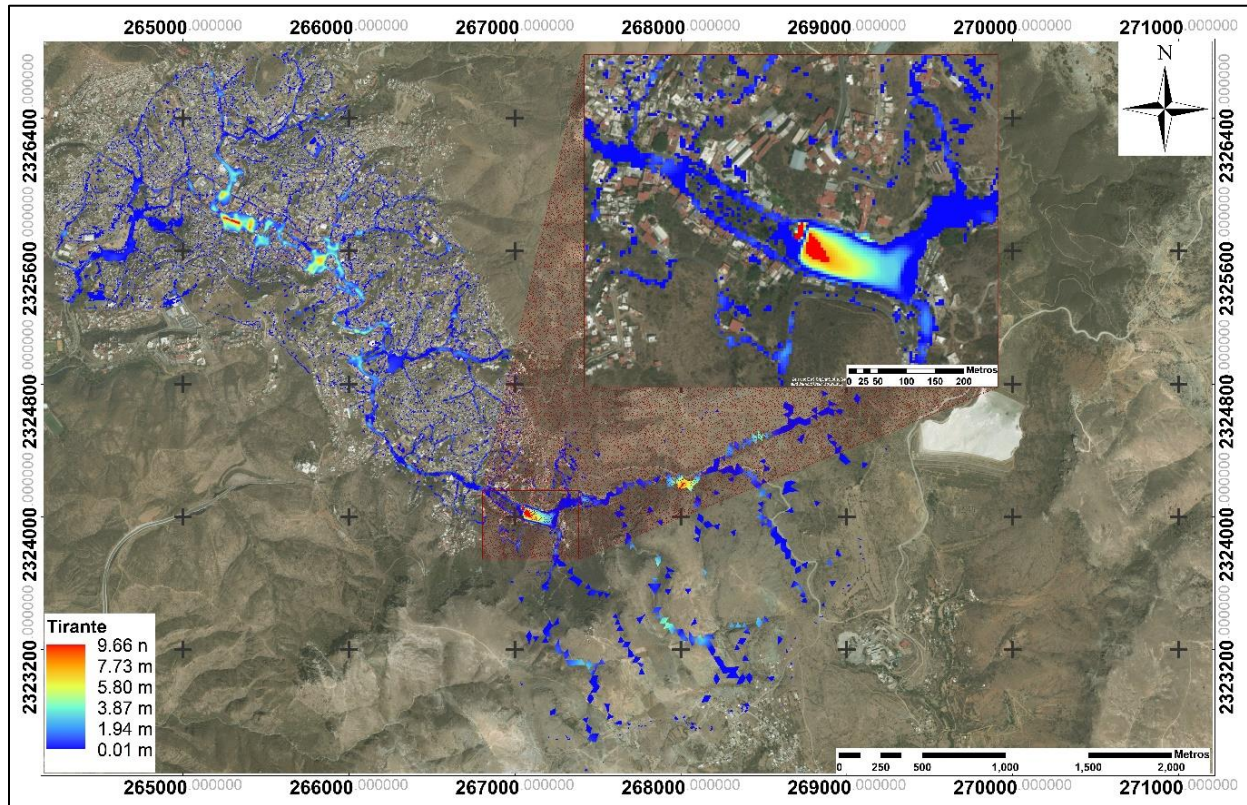


Figura 67 Tirantes máximos para el escenario 1 (elaboración propia).

En el mapa de velocidades máximas (Figura 68) se observa que en la cuenca de aportación es el cauce principal el que lleva una mayor velocidad siendo la máxima velocidad de 1.86 m/s; saliendo de la presa la velocidad aumenta hasta 4.36 m/s y es hasta después de la calle Paseo de la Presa que las velocidades comienzan a disminuir.

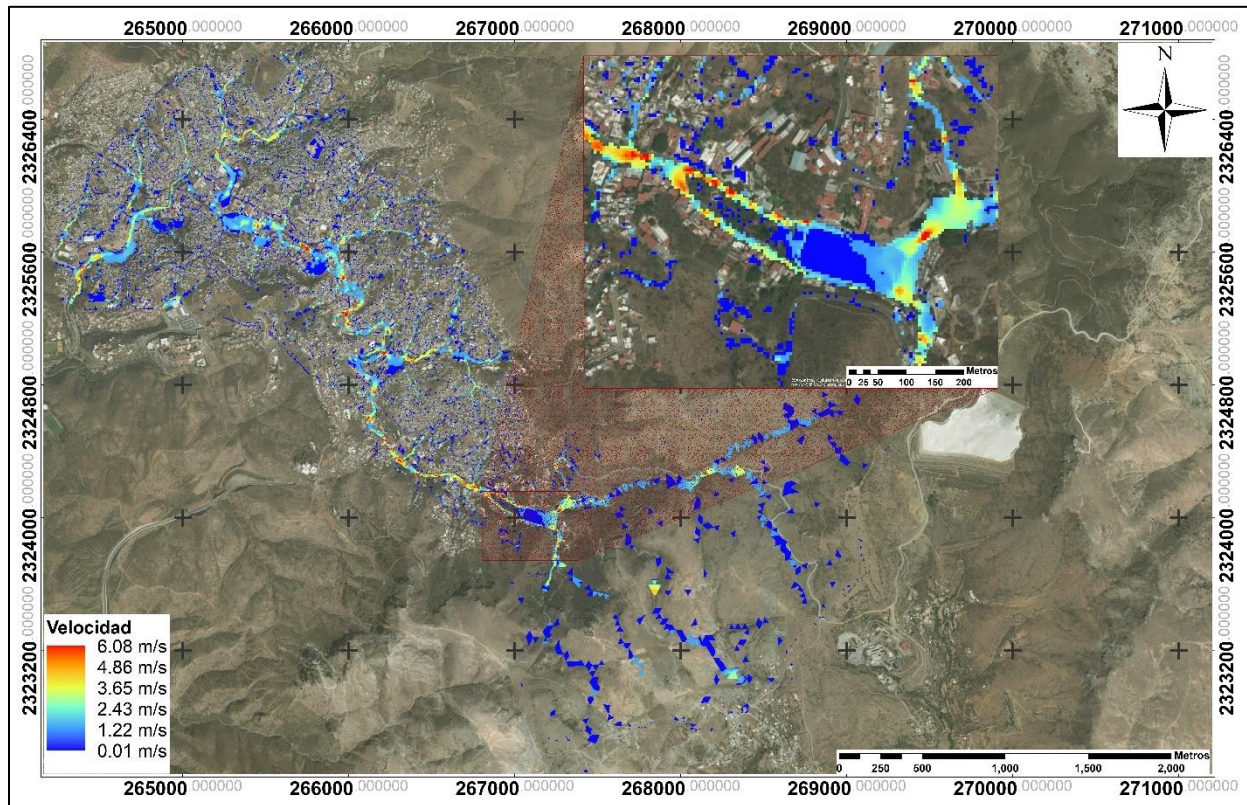


Figura 68 Velocidades máximas para el escenario 1 (elaboración propia).

El mapa de caudales máximos que se muestra en la Figura 69 muestra que el caudal máximo que se presenta en este escenario es de  $3.11 \text{ m}^3/\text{s}$  en el vertedor de la presa de la Olla, en la Avenida Juárez también se observan caudales altos de  $2.18 \text{ m}^3/\text{s}$  en la calle Cantarranas y de  $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$  donde termina la calle Sangre de Cristo y comienza la calle Miguel Hidalgo.



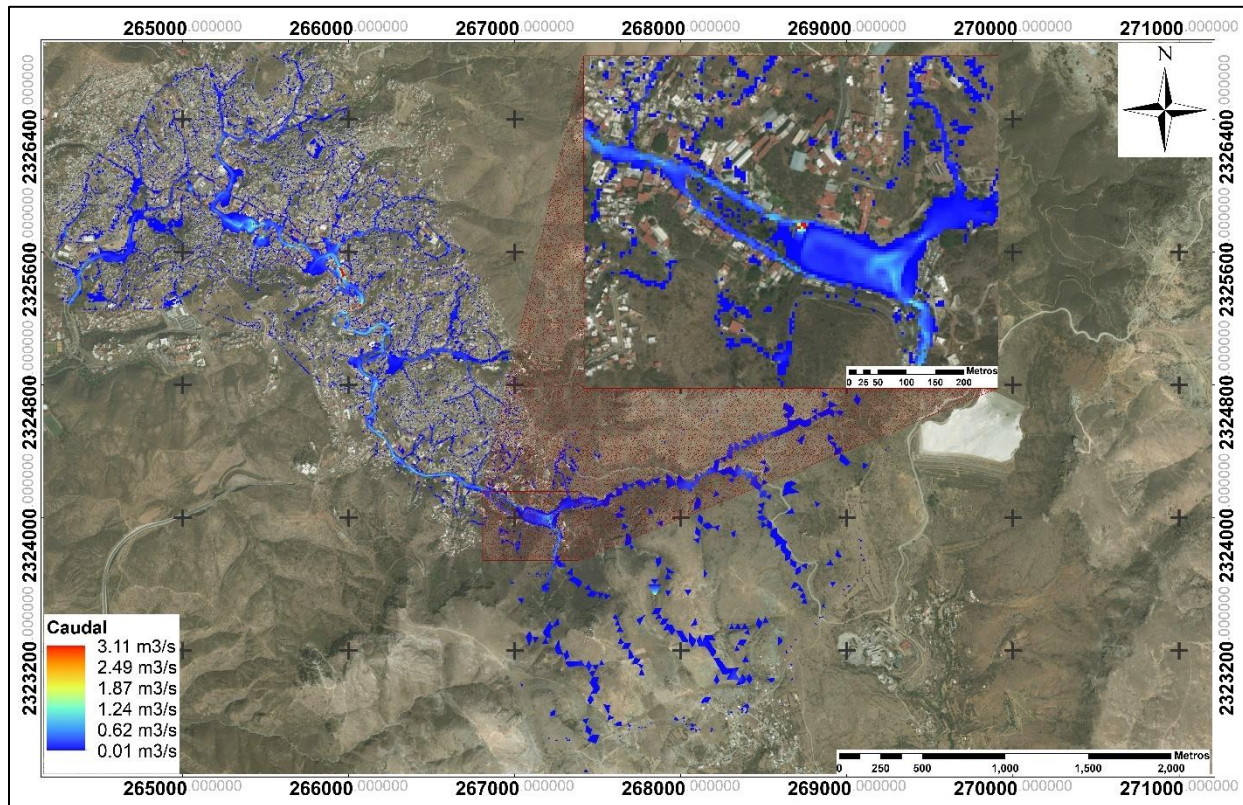


Figura 69 Caudales máximos para el escenario 1 (elaboración propia).

Secciones de control

Se eligieron tres puntos para trazar secciones de control para el aforo de los gastos de escurrimiento, la ubicación de éstos se señala en la Tabla 33 y en el mapa de la Figura 70. Los hidrogramas obtenidos se muestran en la Figura 71 donde se observan las variaciones del gasto de escurrimiento y el gasto pico en cada calle.

Tabla 33 Ubicación de las secciones de control para el aforo de los gastos de escurrimiento (elaboración propia).

Sección de control	Ubicación	Coordenada punto medio de la sección	
		X	Y
1	Calle paseo de la presa y Conde de Valenciana, a la salida de la presa de la Olla.	267013.935306	2324040.92568
2	Calle Paseo de la presa, antes del túnel del Barretero.	266148.891591	2324680.88327
3	Plaza de la Paz.	265749.780857	2325622.97824

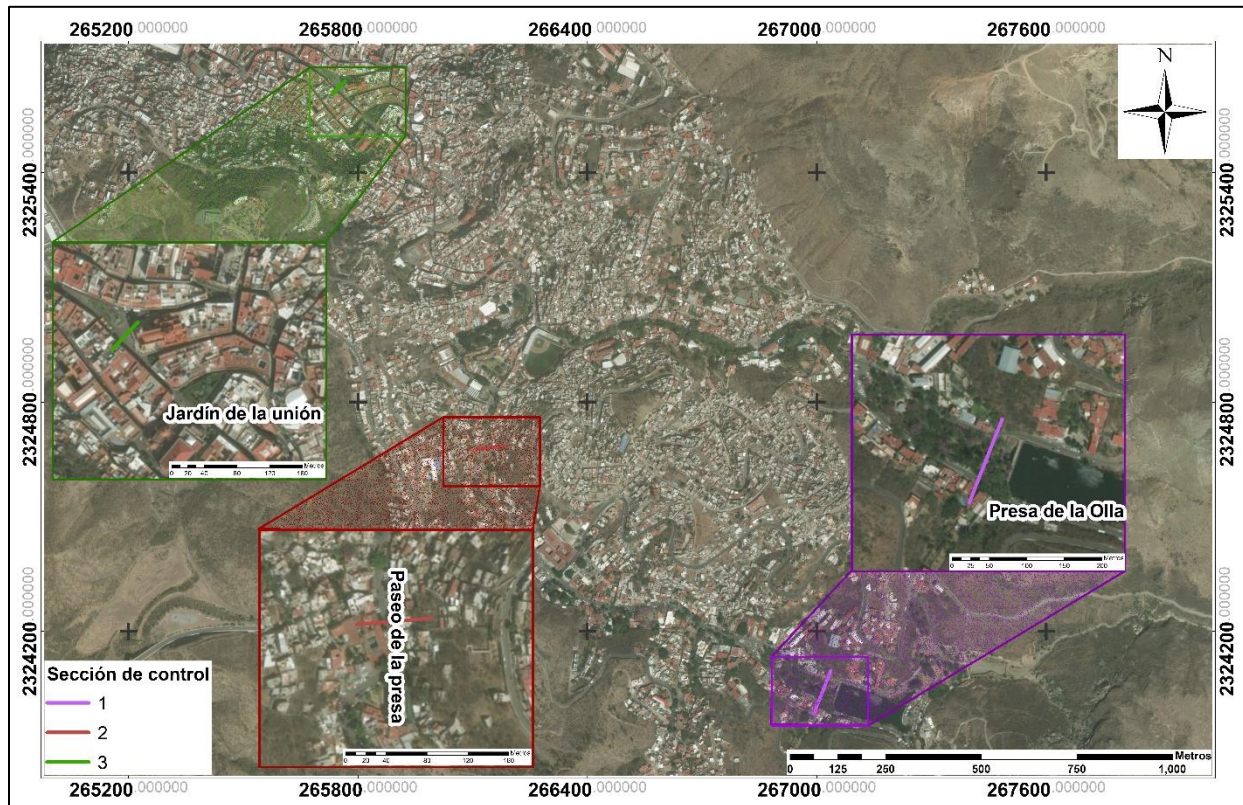


Figura 70 Localización de las secciones de control para el aforo de los gastos de escurrimiento (elaboración propia).

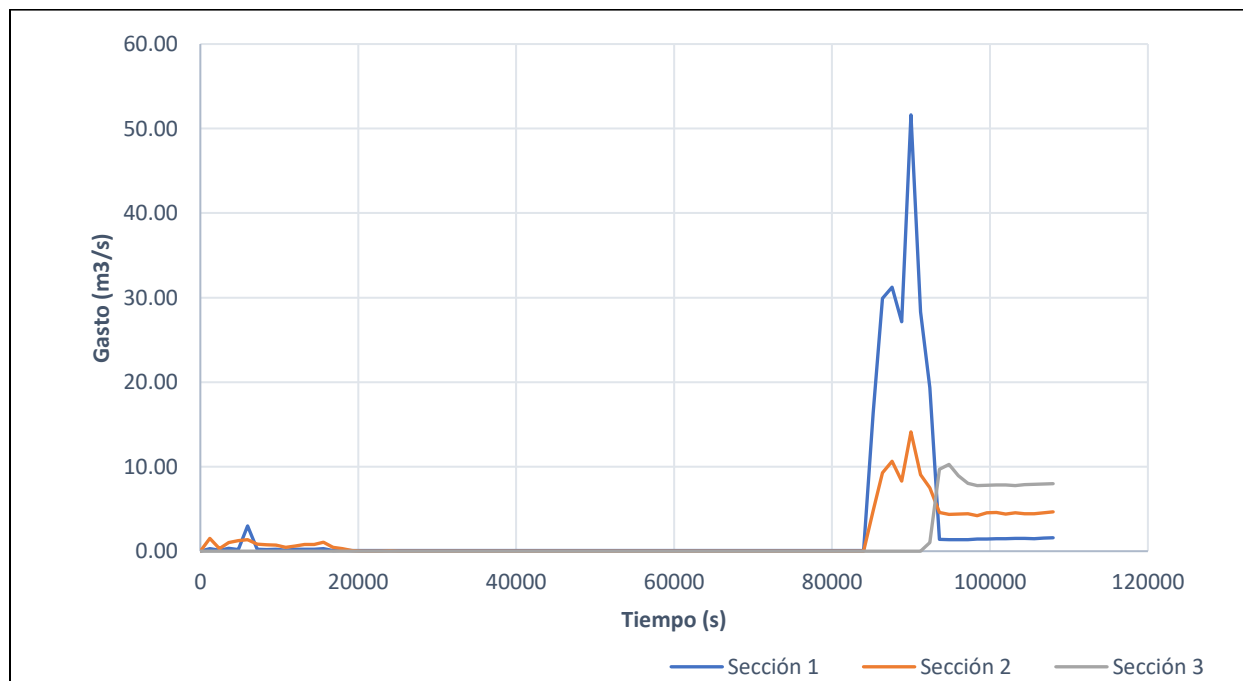


Figura 71 Hidrograma para el escenario 1 en las tres secciones de control (elaboración propia).

### Análisis en calles

A partir de los mapas de tirantes, velocidades y caudales máximos presentados anteriormente, se obtuvo un promedio de máximos en 3 calles y 2 jardines seleccionados. Este análisis se realiza de la misma manera y en los mismos lugares para todos los escenarios con el fin de poder hacer una comparación de los resultados. Los resultados para el escenario 1 se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34 Tirantes, velocidades y gastos máximos en lugares seleccionados para el escenario 1 (elaboración propia).

Lugar	Tirante máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /s)
<b>Calle Paseo de la Presa</b>	0.56	1.67	0.45
<b>Jardín Embajadoras</b>	1.07	0.79	0.24
<b>Calle Sangre de Cristo</b>	1.24	0.19	0.25
<b>Jardín de la unión</b>	4.99	0.43	0.40
<b>Avenida Juárez</b>	3.73	0.25	0.38

### Comparación con eventos históricos

“La calibración del modelo es el proceso mediante el cual los parámetros del modelo se ajustan hasta que se logra una coincidencia satisfactoria entre la respuesta del modelo y los datos históricos.” La calibración de este tipo de modelos aún no cuenta con mucho desarrollo, esto se debe en parte, a la falta de información histórica suficiente (en calidad y cantidad) porque los eventos de inundación no suelen ser monitoreados. Los parámetros con más influencia en la calibración son la geometría y la rugosidad, los cuales se ajustan para calibrar el modelo, generalmente mediante un proceso de prueba y error. (Fabio, Aronica, & Apel, 2009).

Para la calibración del modelo se cuenta con dos fuentes de información histórica, para el escenario 1 se utilizará información de la inundación de 1905. En la ciudad de Guanajuato se encuentran placas como la que se muestra en la Figura 72 que señalan el nivel al que llegó la inundación en el año 1905.



Se utilizaron los datos de las alturas de las placas en 7 puntos de la ciudad cuya ubicación se muestra en la Figura 73 y se compararon con los obtenidos en el modelo con el escenario 1. Los resultados de esta comparación se encuentran en la Tabla 35.



Figura 72 Placas de la inundación de 1905 (fuente propia).

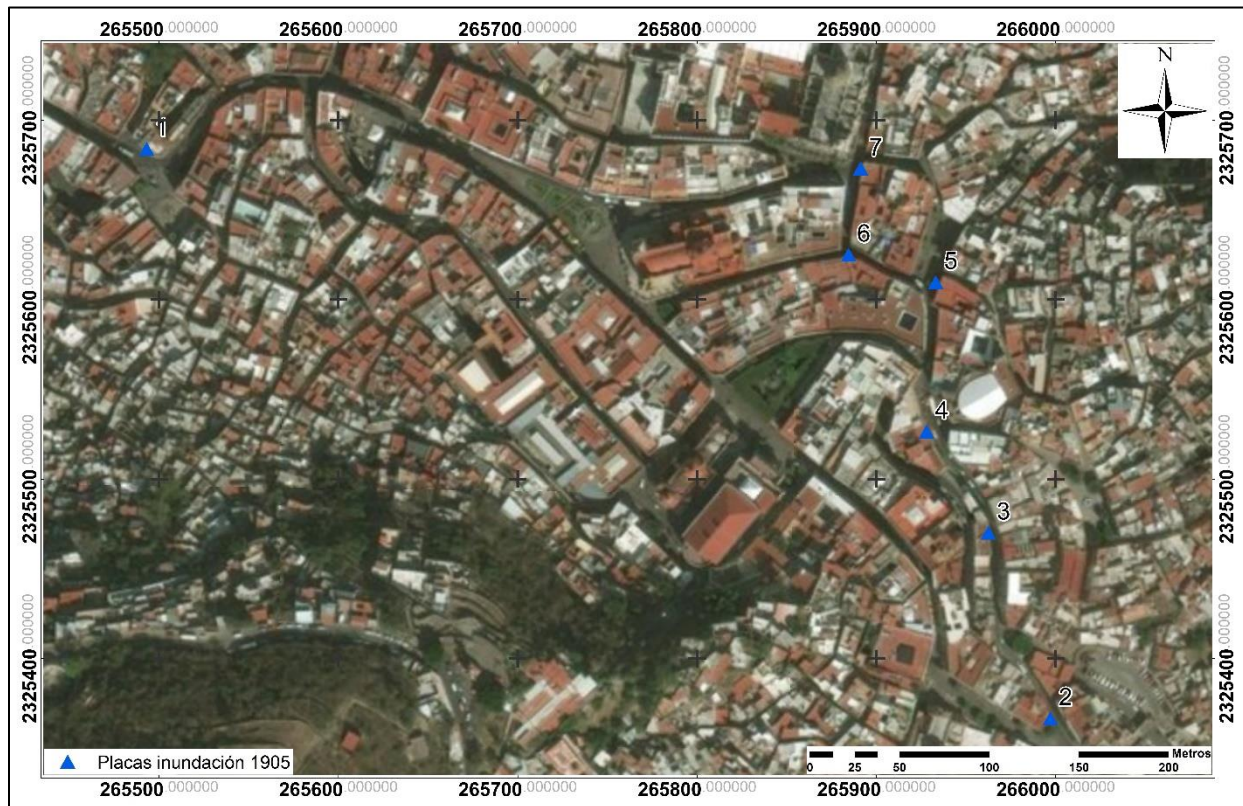


Figura 73 Ubicación de las placas de inundación de 1905 (elaboración propia).



Los resultados del escenario 1 difieren de los datos históricos de la inundación de 1905, registrados en 7 placas en un 14.54%, como se muestra en la Tabla 35, por lo que se considera que el modelo se encuentra calibrado. Algunas calles presentan diferencias en los tirantes, esto puede ser atribuible al cambio de uso de suelo (menor infiltración actual), y la falta de información hidrometeorológica de esas fechas.

Tabla 35 Comparación de tirantes del evento de 1905 y los resultados del escenario 1 (elaboración propia).

Punto	Tirante			
	1905 (m)	Modelo sin calle subterránea (m)	Similitud (%)	Diferencia (%)
1	2.24	2.61	85.82	14.18
2	1.95	2.17	89.86	10.14
3	3.21	3.43	93.59	6.41
4	3.33	2.83	84.98	15.02
5	3.47	2.96	85.30	14.70
6	3.49	5.38	64.87	35.13
7	2.1	1.97	93.81	6.19
		<b>Promedio =</b>	85.46	<b>14.54</b>

## 5.2 Escenario 2

Una vez analizados los resultados obtenidos del escenario 1 se hicieron algunos ajustes para mejorar los resultados y aproximarlos a los obtenidos en el evento de junio 2018. Se agregó una alcantarilla para simular la calle subterránea.

### 5.2.1 Características de la simulación

#### Calle subterránea

El modelo del escenario 1 tuvo buenos resultados al compararse con la inundación de 1905, sin embargo, distan mucho si se comparan con el evento de junio 2018. En gran parte estas diferencias se deben a que la calle subterránea Miguel Hidalgo fue construida en 1964 (59 años después de la inundación).

Para aproximar los resultados se añadió una alcantarilla con las características de la calle subterránea (coeficiente de Manning acorde al material de la calle (mampostería) y un diámetro de 8.77 metros).

### 5.2.2 Resultados

#### Mapas de máximos

En el postproceso de Iber® se pueden observar los mapas de tirantes, velocidades y caudales máximos, los cuales se muestran en la Figura 74, Figura 75 y Figura 76 respectivamente. Estos mapas, al igual que en el escenario 1, señalan los máximos presentados en toda la simulación y tienen un acercamiento a la zona de la presa de la Olla.

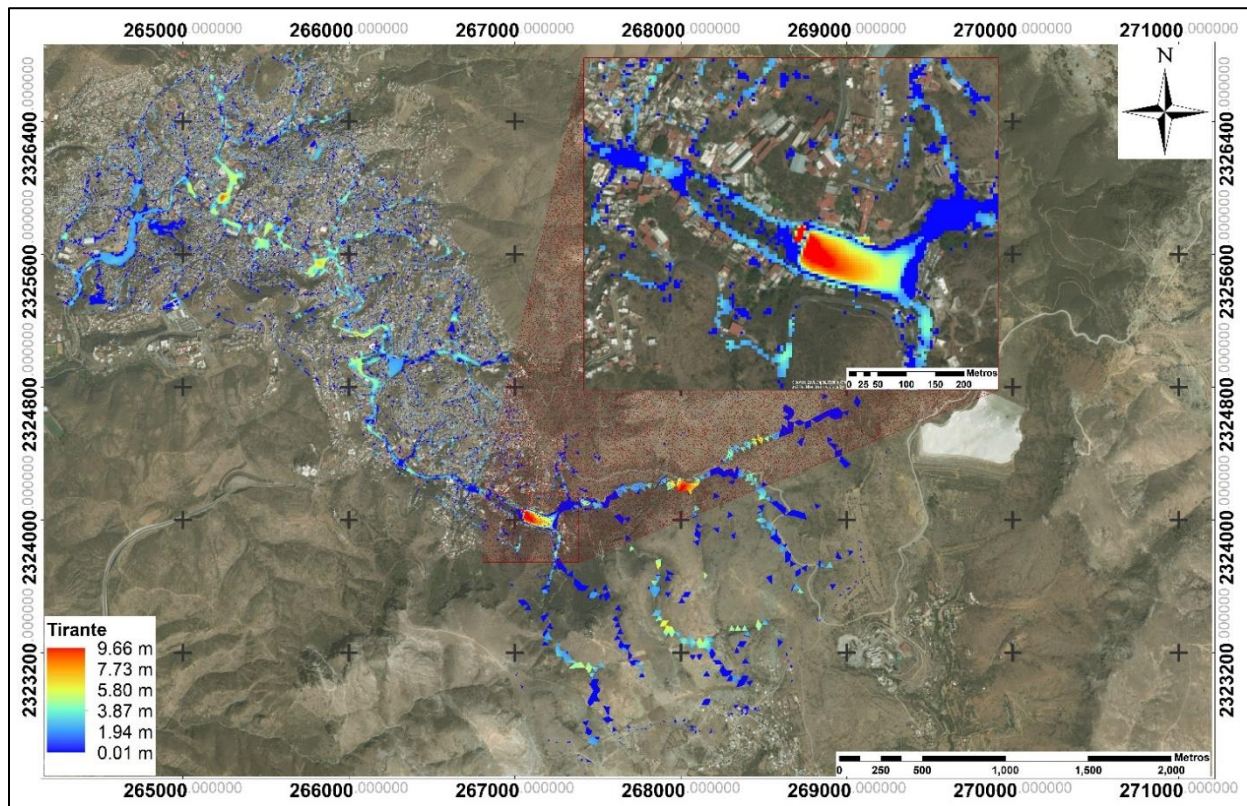


Figura 74 Tirantes máximos para el escenario 2 (elaboración propia).

El mapa de la Figura 74 señala los tirantes máximos presentados durante el modelo del escenario 2, al comparar los tirantes máximos del escenario 2 y del escenario 1 (Figura 67), éstos se redujeron considerablemente en la zona de la calle subterránea (con la adición de la alcantarilla).

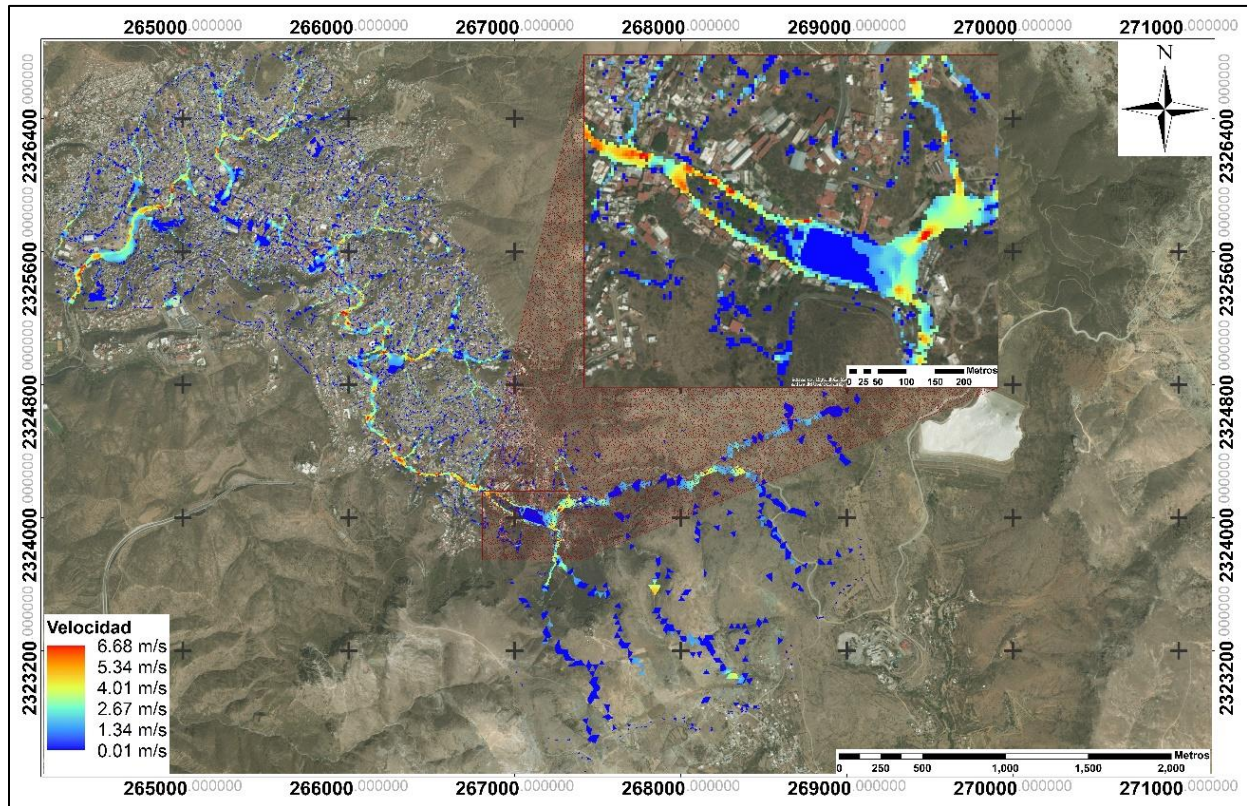


Figura 75 Velocidades máximas para el escenario 2 (elaboración propia).

El mapa de velocidades máximas de la Figura 75 se comparó con el del escenario 1, las velocidades en la zona en que se agregó la alcantarilla disminuyeron, en promedio 0.24 metros, siendo el máximo valor 5.72 metros. Respecto a los caudales que se muestran en el mapa de la Figura 76 se muestra una disminución promedio en la zona de la alcantarilla de  $0.35 \text{ m}^2/\text{s}$ , siendo el valor máximo  $2.39 \text{ m}^2/\text{s}$ . Por otra parte, en la zona donde termina la alcantarilla se muestran aumentos de velocidades y tirantes.

Los resultados del caudal que ingresa a la alcantarilla se muestran en la gráfica de la Figura 77.



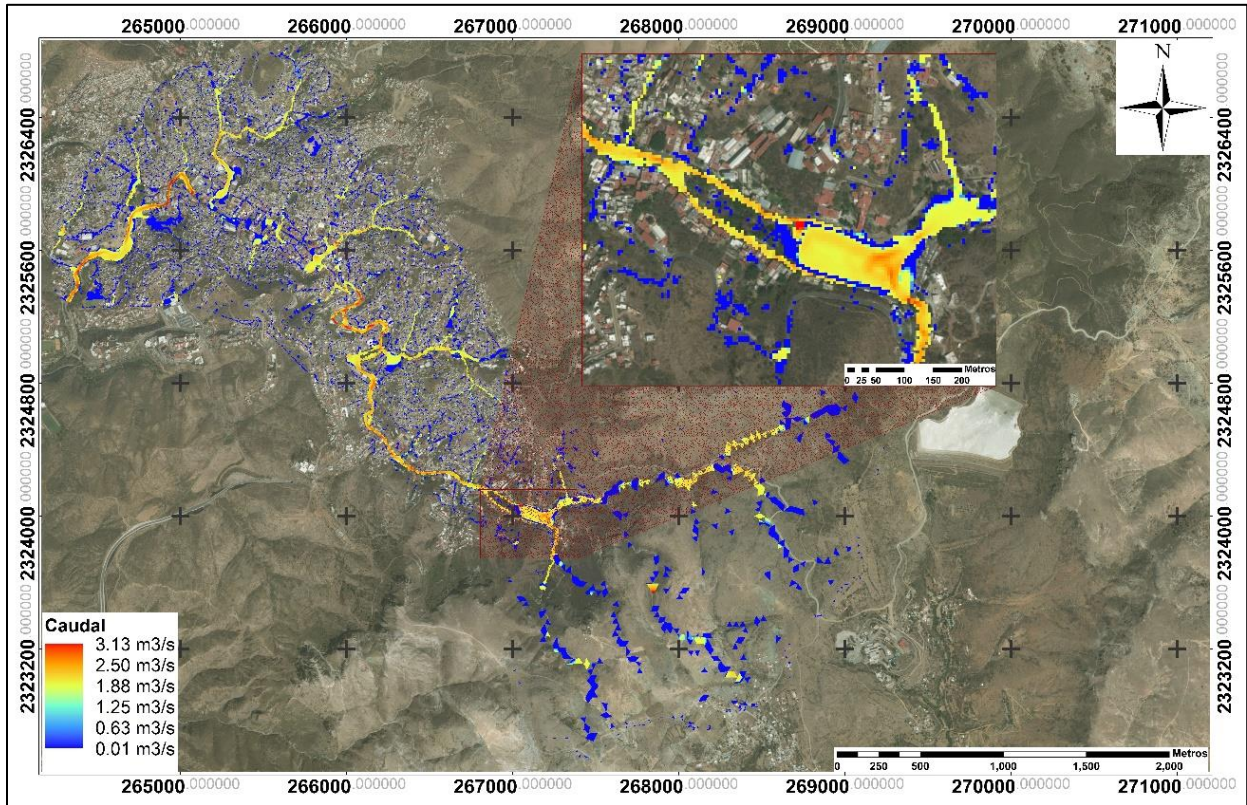


Figura 76 Caudales máximos para el escenario 2 (elaboración propia).

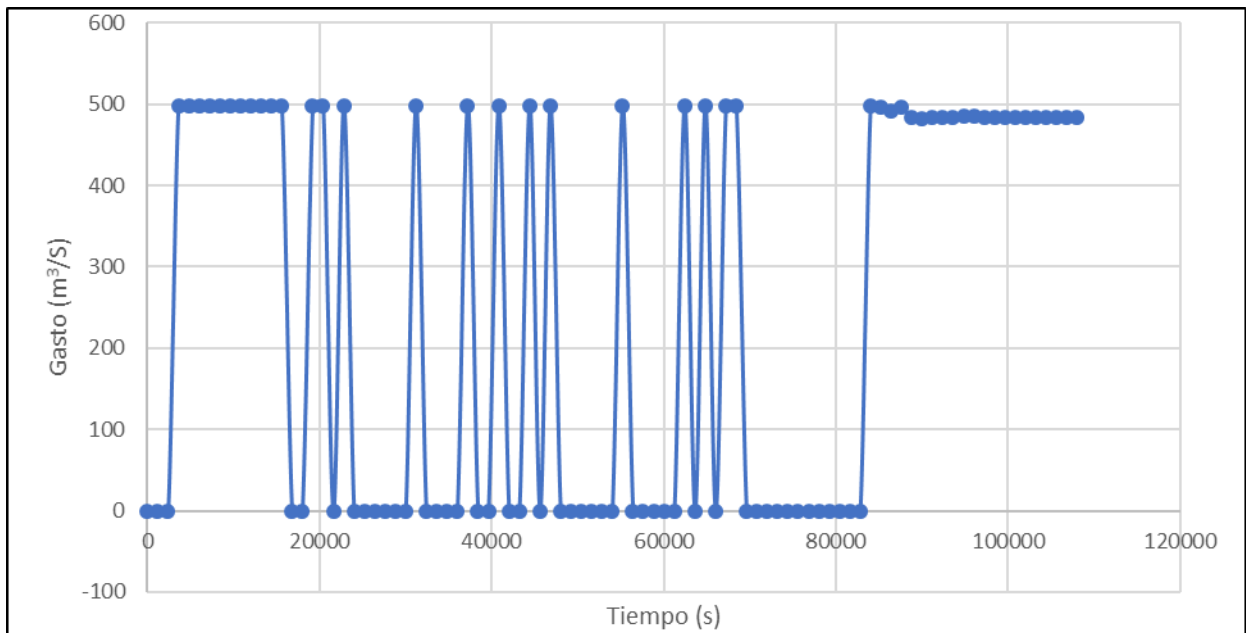


Figura 77 Gastos que ingresan a la alcantarilla (elaboración propia).

Secciones de control

Se generaron hidrogramas en los mismos puntos seleccionados para el escenario 1 (Figura 70), la Figura 78 muestra los hidrogramas en los tres puntos.

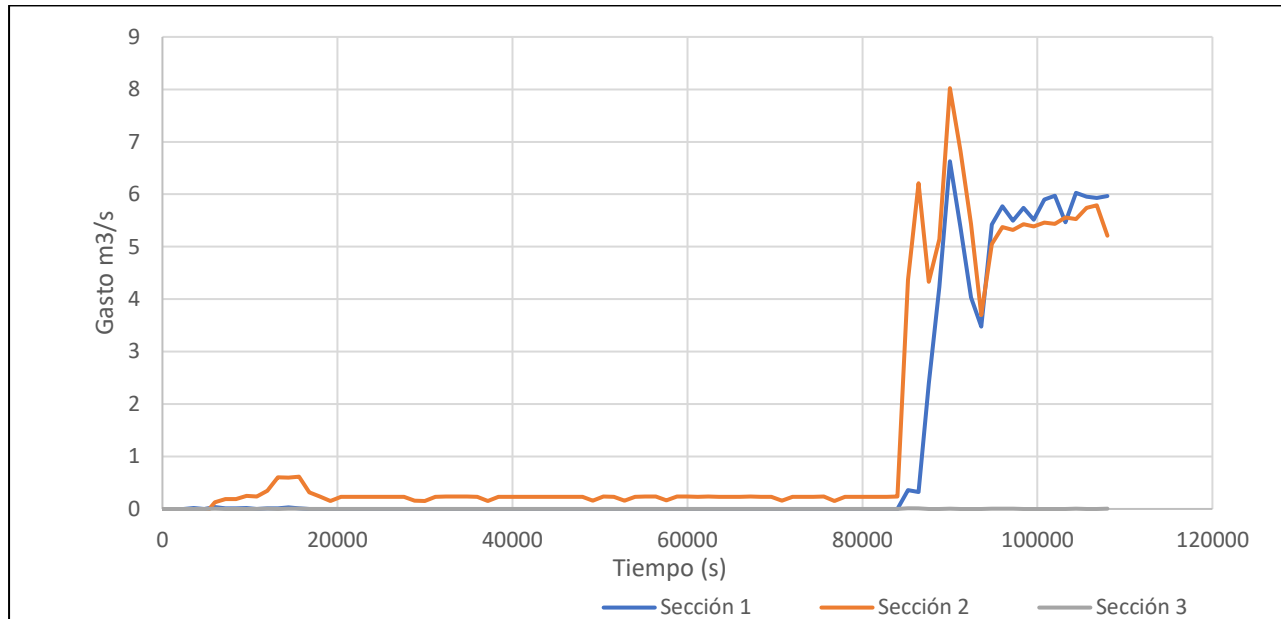


Figura 78 Hidrograma para el escenario 2 en las tres secciones de control (elaboración propia).

Análisis en calles

Se analizan los tirantes, velocidades y caudales en 3 calles y 2 jardines seleccionados con el fin de poder hacer una comparación de los resultados de cada escenario, los valores máximos promedio se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36 Tirantes, velocidades y gastos máximos en puntos seleccionados para el escenario 2 (elaboración propia).

Lugar	Tirante máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /s)
Calle Paseo de la Presa	0.58	1.65	0.46
Jardín Embajadoras	1.11	0.80	0.26
Calle Sangre de Cristo	1.21	0.19	0.25
Jardín de la unión	3.16	0.41	0.21
Avenida Juárez	1.78	0.14	0.09

### Comparación con eventos históricos

En el escenario 1 se realizó la calibración con los datos históricos de la inundación de 1905 porque en ese año aún no se construía la calle subterránea y el modelo del escenario 1 no cuenta con alguna estructura que simule dicha calle.

Para ese modelo se ha agregado la alcantarilla que simula la calle subterránea Miguel Hidalgo, por lo que se utilizaron fotografías y videos del evento del 13 y 14 de junio de 2018 como los de la Figura 79 para comparar con los datos obtenidos del modelo.

Se utilizaron 7 puntos identificados de la evidencia video-fotográfica de las que se estimaron alturas y se definió su ubicación en el SIG. Estos puntos se muestran en la Figura 80 y la comparación en la Tabla 37 que señala un porcentaje de diferencia de 7.79% por lo que el modelo está calibrado.

Tabla 37 Comparación de tirantes del evento de junio 2018 y los resultados del escenario 2 (elaboración propia).

Punto	Tirante		Similitud %	Diferencia %
	Junio 2018 (m)	Modelo con calle subterránea (m)		
<b>A</b>	0.25	0.25	100.00	0.00
<b>B</b>	0.15	0.14	93.33	6.67
<b>C</b>	0.3	0.37	81.08	18.92
<b>D</b>	0.4	0.39	97.50	2.50
<b>E</b>	0.3	0.28	93.33	6.67
<b>F</b>	0.4	0.42	95.24	4.76
<b>G</b>	0.2	0.17	85.00	15.00
		<b>Promedio =</b>	92.21	<b>7.79</b>





Figura 79 Evidencia fotográfica del desbordamiento de la presa en junio 2018.

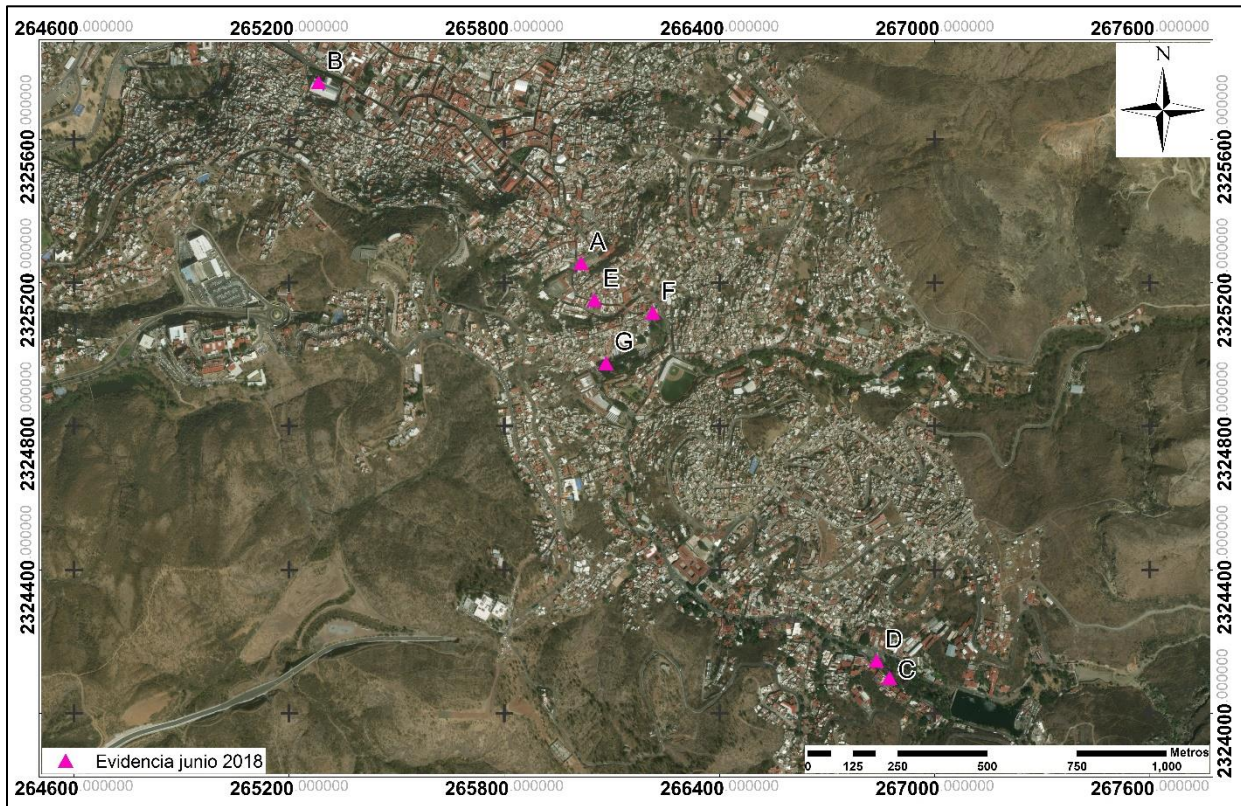


Figura 80 Ubicación de puntos identificados de evidencia de junio 2018 (elaboración propia).

### 5.3 Escenario 3

Como se mencionó en el apartado 3.1.6, la edad de la presa (construida en 1741) es un factor que podría provocar que la presa tuviera una falla debido a las cargas y al deterioro de los materiales. Por este motivo se realizó una simulación que permite observar el comportamiento de la presa al romperse, el alcance que tendría el escurrimiento, el tirante y la velocidad en las calles.

#### 5.3.1 Características de la simulación

Las características generales de este modelo son las del escenario 2, los tamaños de malla, elevaciones y la alcantarilla se establecen igual para este escenario.

Las diferencias que caracterizan a este escenario son: la formación de una brecha para simular la rotura de la presa y que para este escenario no se añade ningún dato de precipitación.

##### *Formación de la brecha*

Para la simulación de la rotura en Iber<sup>®</sup> se realiza el trazo de una brecha, para la que se requiere contar con ciertos parámetros. Para asignar el valor a cada parámetro se consideró la información de la Guía Técnica de Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial (Madrid, 1996) donde se especifican las recomendaciones respecto al modo y tiempo de rotura.

Para presas de gravedad y contrafuertes el tiempo de rotura señalado por la Guía Técnica es de 10 a 15 minutos, la forma de rotura es rectangular, siendo la profundidad de la brecha hasta el contacto con el cauce y el ancho el mayor de los dos valores siguientes: 1/3 de la longitud de coronación o 3 bloques de construcción. La Tabla 38 muestra los parámetros utilizados para la creación de la brecha.

Es importante tener bien delimitada el área del embalse con los polígonos previos a la malla y con las elevaciones. El tiempo máximo de simulación para el problema se asignó de 32,400 segundos, con un intervalo de resultados de 300 segundos.

Tabla 38 Parámetros utilizados para la brecha en Iber® (elaboración propia).

Parámetro	Detalles	Información utilizada
<b>Coordenadas xyz de inicio de la brecha.</b>	El punto en que inicia la brecha (dentro del embalse).	267067 2.32405e+006 2080
<b>Coordenadas xyz de fin de la brecha</b>	El punto en que termina la brecha (aguas abajo de la presa)	267051 2.32406e+006 2072
<b>Tipo</b>	Guía Técnica Española Trapezoidal	Trapezoidal
<b>Empezar en</b>	Tiempo Cota	Tiempo
<b>Valor</b>	Valor de tiempo/cota en que iniciará el rompimiento	0.0 segundos
<b>Cota cresta</b>	Valor de la cota que ha sido asignada en el modelo digital de elevaciones a la cortina de la presa.	2084 msnm
<b>Cota fondo</b>	Valor de la cota al fondo de la presa, donde tiene contacto con el cauce.	2072 msnm
<b>Ancho cresta</b>		3.28 metros
<b>Ancho fondo</b>		14.66 metros
<b>Tiempo de rotura</b>	Según la Guía Técnica, el tiempo de rotura para presas de contrafuertes será de 10 a 15 minutos.	900 segundos

### 5.3.2 Resultados

La Figura 81 es un acercamiento a la presa de la Olla en el segundo 320 (5 minutos y 20 segundos) donde puede observarse de una manera clara el rompimiento de la cortina y cómo el agua se dirige al espacio del vertedor, y una vez que éste se llena, se desborda hacia la ciudad. Esto muestra que, en caso de rompimiento de la presa, se cuenta con 5 minutos para ejecutar medidas de seguridad, sobre todo en la zona más cercana aguas abajo de la presa.

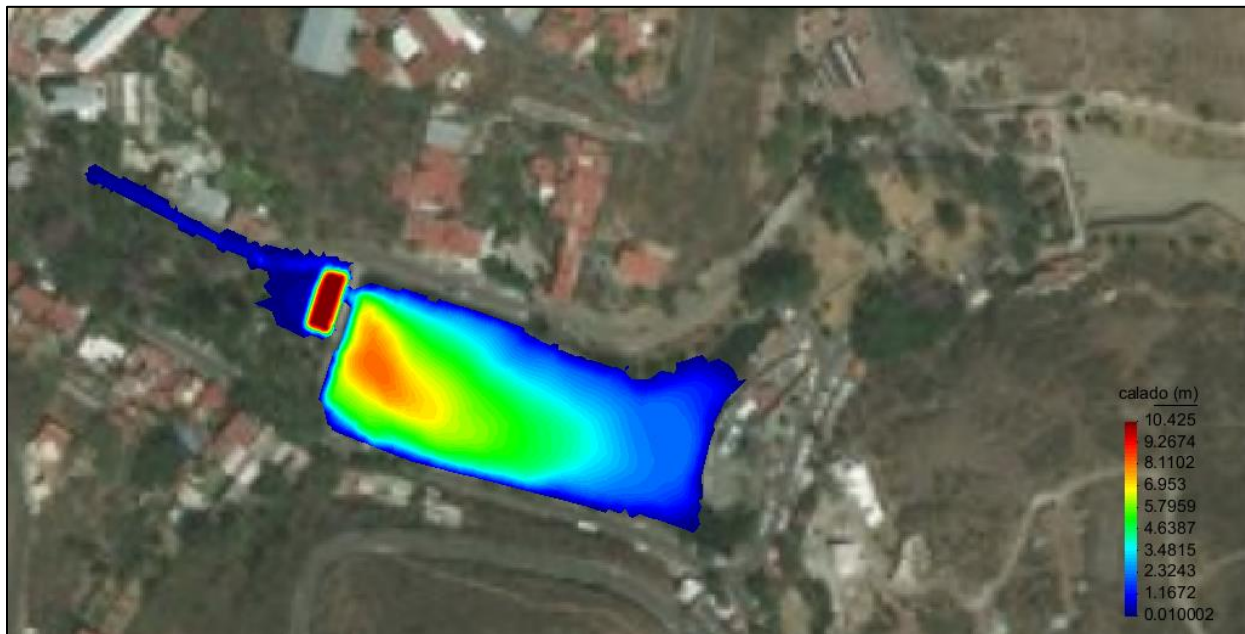


Figura 81 Rotura de la presa a los 5 minutos y 20 segundos. Vista de los tirantes en Iber® (fuente propia).

### Mapas de máximos

La Figura 82, Figura 83, Figura 84, muestran los mapas de tirantes, velocidades y caudales máximos que se presentan en el modelo del escenario 3 respectivamente. A diferencia de los escenarios anteriores, en el rompimiento de la presa se observa un menor alcance espacial del flujo superficial (limitado a la calle Paseo de la Presa, Paseo Madero y Embajadoras) pero tirantes, velocidades y caudales mayores que en los escenarios anteriores.

Los tirantes máximos, acorde a la Figura 82 se presentan en el límite entre la calle Paseo de la Presa y el Jardín embajadoras siendo de 3.4 metros, también es en ese lugar donde las velocidades disminuyen hasta los 0.02 m/s habiendo sido de hasta 12.96 m/s a la salida de la presa de la Olla, en la calle Paseo de la Presa.



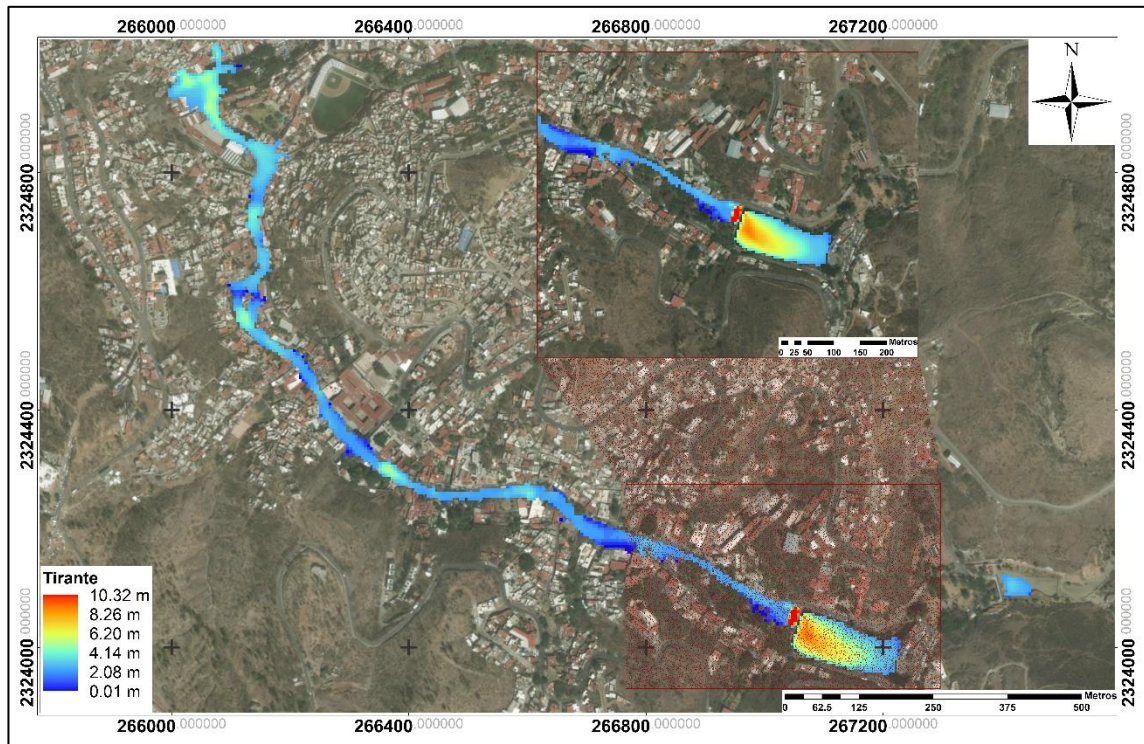


Figura 82 Tirantes máximos para el escenario 3 (elaboración propia).

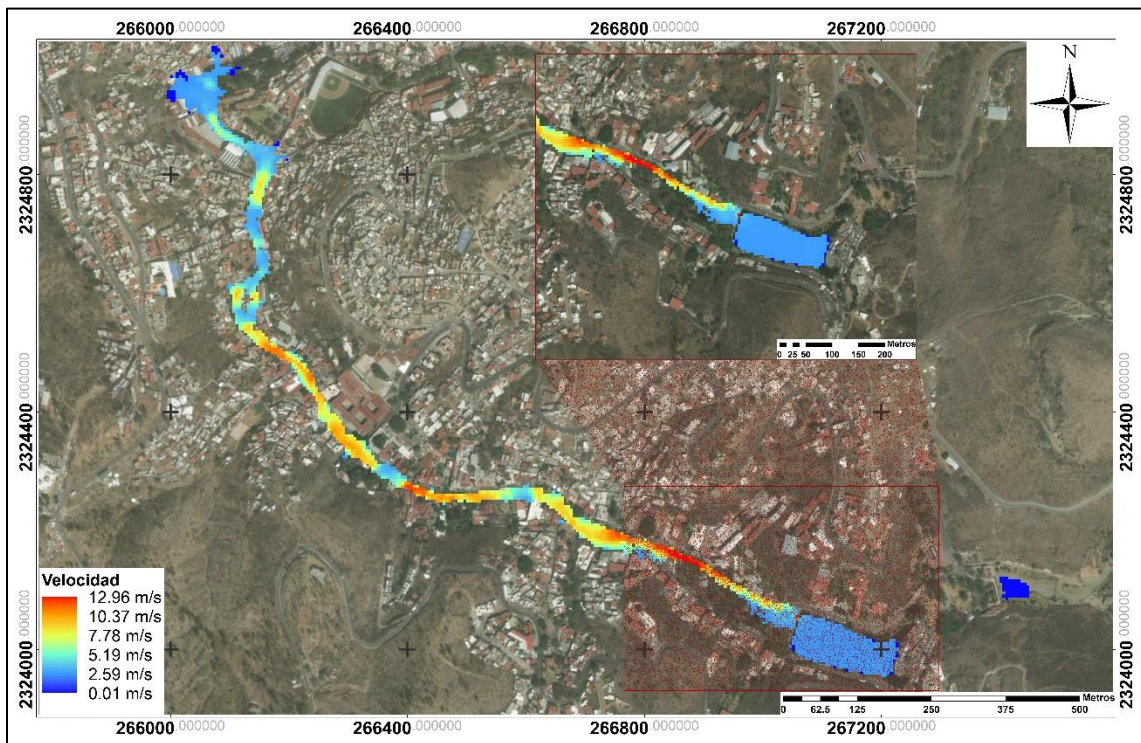


Figura 83 Velocidades máximas para el escenario 3 (elaboración propia).



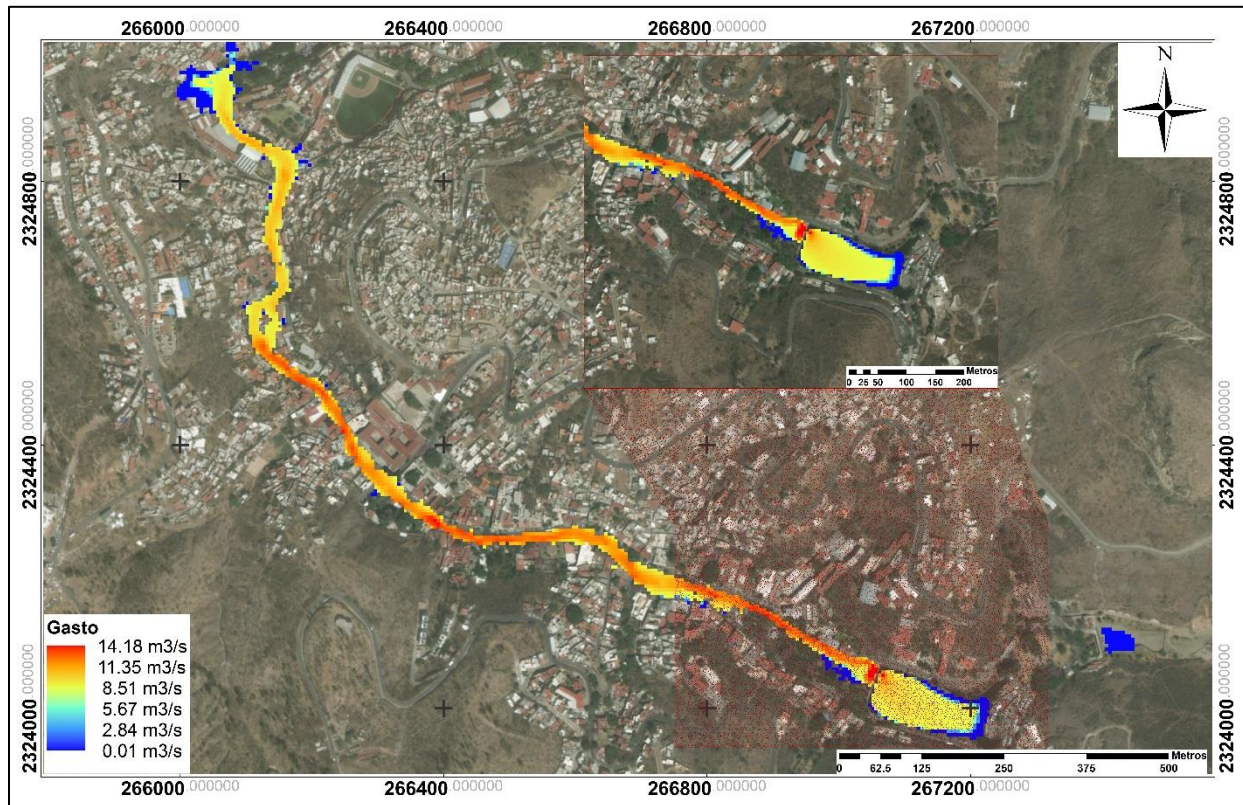


Figura 84 Caudales máximos para el escenario 3 (elaboración propia).

### Secciones de control

Para los escenarios anteriores se establecieron 3 secciones de control para la generación de los hidrogramas, sin embargo, en este modelo, el escurrimiento superficial no alcanza a llegar a la tercera sección de control. Por este motivo el hidrograma de la Figura 85 muestra los hidrogramas generados únicamente en las secciones de control 1 y 2.

En el hidrograma se observa que en la primera sección de control se llega al gasto pico a los 900 segundos (15 minutos) y en la segunda sección a los 6,600 segundos (1 hora y 50 minutos) siendo estos de  $29.29 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $9.78 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente. El gasto máximo promedio que se presenta en la calle Paseo de la Presa es de  $4.59 \text{ m}^3/\text{s}$ , disminuyendo al llegar al Jardín Embajadoras hasta los  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ .



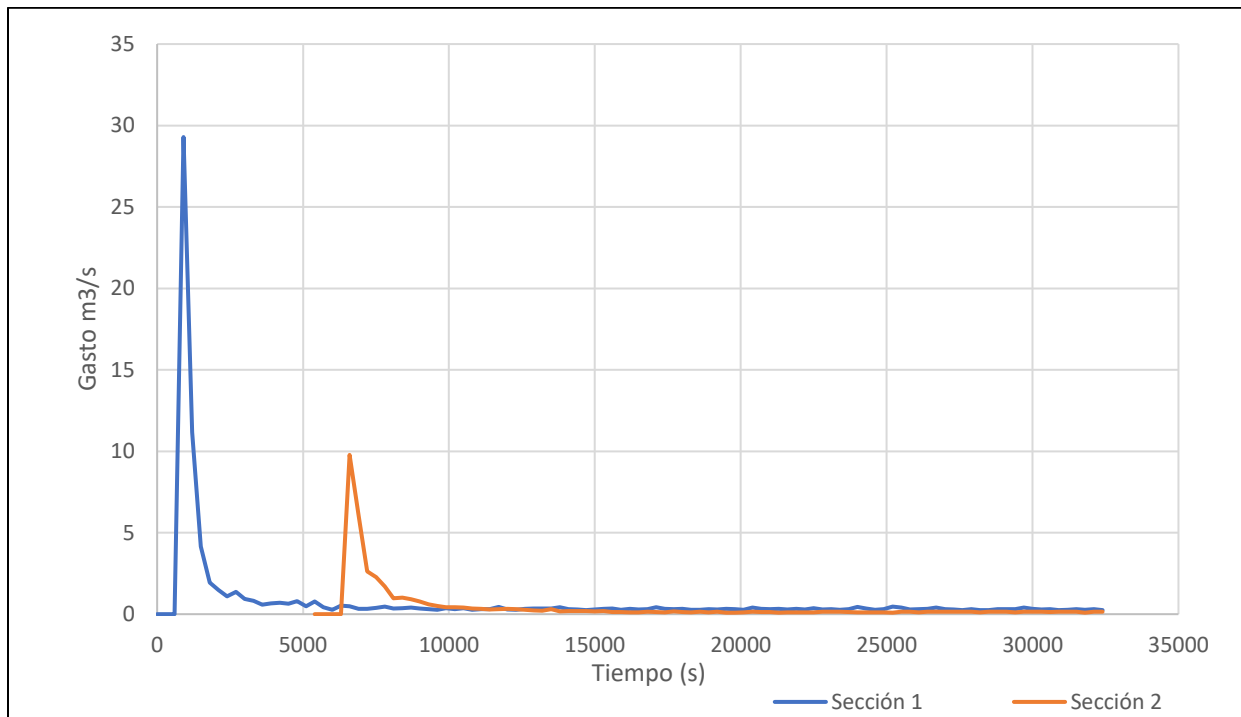


Figura 85 Hidrograma para el escenario 3 en las dos secciones de control (elaboración propia).

Análisis en calles

El mismo análisis de los escenarios anteriores se realizó para el escenario 3. Se observa en la Tabla 39 que el flujo superficial solamente llega a los dos primeros lugares establecidos para el análisis. También se muestra en la tabla que la velocidad en la calle Paseo de la Presa es mucho mayor a los dos escenarios anteriores en los que se simula el desbordamiento de la presa.

Tabla 39 Tirantes, velocidades y gastos máximos en puntos seleccionados para el escenario 3 (elaboración propia).

Lugar	Tirante máximo (m)	Velocidad máxima (m/s)	Gasto máximo (m³/s)
<b>Calle Paseo de la Presa</b>	3.30	10.68	4.59
<b>Jardín Embajadoras</b>	1.73	1.92	0.42
<b>Calle Sangre de Cristo</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Jardín de la unión</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Avenida Juárez</b>	0.00	0.00	0.00

## 5.4 Escenario 4

### 5.4.1 Características de la simulación

El escenario 4 consta de 8 modelos realizados para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años). Estos modelos se realizaron con las mismas características del escenario 2. Las diferencias de los modelos del escenario 4 son el tiempo de simulación que se estableció de 36,000 segundos (10 horas) con un intervalo de 600 segundos y los hietogramas utilizados (uno para cada periodo de retorno como se muestra en la Figura 35).

### 5.4.2 Resultados

Los mapas de tirantes, velocidades y caudales máximos para cada periodo de retorno se encuentran en el Anexo 2. Mapas de máximos para las lluvias de diseño. En este apartado de resultados se mostrarán los hidrogramas en las secciones de control, los análisis en los cinco lugares seleccionados y mapas de peligrosidad para los periodos de retorno 2, 5, 10 y 25 años.

#### *Secciones de control*

Los hidrogramas fueron calculados en cada sección de control que fue definida en la Figura 70. El hidrograma para la primera sección de control se muestra en la Figura 86 y señala que, para el periodo de retorno de 500 años, el gasto pico se presenta a los 13,200 segundos (3 horas y 40 minutos) y es de  $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$ . Conforme el periodo de retorno disminuye, los gastos pico se presentan en un tiempo menor y con una descarga menor. Para el periodo de retorno de 2 años, el gasto pico se presenta a los 7200 segundos (2 horas) siendo de  $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El hidrograma de la segunda sección mostrado en la Figura 87 es más uniforme por lo que es fácil observar la disminución de la descarga conforme disminuye el periodo de retorno. El gasto pico del hidrograma de la tercera sección (Figura 88), contrario al de la primera sección, no disminuye en tiempo conforme disminuye el periodo de retorno.

El gasto pico para 500 años de periodo de retorno se presenta a los 6,000 segundos (1 hora y 40 minutos), mientras que para el periodo de retorno se presenta a los 10,800 segundos (3 horas).

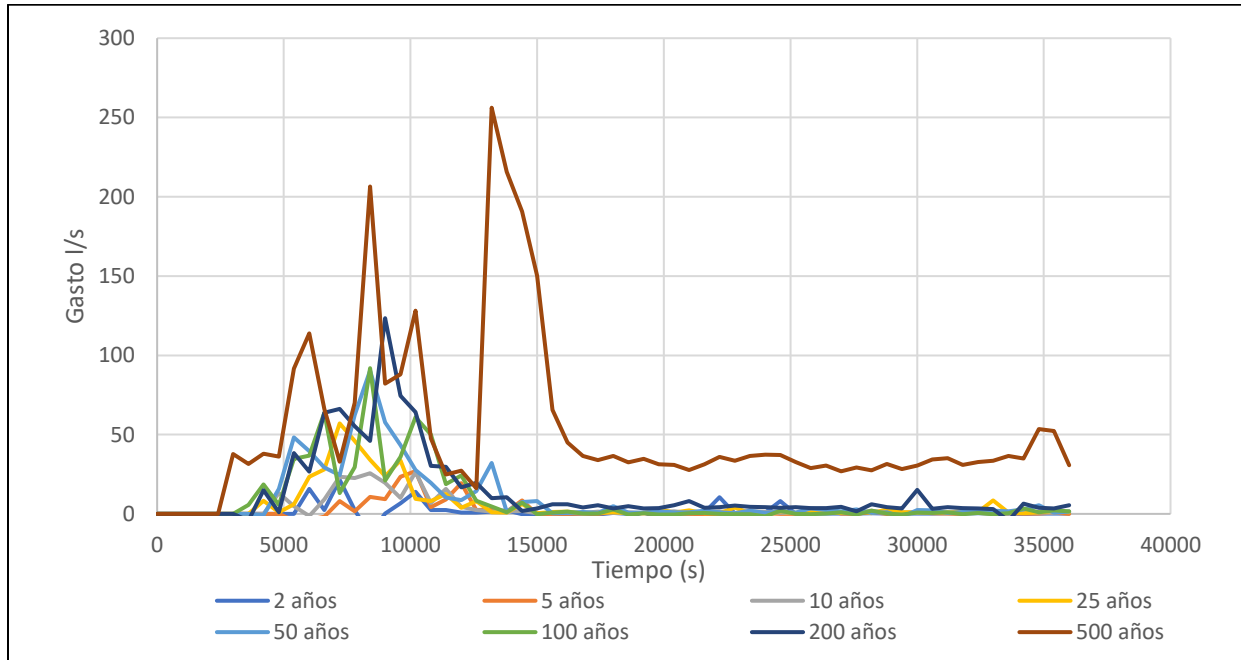


Figura 86 Hidrogramas para cada periodo de retorno en la sección de control 1 (elaboración propia).

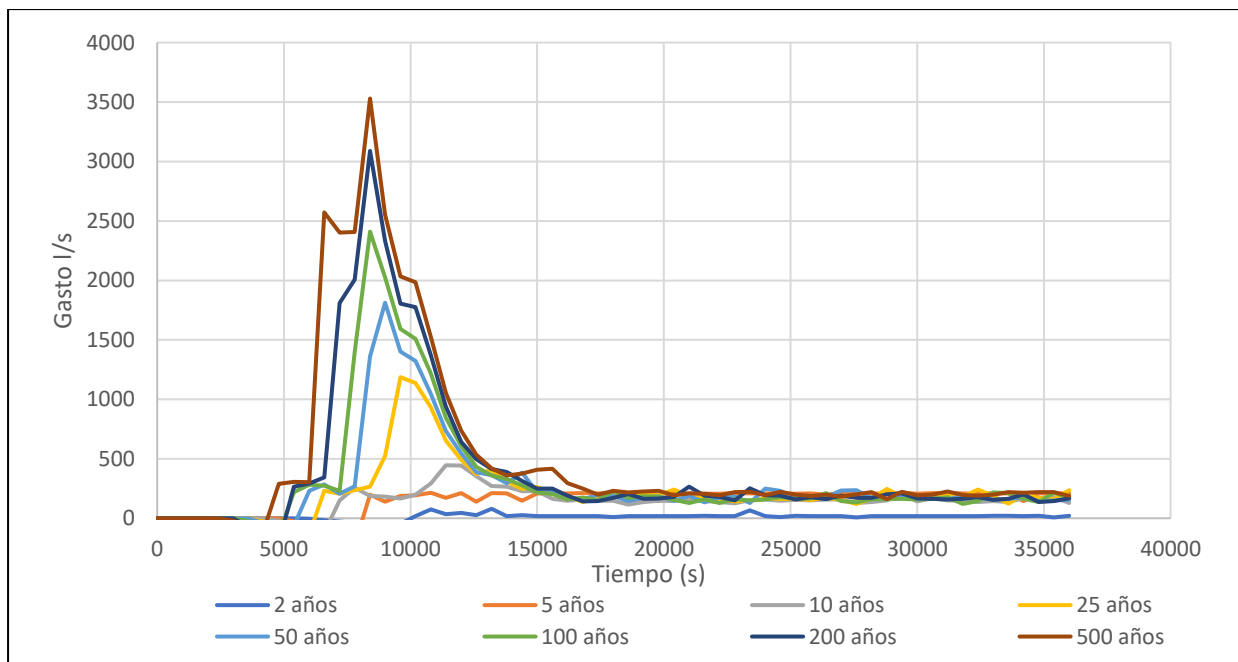


Figura 87 Hidrogramas para cada periodo de retorno en la sección de control 2 (elaboración propia).

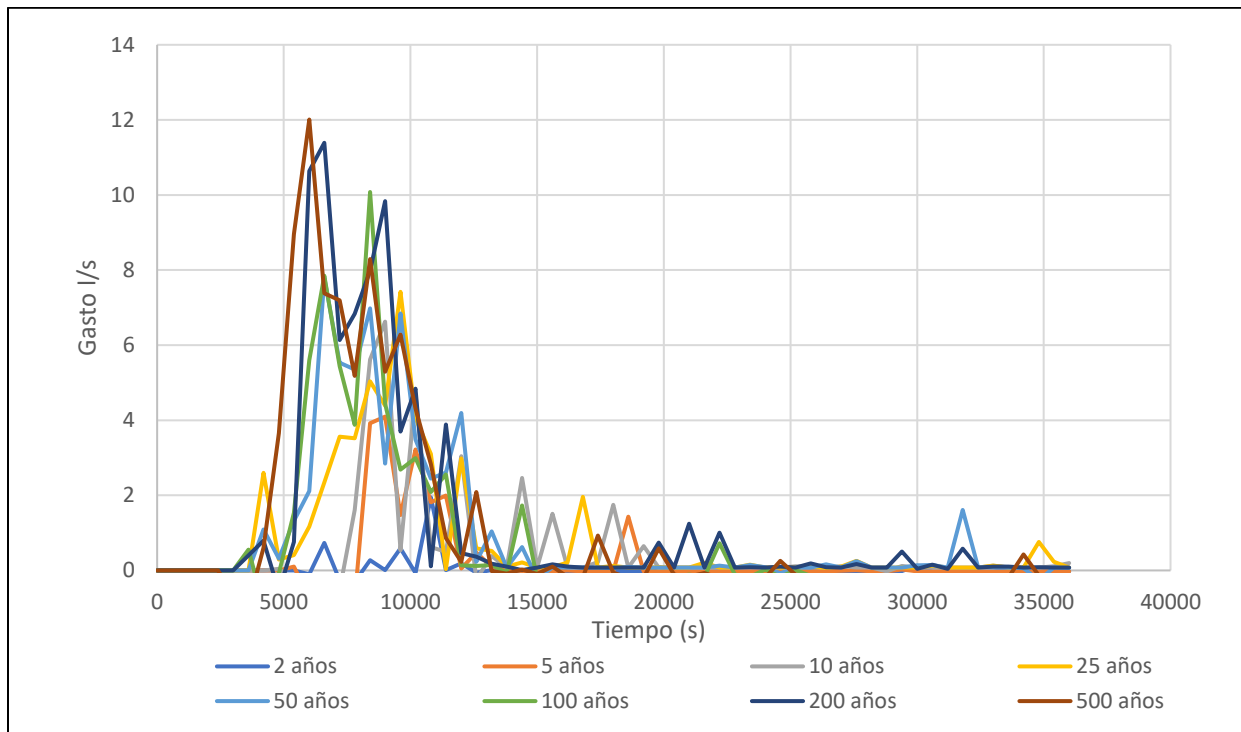


Figura 88 Hidrogramas para cada periodo de retorno en la sección de control 3 (elaboración propia).

Análisis en calles

Se realizó el mismo análisis presentado en los escenarios anteriores, en las mismas calles para cada periodo de retorno, para señalar los tirantes, velocidades y gastos máximos promedio en cada uno de los 5 lugares. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40 Análisis en calles para lluvia de diseño (Escenario 4) (elaboración propia).

Periodo de retorno	2 años			5 años			10 años		
	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo
Lugar	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
Calle Paseo de la Presa	0.3	0.16	0.01	0.4	0.23	0.02	0.38	0.39	0.04
Jardín Embajadoras	0.25	0.04	0.004	0.32	0.06	0.01	0.6	0.07	0.01
Calle Sangre de Cristo	0.2	0.03	0.001	0.24	0.01	0.001	0.32	0.02	0.001
Jardín de la unión	0.16	0.02	0.001	0.17	0.01	0.001	0.17	0.02	0.001
Avenida Juárez	0.36	0.1	0.01	0.54	0.09	0.02	0.63	0.09	0.02

Tabla 40 (continuación) Análisis en calles para lluvia de diseño (Escenario 4) (elaboración propia).

Periodo de retorno	25 años			50 años			100 años		
	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo
	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
<b>Calle Paseo de la Presa</b>	0.39	0.56	0.06	0.45	0.7	0.09	0.43	0.75	0.11
<b>Jardín Embajadoras</b>	0.75	0.09	0.02	0.92	0.1	0.04	1.05	0.13	0.04
<b>Calle Sangre de Cristo</b>	0.57	0.02	0.01	0.79	0.03	0.02	0.88	0.07	0.05
<b>Jardín de la unión</b>	0.27	0.02	0.002	0.26	0.02	0.001	0.27	0.01	0.001
<b>Avenida Juárez</b>	0.78	0.08	0.02	0.83	0.09	0.02	0.92	0.08	0.02

Tabla 40 (continuación) Análisis en calles para lluvia de diseño (Escenario 4) (elaboración propia).

Periodo de retorno	200 años			500 años		
	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo	Tirante máximo	Velocidad máxima	Gasto máximo
	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)
<b>Calle Paseo de la Presa</b>	0.44	0.78	0.12	0.49	0.91	0.15
<b>Jardín Embajadoras</b>	1.14	0.14	0.04	1.11	0.21	0.05
<b>Calle Sangre de Cristo</b>	0.9	0.11	0.1	1.27	0.13	0.11
<b>Jardín de la unión</b>	0.82	0.15	0.01	1.3	0.31	0.09
<b>Avenida Juárez</b>	1	0.13	0.03	1.15	0.12	0.04

La misma información mostrada en la Tabla 40 se encuentra de una manera gráfica en la Figura 89 para los tirantes máximos promedios presentados en cada uno de los lugares analizados y para cada periodo de retorno, en la Figura 90 para las velocidades máximas promedio y en la Figura 91 para los gastos máximos promedio. Las figuras permiten observar de una manera clara cómo los valores van aumentando conforme el valor del periodo de retorno es mayor.



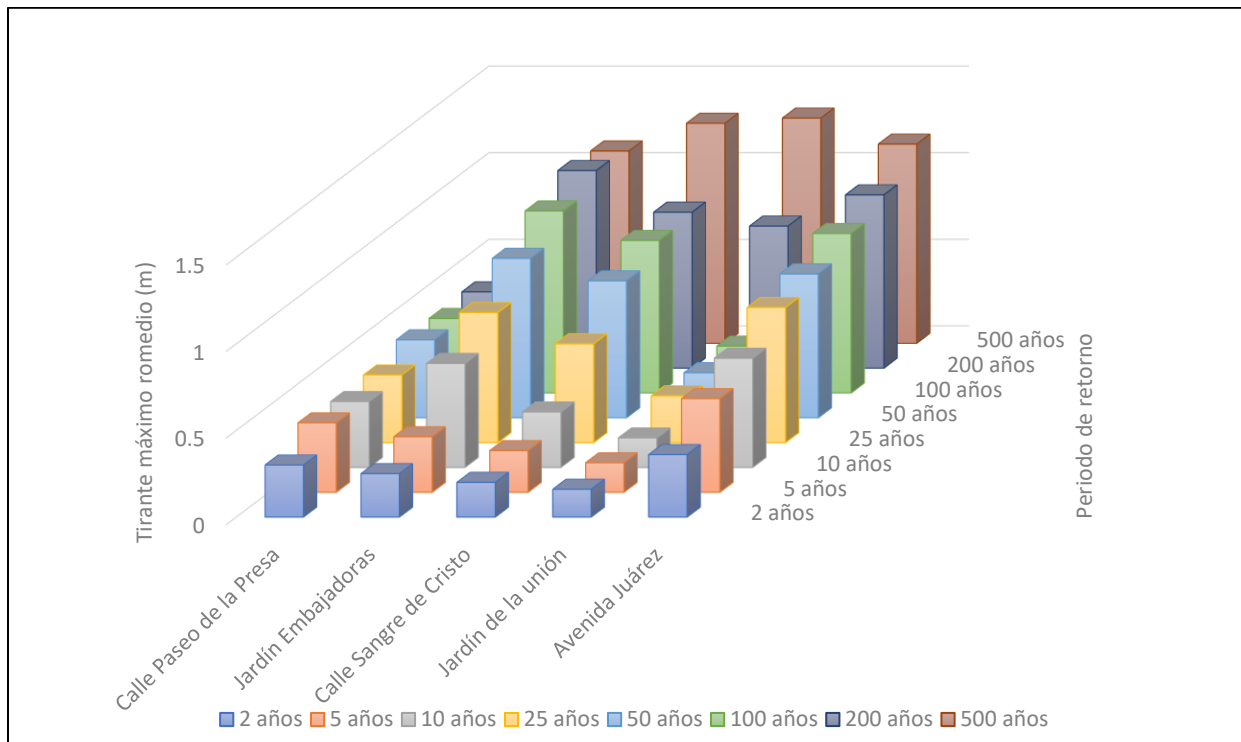


Figura 89 Tirantes máximos promedio para cada periodo de retorno (elaboración propia).

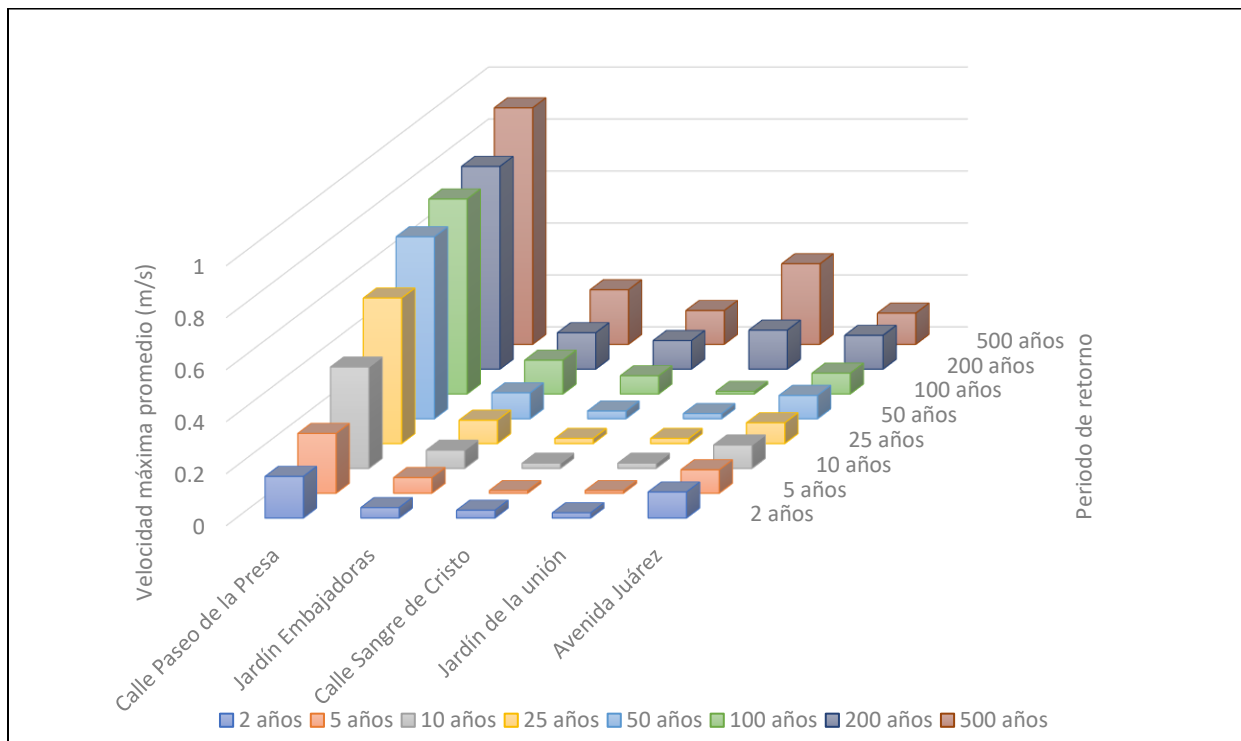


Figura 90 Velocidades máximas promedio para cada periodo de retorno (elaboración propia).

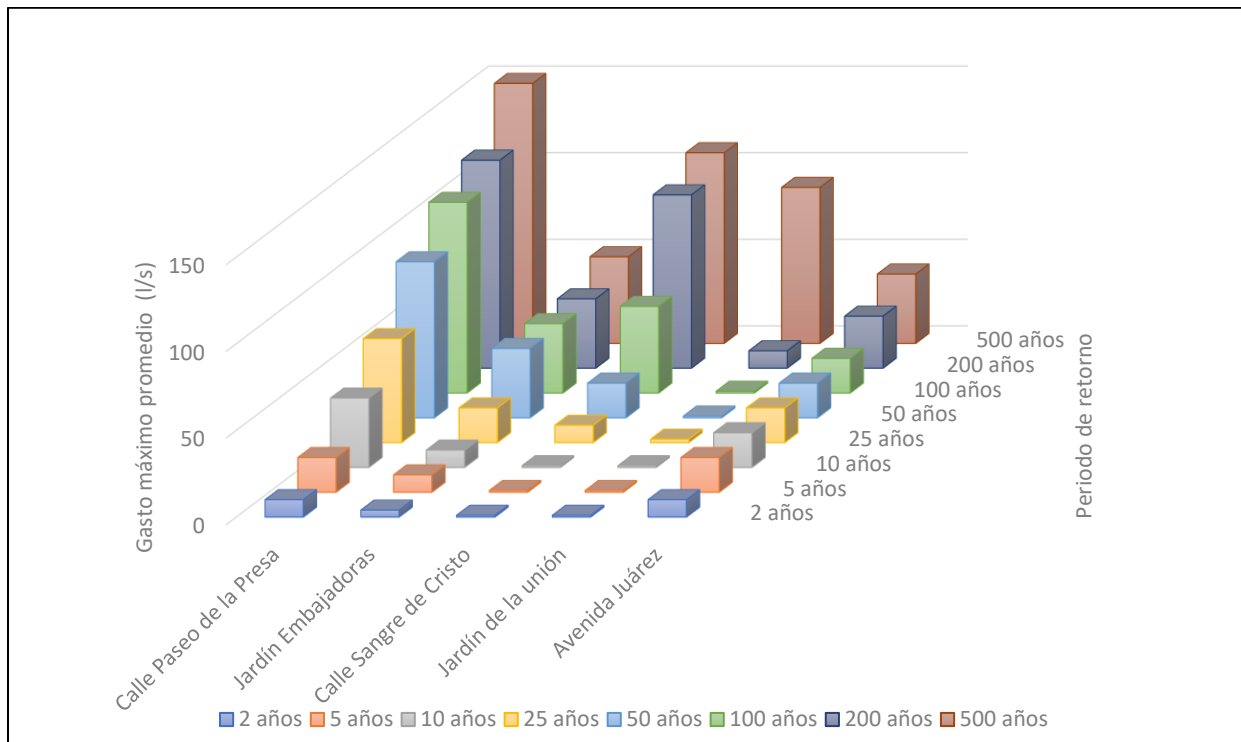


Figura 91 Gasto máximo promedio para cada periodo de retorno (elaboración propia).

Mapas de peligro

Para la generación de mapas de peligro se tomaron en cuenta los criterios propuestos por el IMTA (Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora, 2016) en donde se señalan los criterios mostrados en la Tabla 41.

Tabla 41 Criterios para la generación de mapas de peligro por inundación (Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora, 2016).

Nivel de peligro	Altura (m)	Volcamiento (m <sup>2</sup> /s)	Deslizamiento (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
Nulo	$h < 0.3$	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.3$
Bajo	$0.3 \geq h < 0.5$	$0.3 \geq vh < 0.5$	$0.3 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.23$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.23$

---

La Tabla 41 establece niveles de peligro acorde a la altura del nivel de agua en el modelo (tirante), volcamiento (equivalente al producto del tirante por la velocidad) y deslizamiento (producto del cuadrado de la velocidad por la altura).

Considerando que el periodo de retorno es “el número de años en que, en promedio, se presenta un evento” (Aparicio Mijares, 1992), se realizaron los mapas de peligro para los periodos de retorno 2, 5, 10 y 25 años pues son los que se presentarían con una mayor probabilidad.

Iber® tiene la opción de ingresar valores de “peligrosidad personalizada” mediante la que genera mapas de peligro basados en valores de altura y volcamiento definidos por el usuario. Se ingresaron los valores de la Tabla 41 y se obtuvieron los mapas de peligro que se muestran en la Figura 92, (para un periodo de retorno de 2 años), Figura 93 (periodo de retorno de 5 años), Figura 94 (periodo de retorno de 10 años) y Figura 95 (periodo de retorno de 25 años).

En los mapas de peligro se señalan además los servicios públicos de la ciudad (centros comerciales, centros de asistencia médica, escuelas, instalaciones de comunicación, instalaciones deportivas, mercados, palacio de gobierno, plazas y templos) con el fin de señalar los lugares que podrían ser utilizados como refugios en caso de inundación.

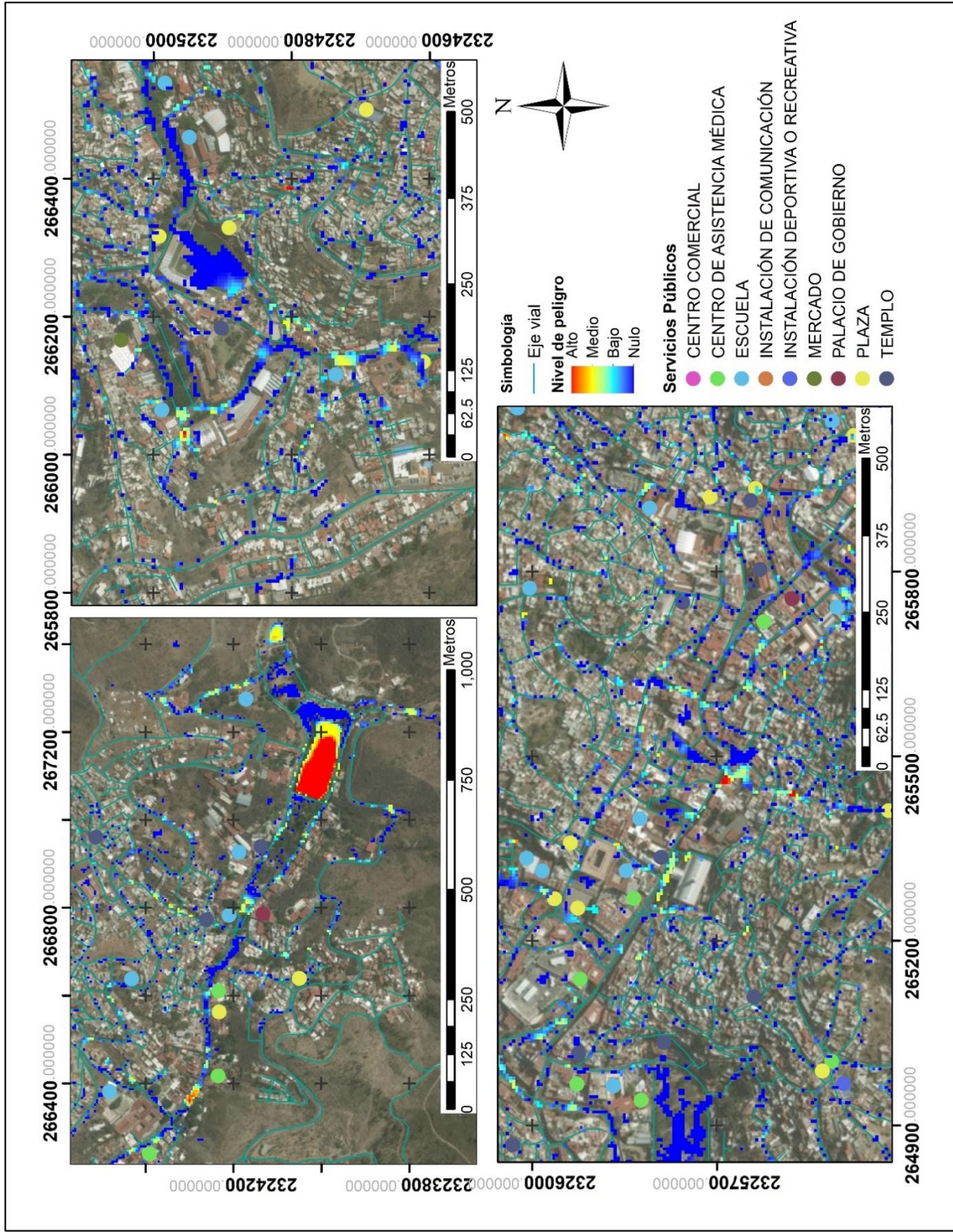


Figura 92 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).



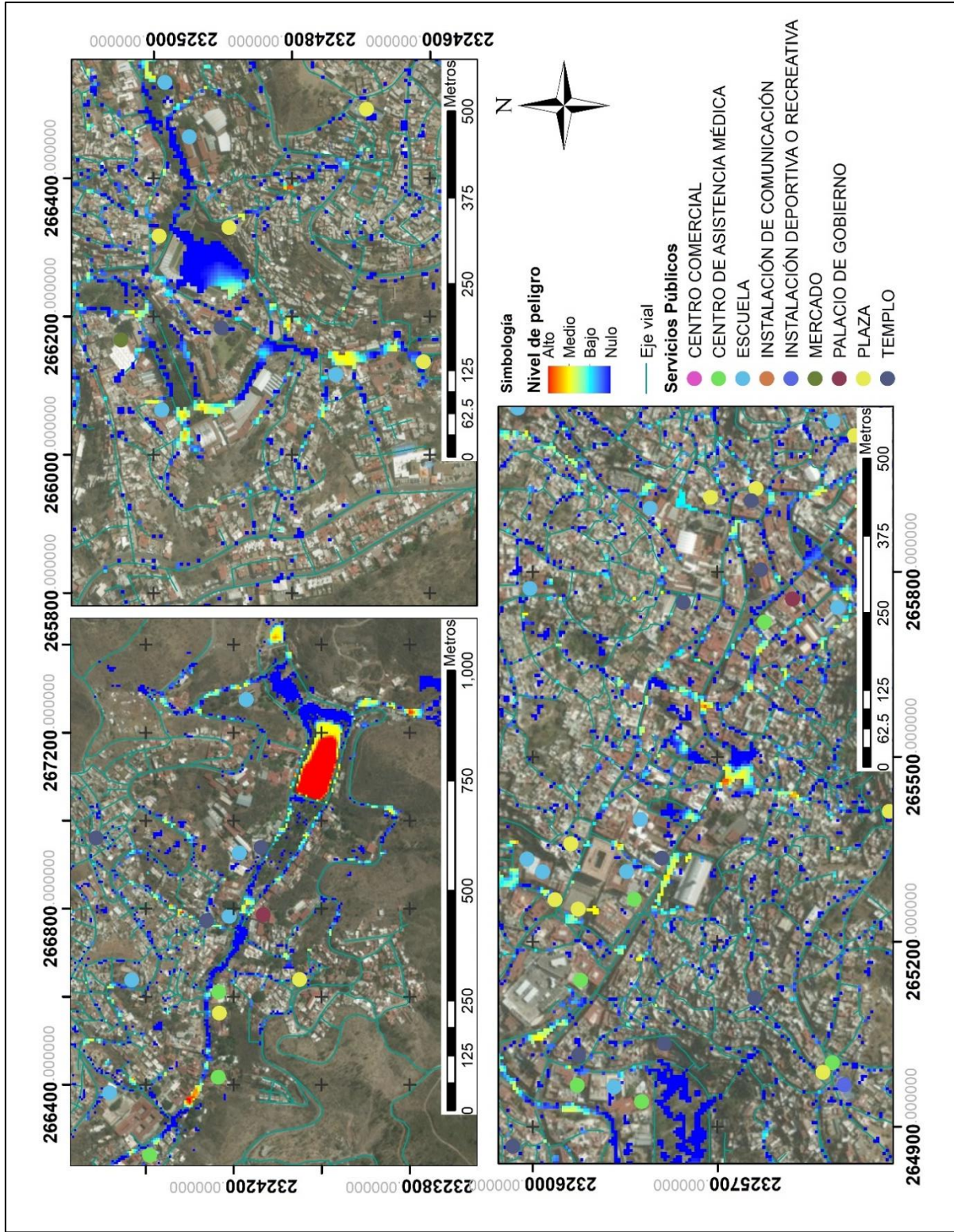


Figura 93 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia).



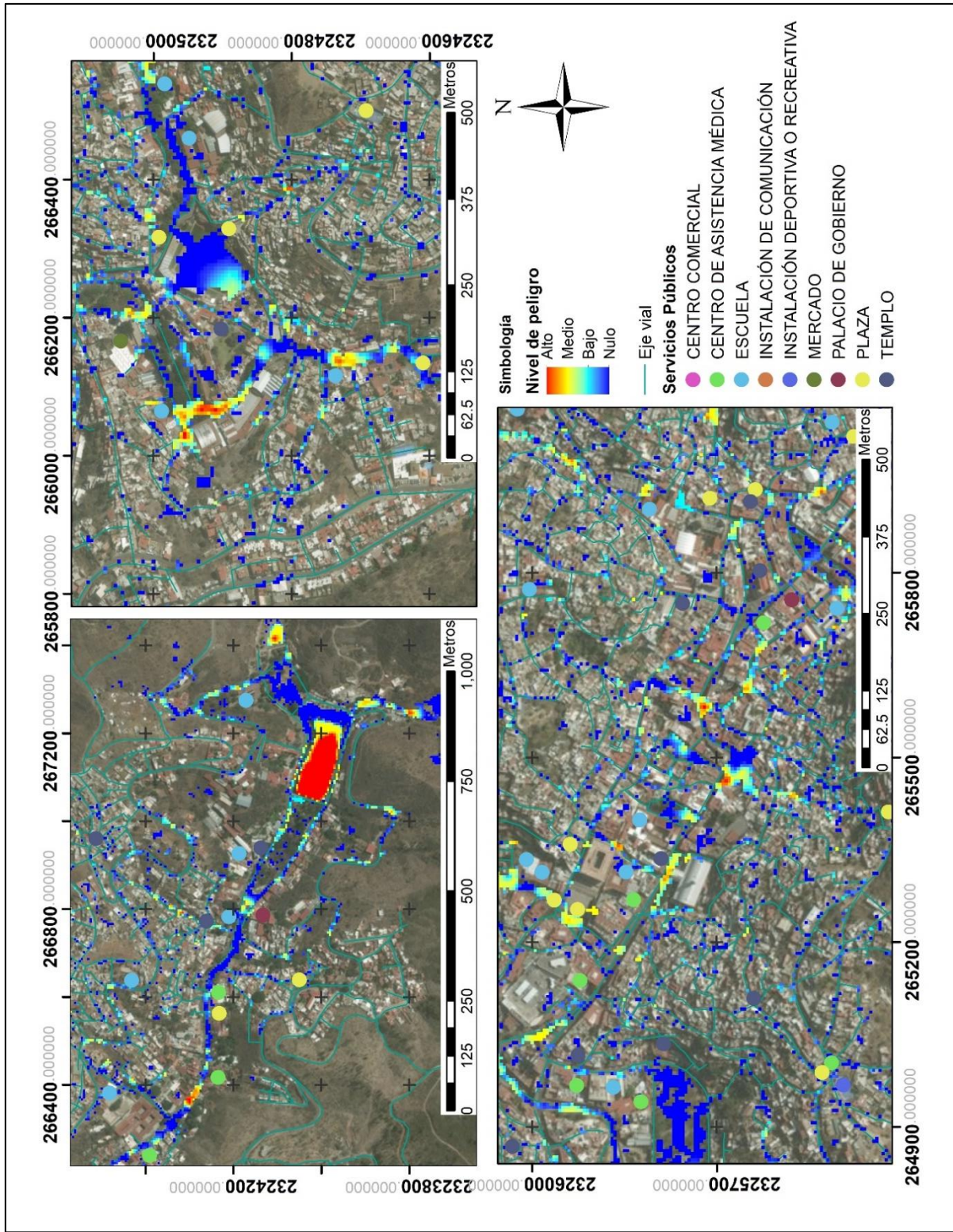


Figura 94 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia).



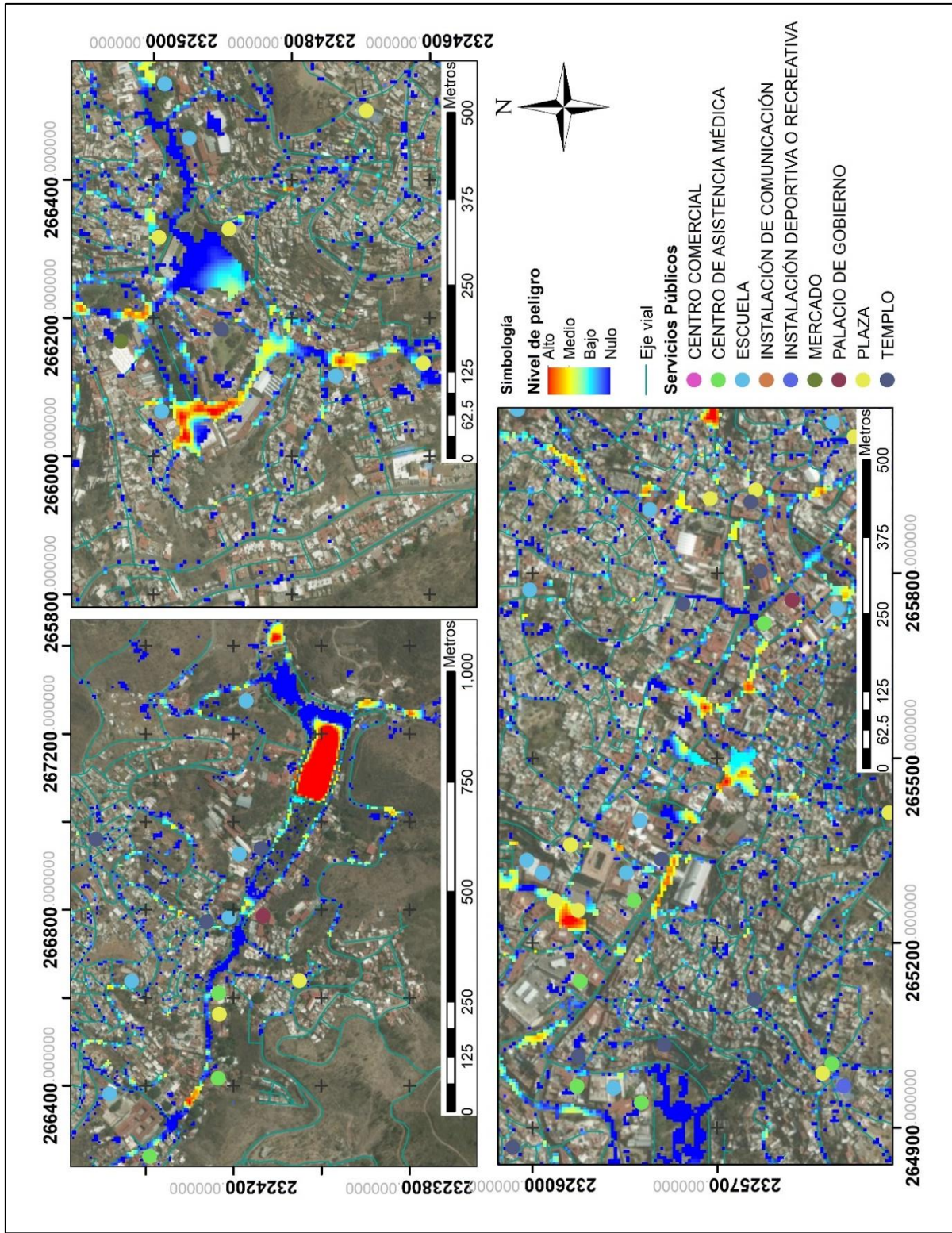


Figura 95 Nivel de peligro para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).

## 6. CONCLUSIONES

- Se generó un modelo bidimensional de simulación de escurrimiento superficial en el software Iber® para 4 escenarios propuestos: el desbordamiento de la presa de la Olla con los datos de precipitación de la inundación de junio de 2018 y las condiciones fisiográficas existentes durante la inundación de 1905; el desbordamiento de la presa con la precipitación de junio 2018 y la caracterización existente en dicho año; el rompimiento de la presa; y el desbordamiento con lluvias de diseño para varios periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años).
- Se realizó una caracterización de la zona de estudio que se dividió en tres: la presa de la Olla, la cuenca de aportación y la zona urbana de la ciudad.
  - La presa de la Olla forma parte de la región Lerma- Santiago-Pacífico, su cortina es de contrafuertes con una longitud de 86 m. Tiene una capacidad de almacenamiento de 70,000 m<sup>3</sup>, sin embargo, la falta de mantenimiento y al haber excedido su vida útil, el nivel de azolve es de entre 4 y 9 m de espesor, lo que disminuye considerablemente su capacidad de almacenamiento.
  - La cuenca de aportación es la cuenca Río Lerma 5 y tiene un área de 3.84 km<sup>2</sup>. El índice de Gravelius es de 1.71 por lo que la cuenca tiene forma ovalada. La pendiente de la cuenca se relaciona con la velocidad del escurrimiento e infiltración, para la cuenca de estudio la pendiente media es de 15.44%. El cause principal de la cuenca tiene una longitud de 2,793.83 m y una pendiente de 12.77%.
  - Se caracterizaron los parámetros que incluyen toda la zona de estudio: el coeficiente de rugosidad de Manning, y el Modelo Digital de Elevaciones que incluye la elevación de las manzanas de la zona urbana.
- La información hidrometeorológica utilizada se divide en dos: la precipitación histórica de junio 2018 y las lluvias de diseño generadas para periodos de retorno a partir del análisis de la información hidrometeorológica disponible.

- El análisis del modelo del primer escenario muestra el comportamiento del flujo superficial en la zona urbana de la ciudad durante el evento del 13 y 14 de junio del 2018 en el que se presentó una lluvia extraordinaria de 117 mm en 26 horas y 40 minutos, lo que causó el desbordamiento de la presa de la Olla. Se realizaron dos escenarios con la precipitación mencionada, uno que se calibró con la inundación de 1905 y el segundo con la de junio 2018, para cada uno se tomaron en cuenta las características fisiográficas de cada época. Con estos modelos se compararon los datos obtenidos y la información histórica, las diferencias fueron de 14.54% y de 7.79% respectivamente, por lo que se asegura que el modelo se encuentra calibrado.
- Acorde al modelo de simulación el volumen que desbordó la presa de la Olla en junio de 2018 fue de 15,355 m<sup>3</sup>.
- El tercer escenario, que presenta el modelo de simulación del rompimiento de la presa de la Olla, señala que el tiempo disponible para evacuar las zonas aguas abajo de la presa es de 5 minutos y 20 segundos y que el alcance espacial del flujo superficial se limita a las calles Paseo de la Presa, Paseo Madero y Embajadoras donde se presentan velocidades de hasta 10.03 m/s.
- Para el último escenario se crearon lluvias de diseño considerando la información disponible de las estaciones meteorológicas del SMN. Las lluvias se diseñaron para una duración de 240 minutos (porque es la duración de lluvia más frecuente en la ciudad) y periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Los resultados de este escenario permiten estimar los alcances de lluvias con cierta probabilidad de ocurrencia para prevenir y mitigar daños.
- Se elaboraron mapas de peligro con los datos de las lluvias de diseño para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años, pues son los que tienen mayores probabilidades de ocurrencia. Estos mapas muestran las zonas en que existe un peligro nulo, bajo, medio o alto de acuerdo con los valores de tirantes y de volcamiento.

- Para una lluvia de diseño con duración de 240 minutos (4 horas), periodo de retorno de 2 años y altura de lluvia de 43.56 mm, los resultados que se muestran en los mapas de peligro señalan que, el peligro es nulo en el 71.01% de las áreas afectadas de la ciudad, el peligro alto se presenta únicamente en puntos específicos llegando a abarcar un 3.02%.
- Para el periodo de retorno de 5 años, duración de lluvia de 240 minutos y altura de lluvia de 50.44 mm; los resultados muestran peligro alto y medio de 11.99% en conjunto.
- Para el periodo de retorno de 10 años, duración de lluvia de 240 minutos y altura de lluvia de 55.68 mm, el porcentaje de peligro nulo es de 64.92%, bajo 21.14%, medio 11.30% y alto 2.64%.
- Para el periodo de retorno de 25 años, duración de lluvia 240 minutos y altura de lluvia de 62.56, la suma del nivel de peligro bajo, medio y alto es de 38.29%.

## 7. TRABAJOS FUTUROS

Dentro de los aspectos que podrían mejorarse de este proyecto se encuentra principalmente la obtención de información:

- **Batimetría:** La batimetría que fue proporcionada por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, es información de hace 18 años, por lo que es de suponer que el nivel de azolve sea mucho más alto ahora. La realización de una nueva batimetría a la presa de la Olla y la presa de San Renovato, y su implementación en el modelo, permitirían la caracterización más actualizada de la zona.
- **Datos de precipitación:** se utilizó la estación ESIME “GUANAJUATOob”, de la que se utilizaron 4.5 años de información; una mayor cantidad de datos permitirían un menor nivel de incertidumbre en la estimación de las lluvias de diseño. Es de notar también, que dicha estación se encuentra temporalmente fuera de servicio, por lo que esta estación no aporta datos meteorológicos y es la única en la zona de estudio.
- **Calle subterránea:** la topografía accidentada de Guanajuato y en particular la calle subterránea Miguel Hidalgo que atraviesa la zona centro de la ciudad, es un elemento que podría caracterizarse con mayores detalles en el modelo. Se considera que un levantamiento de la zona y su implementación en el estudio, tendrían un gran impacto en la mejora del modelo, pues podrían incluso obtenerse resultados (velocidades, tirantes, caudales) para dicha calle.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 33-55.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F.: Editorial Limusa.
- Apel, H., Aronica, G., Kreibich, H., & Thielen, A. (2008). Flood risk analyses-how detailed do we need to be? *Nat Hazard. Natural Hazards*, 49, 79-98. doi:10.1007/s11069-008-9277-8
- Benassini, A. (s.f.). *Presas de tierra y roca en México*.
- Bladé Castellet, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería del agua*, 18. doi:10.4995/ia.2014.3144
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., . . . Coll, A. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para*, 10.
- Campos Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. San Luis Potosí: Printego.
- Campos Aranda, D. F. (2015). Construcción de tormentas hiotéticas. *Tecnología y ciencias del agua*, 9-22. Obtenido de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/561>
- Cea, L., & Bladé, E. (2008). Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable.
- CEAG. (2001). *Levantamiento topobatimétrico y determinación del grado de azolve para la rehabilitación de las presas de La Olla y presa de San Renovato del municipio de Guanajuato*. Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Gto.

- CEDEX, GEAMA, FLUMEN, & CIMNE. (2015). *Iber Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario.*
- CEDEX, GEAMA, FLUMEN, & CIMNE. (2015). *Iber Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico.*
- Central Dam Safety Organisation, Government of India. (2018). *Guidelines for Mapping Flood Risks Associated with Dams.* New Delhi, India.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos.* Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- CIMNE. (2018). *GiD.* Obtenido de <https://www.gidhome.com/>
- CONAGUA. (1987). Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal.
- CONAGUA. (1999). *Manual para capacitación en seguridad de presas.*
- CONAGUA. (2012). *Inventario de presas.* Obtenido de <http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>
- CONAGUA. (2015). *Drenaje Pluvial Urbano.* Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS).
- Cuervo Muñoz, A. E. (2012). *Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos (Máster oficial en recursos hídricos).* Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fabio, P., Aronica, G. T., & Apel, H. (2009). Towards automatic calibration of 2-dimensional flood propagation models. *Hydrology and Earth System Science*, 911-924. doi:10.5194/hessd-6-6833-2009
- Gámez Morales, W. R. (2010). *Texto Básico de Hidrología.* Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.

Gobierno del Estado de Guanajuato. (s.f.). *Archivo histórico de Guanajuato*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2018, de <http://archivohistorico.guanajuato.gob.mx/buscador.php>

Gonzalez, J. G. (1905). *La inundación de Guanajuato*. León, Guanajuato: Imprenta de J. Rodríguez e hijo.

Hall, J. W., Tarantola, S., Bates, P. D., & Horritt, M. S. (2005). Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, 117-126. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:2(117)

Hernández-Urbe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(3), 5-25.

Herrera-Díaz, I. E., Rodríguez-Cuevas, C., Couder-Castañeda, C., & Gasca-Tirado, J. R. (2015). Modelación numérica hidrodinámico-hidrológica en zonas de inundación con presencia de infraestructura. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 139-152. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000100008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100008&lng=es&tlng=es).

ICOLD. (Noviembre de 2018). *International Commission on Large Dams*. Obtenido de <http://www.icold-cigb.net>

IMTA. (2010). AFA V1.1. México.

IMTA. (s.f.). *Manual de usuario del sistema AFA V.1.0*.

INAFED. (s.f.). *Enciclopedia de municipios*. Obtenido de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM11guanajuato/municipios/11015a.html>

INEGI. (s.f.). Recuperado el 10 de Diciembre de 2018, de Relieve continental: <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>

- INEGI. (2010). *Principales resultados del censo de población y vivienda 2010 Guanajuato*. México.
- INEGI. (s.f.). *Mapa Digital de México*. Recuperado el 19 de Noviembre de 2018, de <http://gaia.inegi.org.mx>
- Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales. (2005). *Inundaciones fluviales*. Managua, Nicaragua.
- James, W. (2003). *Rules for responsible modeling* (4 ed.). Ontario, Canada: Computational Hydraulics International.
- Llaguno Guilberto, Ó. J. (2014). *Generación de mapas de riesgo considerando la topografía urbana, aplicado a la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. (Maestría en ingeniería)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Madrid, D. G. (1996). *Guía Técnica de Clasificación de Presas en función del Riesgo Potencial*. Madrid, España.
- Marengo Mogollón, H. (1996). Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, XI(2), 65-77.
- Marmolejo, L. (1883). *Efemérides Guanajuatenses*. Guanajuato: Imprenta del Colegio de Artes y Oficios, a cargo de Francisco Rodríguez.
- Martínez Gomariz, E. (2016). *Inundaciones urbanas: criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos (Doctorado en ingeniería civil)*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Martínez-Arredondo, J. C., Jofre Meléndez, R., Ortega Chávez, V. M., & Ramos Arroyo, Y. R. (2015). Descripción de la variabilidad climática normal (1951-2010) en la cuenca del río Guanajuato, centro de México. *Acta Universitaria*, 25(6), 31-47. doi:10.15174/au.2015.799
- McCuen, R. H., Johnson, P. A., & Ragan, R. M. (1996). *Hydrology, FHWA-SA-96-067*. Washington, DC: Federal Highway Administration.

- Norma Mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015 Operación segura de presas.* (2015). México, D.F.
- Prieto Calderón, J. L., Martínez-Alegría López, R., Taboada Castro, J., Montequi Martín, I., & Sanz Lobón, G. (2017). Rotura de la presa de Vega de Tera, simulación hidráulica de la propagación de la avenida (Zamora, España). *DYNA*, 84(203), 45-54. doi:10.15446/dyna.v84n203.60544
- Protección Civil Guanajuato. (s.f.). Fenómeno Hidrometeorológico. Guanajuato.
- Ramírez, A. I. (2011). La seguridad de presas desde la perspectiva hidrológica. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(2), 157-173. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222011000200010&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200010&lng=es&tlng=es).
- Rodríguez Félix, A. (2016). *Influencia de las zonas de inundación en el tránsito de avenidas en cauces (Maestría en ingeniería)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez Vázquez, J. (2004). *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*. Sevilla, España.
- Seyoum, S. D., Vojinovic, Z., Price, R. K., & Weesaku, S. (2012). Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 23-34. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000485
- Timbe Castro, L., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *MASKANA*, 2(1), 91-98. doi:10.18537/mskn.02.01.07
- Vásquez Ojeda, J. A. (2003). Modelación Numérica en Hidráulica. Recuperado el 13 de Mayo de 2019, de [https://www.researchgate.net/publication/264879979\\_Modelacion\\_Numerica\\_en\\_Hidraulica\\_MODELACION\\_NUMERICA\\_EN\\_HIDRAULICA](https://www.researchgate.net/publication/264879979_Modelacion_Numerica_en_Hidraulica_MODELACION_NUMERICA_EN_HIDRAULICA)



Vega Roldán , O., & Arreguín Cortés, F. I. (1992). *Presas de almacenamiento y derivación*. División de estudios de posgrado, Facultad de ingeniería UNAM.

Woitrin-Bibot, E., Martínez-Arredondo, J. C., & Ramos-Arroyo, Y. R. (2015). Crecimiento urbano e incremento de riesgos hidrológicos en la ciudad de Guanajuato, México. *L'Ordinaire des Amériques*. doi:10.4000/ora.1937

Wright-Carr, D. C. (1989). Guanajuato Geography, history, and points of interest. *Field trip guide*, 125-154. doi:10.13140/2.1.2421.3447

## 9. ANEXOS

## 9.1 Anexo 1. Cálculo de la curva masa y curva masa unitaria.

Tabla 42 Datos para la obtención de la curva masa y curva masa unitaria (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)										
	11 marzo 2014	08 agosto 2014	13 agosto 2014	14 agosto 2014	19 agosto 2014	21 agosto 2014	04 septiembre 2014	05 septiembre 2014	13 septiembre 2014	02 octubre 2014	11 octubre 2014
10	0.4	0.2	0.4	1.4	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
20	0.2	0	0.8	0.8	1	1.8	0	0.6	0.4	3.8	0.4
30	0.2	0	0	1	1.2	0	0	1	0.2	4	0.2
40	0	0.2	0.2	0.4	3.6	0	0.4	0.6	0.4	4.6	0.6
50	0	0	2.4	0.2	5.4	0.2	4.6	0.8	0.2	1.4	0.4
60	0	0.2	2.6	0.2	2.4	0.2	6.8	0.6	0.2	0.4	0.2
70	0.2	0	0.4	0.4	0.6	0	7.4	0.6	0	0.4	0.4
80	0.6	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	10.2	0.6	0.2	0.4	0.2
90	0.4	0	0.2	0.6	0.8	0	9.8	0.6	0	0.2	0.2
100	0.2	0.2	0	0.2	0.8	0	7.6	0.4	0.2	0.2	0.2
110	0.2	0	0	0.2	1	0.2	2.6	0.4	0	0.2	0.2
120	0	0	0	0.4	1	0	0.6	0.2	0	0.2	0.2
130	0.2	0.2	0.2	0.4	0.8	0	0.6	0.2	0.2	0.4	0.2
140	0	0	0.4	0.6	0.8	0.4	0.4	0	0	0.2	0.2
150	0	0.2	0.4	0.4	0.2	2	0.2	0	0	0.4	0
160	0	0	0	0.4	0	1.4	0.2	0	0	0.4	0.2
170	0.2	0	0	0.2	0	1.2	0	0	0	0.2	0
180	0	0.2	0	0	0	1	0.2	0	0	0.4	0.2
190	0.2	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0.2	0
200	0	0	0	0.2	0	0.4	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.2	0.2
220	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.2	0
230	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>1.8</b>	<b>8.2</b>	<b>8.2</b>	<b>22</b>	<b>10.4</b>	<b>51.8</b>	<b>6.8</b>	<b>2.2</b>	<b>20.8</b>	<b>4.4</b>

Tabla 42 (continuación) Datos para la obtención de la curva masa y curva masa unitaria (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)											
	12 abril 2015	01 junio 2015	20 junio 2015	28 junio 2015	05 julio 2015	19 julio 2015	22 julio 2015	23 julio 2015	11 septiembre 2015	15 septiembre 2015	12 junio 2016	
10	0.2	0.6	0.4	0.6	0.2	0.8	1	1.2	0.4	0.2	0.4	
20	0	0.2	0.4	6.4	0	4.4	4.6	2	0.4	0.2	0.4	
30	0.2	0.2	0.4	8.4	0	0.2	1	1.8	0.2	0.2	0.2	
40	0.2	0.4	0.6	4	0.2	0.2	0.2	1.4	0	0	0.2	
50	0	0.8	0.4	1.2	0	0.4	0.2	1	0.2	0	0.4	
60	0.2	0.2	0.6	0.4	0	1.8	0	0.2	0.2	0.2	2	
70	0	1.2	0.8	0.2	0	2.6	0.2	0	0	0	1	
80	0	3.6	0.8	0.6	0.2	1.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	
90	0.2	2.2	0.6	0.8	0.8	1.2	0	0.2	0	0.4	0.6	
100	0	1.2	0.4	0.6	0.6	0.4	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	
110	0	0.2	0.2	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	1.8	0.2	0.6	
120	0.2	0.2	0.2	1.2	0.2	0.8	0	0.2	5.4	0.2	0.6	
130	2.4	0.2	0.4	1	0.2	0.2	0.2	0.2	3.6	0.2	0.8	
140	6	0	0	0.6	0.2	0.2	0	0.2	2.6	0.2	0.6	
150	5.4	0	0.2	0.4	0	0	0	0.2	2.4	0	0.4	
160	3.4	0	0	0.2	0.2	0	0	0.4	1.2	0.2	0.4	
170	1	0.2	0	0	0.4	0	0	0.2	1.2	0	0.6	
180	0	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0.6	0	0.6	
190	0	0	0	0	0.2	0	0	0.4	0.4	0	0.2	
200	0	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0	0.2	
210	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0	0.6	
220	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	
230	0	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0	0	
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	
<b>TOTAL</b>	<b>19.4</b>	<b>11.6</b>	<b>6.4</b>	<b>27.4</b>	<b>4.2</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>22.2</b>	<b>2.8</b>	<b>12</b>	

Tabla 42 (continuación) Datos para la obtención de la curva masa y curva masa unitaria (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)											
	13 junio 2016	06 julio 2016	06 julio 2016	12 julio 2016	12 julio 2016	12 julio 2016	14 julio 2016	11 agosto 2016	22 agosto 2016	26 agosto 2016	27 agosto 2016	27 agosto 2016
10	0.6	1.2	0.8	0.6	0.2	0.2	0.2	1	0.2	0.4	0.8	0.4
20	0.4	2	0	1.2	0.6	0	0	11.6	0.2	1	0.8	0.4
30	0.2	4.8	0	0.8	0.8	0	0	6.6	0	0.6	1.2	0.4
40	0	3.2	0.6	0.4	13.4	0.2	0.2	0.4	0	1.8	2.6	0.4
50	0.4	2.2	1.4	0.2	7	0.2	0.2	0	0.2	0.8	1.4	0.4
60	0.2	2.4	1.4	0.2	3.2	0	0	0	0.4	0.6	0.8	0.2
70	0.2	0.2	1.8	0.8	1.8	0	0	0.2	0.2	0.4	0.6	0.2
80	0.2	0	0.2	0.8	0.6	0.2	0.2	0.8	0.4	0.6	0.2	0.4
90	0.2	0.2	0.6	1	0.4	1.6	0.4	0.4	0.8	0.6	0.2	0.2
100	0	0	0.2	0.6	0.4	3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.2	0.2
110	0	0.4	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.8	0.4	0.2
120	0.2	0.6	0.2	1	0.2	0.4	0.4	0.6	1	0.4	0.4	0.2
130	0.4	0.4	0	1	0	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	0
140	0	0	0.2	0.8	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	1	0.2
150	0.2	0.2	0.4	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0.4	0
160	0	0	2	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2	0	0.2	0.2
170	0	0.2	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0.4	0.4	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
190	0	0.4	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0.2	0.4	0.2	0	0	0	0	0.2	0	0	0
210	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	3.2	19.2	12.6	11	29.4	7.6	23.6	5.8	9.6	11.8	4	4

Tabla 42 (continuación) Datos para la obtención de la curva masa y curva masa unitaria (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)											
	29 agosto 2016	24 septiembre 2016	03 octubre 2016	06 octubre 2016	12 noviembre 2016	12 marzo 2017	30 mayo 2017	26 junio 2017	13 julio 2017	19 julio 2017	26 julio 2017	
10	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	
20	0	3.6	0.2	0.2	0	0.4	0.2	0.2	0	0.8	0.2	
30	0	4.2	0	0.2	0.2	0.8	0.2	0	0	0.8	0	
40	0.8	6	0.2	0.2	0.2	1	0	0.2	0.2	0.4	0	
50	0.8	2.8	0.4	0.4	0.2	1	0.6	0.2	0	0.6	0	
60	0.2	1.8	0.4	0.4	0.2	0.8	0.2	0	0.2	0.4	0.2	
70	0.2	1.4	0	0.4	0.4	0.8	0.2	0.2	0	0.4	0.4	
80	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2	0.8	0.4	0	0.2	0.2	0.2	
90	1.8	0.2	0	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0.2	0.4	
100	0.6	0.2	0	0	0.2	0.4	0	0.2	0.2	0.4	0.6	
110	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2	0.4	
120	0.6	0.2	5	0.2	0	0	0	0.2	0	0.2	0.2	
130	0.4	0.2	9.6	0	0.2	0.2	0.2	0.6	0.4	0.2	0	
140	0.8	0.2	2.2	0	0	0	0.2	0.4	0	0.2	0	
150	0.8	0.4	0.6	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0	
160	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.4	0.2	0.2	0	0.4	
170	0.2	0.4	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.2	
180	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	
190	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
200	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
210	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
220	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
230	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	8.8	24.6	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6	

Tabla 42 (continuación) Datos para la obtención de la curva masa y curva masa unitaria (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)											MEDIA	CURVA MASA MEDIA	
	07 agosto 2017	25 septiembre 2017	25 septiembre 2017	05 mayo 2018	13 junio 2018	19 junio 2018	26 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018			
10	0.6	0.2	0.2	0.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1.281	0.006
20	2.2	0	4	4	4	10	13	13	7	7	1	1	3.070	0.019
30	1.4	0	3.2	3.2	4	8	8	8	6	6	3	0	3.439	0.035
40	0.2	0.2	1.6	1.6	1	8	5	5	6	6	1	1	4.116	0.053
50	0.2	0.2	0.6	0.6	1	3	5	5	1	1	0	1	4.446	0.073
60	0	0	0.2	0.2	1	2	3	3	1	1	1	1	4.965	0.095
70	0.4	0.2	0.4	0.4	1	2	2	2	1	1	0	1	5.530	0.120
80	0.8	0.2	0.6	0.6	1	2	1	1	1	1	1	1	6.281	0.148
90	1	1.2	0.4	0.4	1	3	1	1	1	1	1	1	7.021	0.180
100	0.4	1.6	0.6	0.6	0	4	1	1	1	1	1	1	7.618	0.214
110	0.2	2.4	0.6	0.6	0	2	3	3	1	1	1	1	8.200	0.250
120	0.4	1	0.6	0.6	1	2	4	4	1	1	1	1	9.046	0.291
130	0	0	0.6	0.6	1	2	5	5	1	1	1	1	9.835	0.335
140	0.2	0.2	0.2	0.2	0	1	1	1	1	1	1	1	10.291	0.381
150	0	0.6	0.2	0.2	0	1	1	1	0	0	1	1	10.909	0.430
160	0.2	0.2	0.2	0.2	0	1	1	1	0	0	1	0	11.533	0.481
170	0	0.2	0.2	0.6	1	1	1	1	0	0	1	0	12.147	0.536
180	0	0	0.6	0.6	1	1	2	2	0	0	1	1	12.839	0.593
190	0	0	0.2	0.2	0	1	1	1	0	0	1	0	13.453	0.653
200	0	0	0	0.4	0	1	1	1	0	0	1	0	14.144	0.717
210	0	0	0.2	0.2	0	1	1	1	0	0	1	0	14.835	0.783
220	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	15.460	0.852
230	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	16.165	0.925
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.853	1.000
<b>TOTAL</b>	<b>8.2</b>	<b>8.4</b>	<b>16.6</b>	<b>19</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>30</b>	<b>24</b>	<b>14</b>	<b>223.474</b>				



Tabla 43 Cálculos realizados para la obtención de la curva masa (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)										
	11 marzo 2014	08 agosto 2014	13 agosto 2014	14 agosto 2014	19 agosto 2014	21 agosto 2014	04 septiembre 2014	05 septiembre 2014	13 septiembre 2014	02 octubre 2014	11 octubre 2014
10	0.4	0.2	0.4	1.4	2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.2	0.2
20	0.6	0.2	1.2	2.2	3	2	0.2	0.2	0.6	6	0.6
30	0.8	0.2	1.2	3.2	4.2	2	0.2	0.2	0.8	10	0.8
40	0.8	0.4	1.4	3.6	7.8	2	0.6	0.6	1.2	14.6	1.4
50	0.8	0.4	3.8	3.8	13.2	2.2	5.2	3.2	1.4	16	1.8
60	0.8	0.6	6.4	4	15.6	2.4	12	3.8	1.6	16.4	2
70	1	0.6	6.8	4.4	16.2	2.4	19.4	4.4	1.6	16.8	2.4
80	1.6	0.8	7	4.6	16.6	2.6	29.6	5	1.8	17.2	2.6
90	2	0.8	7.2	5.2	17.4	2.6	39.4	5.6	1.8	17.4	2.8
100	2.2	1	7.2	5.4	18.2	2.6	47	6	2	17.6	3
110	2.4	1	7.2	5.6	19.2	2.8	49.6	6.4	2	17.8	3.2
120	2.4	1	7.2	6	20.2	2.8	50.2	6.6	2	18	3.4
130	2.6	1.2	7.4	6.4	21	2.8	50.8	6.8	2.2	18.4	3.6
140	2.6	1.2	7.8	7	21.8	3.2	51.2	6.8	2.2	18.6	3.8
150	2.6	1.4	8.2	7.4	22	5.2	51.4	6.8	2.2	19	3.8
160	2.6	1.4	8.2	7.8	22	6.6	51.6	6.8	2.2	19.4	4
170	2.8	1.4	8.2	8	22	7.8	51.6	6.8	2.2	19.6	4
180	2.8	1.6	8.2	8	22	8.8	51.8	6.8	2.2	20	4.2
190	3	1.6	8.2	8	22	9.6	51.8	6.8	2.2	20.2	4.2
200	3	1.6	8.2	8.2	22	10	51.8	6.8	2.2	20.2	4.2
210	3	1.6	8.2	8.2	22	10.2	51.8	6.8	2.2	20.4	4.4
220	3	1.6	8.2	8.2	22	10.4	51.8	6.8	2.2	20.6	4.4
230	3	1.8	8.2	8.2	22	10.4	51.8	6.8	2.2	20.6	4.4
240	3	1.8	8.2	8.2	22	10.4	51.8	6.8	2.2	20.8	4.4

Tabla 43 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)											
	12 abril 2015	01 junio 2015	20 junio 2015	28 junio 2015	05 julio 2015	19 julio 2015	22 julio 2015	23 julio 2015	11 septiembre 2015	15 septiembre 2015	12 junio 2016	
10	0.2	0.6	0.4	0.6	0.2	0.8	1	1.2	0.4	0.2	0.4	
20	0.2	0.8	0.8	7	0.2	5.2	5.6	3.2	0.8	0.4	0.8	
30	0.4	1	1.2	15.4	0.2	5.4	6.6	5	1	0.6	1	
40	0.6	1.4	1.8	19.4	0.4	5.6	6.8	6.4	1	0.6	1.2	
50	0.6	2.2	2.2	20.6	0.4	6	7	7.4	1.2	0.6	1.6	
60	0.8	2.4	2.8	21	0.4	7.8	7	7.6	1.4	0.8	3.6	
70	0.8	3.6	3.6	21.2	0.4	10.4	7.2	7.6	1.4	0.8	4.6	
80	0.8	7.2	4.4	21.8	0.6	12	7.4	7.8	1.6	1	5.2	
90	1	9.4	5	22.6	1.4	13.2	7.4	8	1.6	1.4	5.8	
100	1	10.6	5.4	23.2	2	13.6	7.6	8.2	2	1.8	6.4	
110	1	10.8	5.6	24	2.4	13.8	7.8	8.4	3.8	2	7	
120	1.2	11	5.8	25.2	2.6	14.6	7.8	8.6	9.2	2.2	7.6	
130	3.6	11.2	6.2	26.2	2.8	14.8	8	8.8	12.8	2.4	8.4	
140	9.6	11.2	6.2	26.8	3	15	8	9	15.4	2.6	9	
150	15	11.2	6.4	27.2	3	15	8	9.2	17.8	2.6	9.4	
160	18.4	11.2	6.4	27.4	3.2	15	8	9.6	19	2.8	9.8	
170	19.4	11.4	6.4	27.4	3.6	15	8	9.8	20.2	2.8	10.4	
180	19.4	11.4	6.4	27.4	3.8	15	8	10	20.8	2.8	11	
190	19.4	11.4	6.4	27.4	4	15	8	10.4	21.2	2.8	11.2	
200	19.4	11.6	6.4	27.4	4	15	8	10.6	21.4	2.8	11.4	
210	19.4	11.6	6.4	27.4	4	15	8	10.8	21.6	2.8	12	
220	19.4	11.6	6.4	27.4	4	15	8	10.8	21.8	2.8	12	
230	19.4	11.6	6.4	27.4	4.2	15	8	11	22	2.8	12	
240	19.4	11.6	6.4	27.4	4.2	15	8	11	22.2	2.8	12	

Tabla 43 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)										
	13 junio 2016	06 julio 2016	06 julio 2016	12 julio 2016	12 julio 2016	14 julio 2016	11 agosto 2016	22 agosto 2016	26 agosto 2016	27 agosto 2016	27 agosto 2016
10	0.6	1.2	0.8	0.6	0.2	0.2	1	0.2	0.4	0.8	0.4
20	1	3.2	0.8	1.8	0.8	0.2	12.6	0.4	1.4	1.6	0.8
30	1.2	8	0.8	2.6	1.6	0.2	19.2	0.4	2	2.8	1.2
40	1.2	11.2	1.4	3	15	0.4	19.6	0.4	3.8	5.4	1.6
50	1.6	13.4	2.8	3.2	22	0.6	19.6	0.6	4.6	6.8	2
60	1.8	15.8	4.2	3.4	25.2	0.6	19.6	1	5.2	7.6	2.2
70	2	16	6	4.2	27	0.6	19.8	1.2	5.6	8.2	2.4
80	2.2	16	6.2	5	27.6	0.8	20.6	1.6	6.2	8.4	2.8
90	2.4	16.2	6.8	6	28	2.4	21	2.4	6.8	8.6	3
100	2.4	16.2	7	6.6	28.4	5.4	21.6	3.2	7.6	8.8	3.2
110	2.4	16.6	7.2	7.2	29	6	22.2	3.6	8.4	9.2	3.4
120	2.6	17.2	7.4	8.2	29.2	6.4	22.8	4.6	8.8	9.6	3.6
130	3	17.6	7.4	9.2	29.2	6.8	23.4	5	9.2	10.2	3.6
140	3	17.6	7.6	10	29.4	7.2	23.6	5.2	9.4	11.2	3.8
150	3.2	17.8	8	10.2	29.4	7.4	23.6	5.4	9.6	11.6	3.8
160	3.2	17.8	10	10.4	29.4	7.6	23.6	5.6	9.6	11.8	4
170	3.2	18	10.8	10.6	29.4	7.6	23.6	5.6	9.6	11.8	4
180	3.2	18.4	11.2	10.8	29.4	7.6	23.6	5.6	9.6	11.8	4
190	3.2	18.8	11.6	10.8	29.4	7.6	23.6	5.6	9.6	11.8	4
200	3.2	19	12	11	29.4	7.6	23.6	5.8	9.6	11.8	4
210	3.2	19.2	12.2	11	29.4	7.6	23.6	5.8	9.6	11.8	4
220	3.2	19.2	12.4	11	29.4	7.6	23.6	5.8	9.6	11.8	4
230	3.2	19.2	12.4	11	29.4	7.6	23.6	5.8	9.6	11.8	4
240	3.2	19.2	12.6	11	29.4	7.6	23.6	5.8	9.6	11.8	4

Tabla 43 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)										
	29 agosto 2016	24 septiembre 2016	03 octubre 2016	06 octubre 2016	12 noviembre 2016	12 marzo 2017	30 mayo 2017	26 junio 2017	13 julio 2017	19 julio 2017	26 julio 2017
10	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2
20	0.4	3.8	0.6	0.4	0.2	0.6	0.8	0.4	0.2	1	0.4
30	0.4	8	0.6	0.6	0.4	1.4	1	0.4	0.2	1.8	0.4
40	1.2	14	0.8	0.8	0.6	2.4	1	0.6	0.4	2.2	0.4
50	2	16.8	1.2	1.2	0.8	3.4	1.6	0.8	0.4	2.8	0.4
60	2.2	18.6	1.6	1.6	1	4.2	1.8	0.8	0.6	3.2	0.6
70	2.4	20	1.6	2	1.4	5	2	1	0.6	3.6	1
80	3	20.4	1.8	2.2	1.6	5.8	2.4	1	0.8	3.8	1.2
90	4.8	20.6	1.8	2.2	1.8	6.4	2.6	1	0.8	4	1.6
100	5.4	20.8	1.8	2.2	2	6.8	2.6	1.2	1	4.4	2.2
110	5.6	21	1.8	2.2	2.2	6.8	2.8	1.4	1	4.6	2.6
120	6.2	21.2	6.8	2.4	2.2	6.8	2.8	1.6	1	4.8	2.8
130	6.6	21.4	16.4	2.4	2.4	7	3	2.2	1.4	5	2.8
140	7.4	21.6	18.6	2.4	2.4	7	3.2	2.6	1.4	5.2	2.8
150	8.2	22	19.2	2.4	2.4	7	3.4	2.6	1.4	5.4	2.8
160	8.4	22.2	19.4	2.6	2.6	7	3.8	2.8	1.6	5.4	3.2
170	8.6	22.6	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.4
180	8.6	23	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6
190	8.6	23.4	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6
200	8.8	23.6	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6
210	8.8	24	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6
220	8.8	24.2	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6
230	8.8	24.6	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6
240	8.8	24.6	19.4	2.6	2.6	7	4	2.8	1.6	5.4	3.6

Tabla 43 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa (elaboración propia).

Tiempo	Precipitación (mm)									
	07 agosto 2017	25 septiembre 2017	25 septiembre 2017	05 mayo 2018	13 junio 2018	19 junio 2018	26 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018
10	0.6	0.2	0.2	0.2	1	1	1	1	4	1
20	2.8	0.2	0.2	4.2	5	11	14	8	5	2
30	4.2	0.2	0.2	7.4	9	19	22	14	8	2
40	4.4	0.4	0.4	9	10	27	27	20	9	3
50	4.6	0.6	0.6	9.6	11	30	32	21	9	4
60	4.6	0.6	0.6	9.8	12	32	35	22	10	5
70	5	0.8	0.8	10.2	13	34	37	23	10	6
80	5.8	1	1	10.8	14	36	38	24	11	7
90	6.8	2.2	2.2	11.2	15	39	39	25	12	8
100	7.2	3.8	3.8	11.8	15	43	40	26	13	8
110	7.4	6.2	6.2	12.4	15	45	43	27	14	9
120	7.8	7.2	7.2	13	16	47	47	28	15	10
130	7.8	7.2	7.2	13.6	17	49	52	29	16	11
140	8	7.4	7.4	13.8	17	50	53	30	17	12
150	8	8	8	14	17	51	54	30	18	13
160	8.2	8.2	8.2	14.2	17	52	55	30	19	13
170	8.2	8.4	8.4	14.8	18	53	56	30	20	13
180	8.2	8.4	8.4	15.4	19	54	58	30	21	14
190	8.2	8.4	8.4	15.6	19	55	59	30	22	14
200	8.2	8.4	8.4	16	19	56	60	30	23	14
210	8.2	8.4	8.4	16.2	19	57	61	30	24	14
220	8.2	8.4	8.4	16.4	19	57	61	30	24	14
230	8.2	8.4	8.4	16.6	19	57	61	30	24	14
240	8.2	8.4	8.4	16.6	19	57	61	30	24	14

Tabla 44 Cálculos realizados para la obtención de la curva masa unitaria (elaboración propia).

Tiempo	Intervalo de tiempo unitario	Precipitación (mm)													
		11 marzo 2014	08 agosto 2014	13 agosto 2014	14 agosto 2014	19 agosto 2014	21 agosto 2014	04 septiembre 2014	05 septiembre 2014	13 septiembre 2014	02 octubre 2014	11 octubre 2014			
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.04	0.133	0.111	0.049	0.171	0.091	0.091	0.019	0.004	0.029	0.091	0.106	0.045	0.045	0.045
20	0.08	0.200	0.111	0.146	0.268	0.136	0.136	0.192	0.004	0.118	0.273	0.288	0.136	0.136	0.136
30	0.13	0.267	0.111	0.146	0.390	0.191	0.191	0.192	0.004	0.265	0.364	0.481	0.182	0.182	0.182
40	0.17	0.267	0.222	0.171	0.439	0.355	0.355	0.192	0.012	0.353	0.545	0.702	0.318	0.318	0.318
50	0.21	0.267	0.222	0.463	0.463	0.600	0.600	0.212	0.100	0.471	0.636	0.769	0.409	0.409	0.409
60	0.25	0.267	0.333	0.780	0.488	0.709	0.709	0.231	0.232	0.559	0.727	0.788	0.455	0.455	0.455
70	0.29	0.333	0.333	0.829	0.537	0.736	0.736	0.231	0.375	0.647	0.727	0.808	0.545	0.545	0.545
80	0.33	0.533	0.444	0.854	0.561	0.755	0.755	0.250	0.571	0.735	0.818	0.827	0.591	0.591	0.591
90	0.38	0.667	0.444	0.878	0.634	0.791	0.791	0.250	0.761	0.824	0.818	0.837	0.636	0.636	0.636
100	0.42	0.733	0.556	0.878	0.659	0.827	0.827	0.250	0.907	0.882	0.909	0.846	0.682	0.682	0.682
110	0.46	0.800	0.556	0.878	0.683	0.873	0.873	0.269	0.958	0.941	0.909	0.856	0.727	0.727	0.727
120	0.50	0.800	0.556	0.878	0.732	0.918	0.918	0.269	0.969	0.971	0.909	0.865	0.773	0.773	0.773
130	0.54	0.867	0.667	0.902	0.780	0.955	0.955	0.269	0.981	1.000	1.000	0.885	0.818	0.818	0.818
140	0.58	0.867	0.667	0.951	0.854	0.991	0.991	0.308	0.988	1.000	1.000	0.894	0.864	0.864	0.864
150	0.63	0.867	0.778	1.000	0.902	1.000	1.000	0.500	0.992	1.000	1.000	0.913	0.864	0.864	0.864
160	0.67	0.867	0.778	1.000	0.951	1.000	1.000	0.635	0.996	1.000	1.000	0.933	0.909	0.909	0.909
170	0.71	0.933	0.778	1.000	0.976	1.000	1.000	0.750	0.996	1.000	1.000	0.942	0.909	0.909	0.909
180	0.75	0.933	0.889	1.000	0.976	1.000	1.000	0.846	1.000	1.000	1.000	0.962	0.955	0.955	0.955
190	0.79	1.000	0.889	1.000	0.976	1.000	1.000	0.923	1.000	1.000	1.000	0.971	0.955	0.955	0.955
200	0.83	1.000	0.889	1.000	1.000	1.000	1.000	0.962	1.000	1.000	1.000	0.971	0.955	0.955	0.955
210	0.88	1.000	0.889	1.000	1.000	1.000	1.000	0.981	1.000	1.000	1.000	0.981	1.000	1.000	1.000
220	0.92	1.000	0.889	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.990	1.000	1.000	1.000
230	0.96	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.990	1.000	1.000	1.000
240	1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000



Tabla 44 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa unitaria (elaboración propia).

Intervalo de tiempo unitario	Precipitación (mm)											
	12 abril 2015	01 junio 2015	20 junio 2015	28 junio 2015	05 julio 2015	19 julio 2015	22 julio 2015	23 julio 2015	11 septiembre 2015	15 septiembre 2015	12 junio 2016	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.042	0.010	0.052	0.063	0.022	0.048	0.053	0.125	0.109	0.018	0.071	0.033	0.033
0.083	0.010	0.069	0.125	0.255	0.048	0.347	0.700	0.291	0.036	0.143	0.067	0.067
0.125	0.021	0.086	0.188	0.562	0.048	0.360	0.825	0.455	0.045	0.214	0.083	0.083
0.167	0.031	0.121	0.281	0.708	0.095	0.373	0.850	0.582	0.045	0.214	0.100	0.100
0.208	0.031	0.190	0.344	0.752	0.095	0.400	0.875	0.673	0.054	0.214	0.133	0.133
0.250	0.041	0.207	0.438	0.766	0.095	0.520	0.875	0.691	0.063	0.286	0.300	0.300
0.292	0.041	0.310	0.563	0.774	0.095	0.693	0.900	0.691	0.063	0.286	0.383	0.383
0.333	0.041	0.621	0.688	0.796	0.143	0.800	0.925	0.709	0.072	0.357	0.433	0.433
0.375	0.052	0.810	0.781	0.825	0.333	0.880	0.925	0.727	0.072	0.500	0.483	0.483
0.417	0.052	0.914	0.844	0.847	0.476	0.907	0.950	0.745	0.090	0.643	0.533	0.533
0.458	0.052	0.931	0.875	0.876	0.571	0.920	0.975	0.764	0.171	0.714	0.583	0.583
0.500	0.062	0.948	0.906	0.920	0.619	0.973	0.975	0.782	0.414	0.786	0.633	0.633
0.542	0.186	0.966	0.969	0.956	0.667	0.987	1.000	0.800	0.577	0.857	0.700	0.700
0.583	0.495	0.966	0.969	0.978	0.714	1.000	1.000	0.818	0.694	0.929	0.750	0.750
0.625	0.773	0.966	1.000	0.993	0.714	1.000	1.000	0.836	0.802	0.929	0.783	0.783
0.667	0.948	0.966	1.000	1.000	0.762	1.000	1.000	0.873	0.856	1.000	0.817	0.817
0.708	1.000	0.983	1.000	1.000	0.857	1.000	1.000	0.891	0.910	1.000	0.867	0.867
0.750	1.000	0.983	1.000	1.000	0.905	1.000	1.000	0.909	0.937	1.000	0.917	0.917
0.792	1.000	0.983	1.000	1.000	0.952	1.000	1.000	0.945	0.955	1.000	0.933	0.933
0.833	1.000	1.000	1.000	1.000	0.952	1.000	1.000	0.964	0.964	1.000	0.950	0.950
0.875	1.000	1.000	1.000	1.000	0.952	1.000	1.000	0.982	0.973	1.000	1.000	1.000
0.917	1.000	1.000	1.000	1.000	0.952	1.000	1.000	0.982	0.982	1.000	1.000	1.000
0.958	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.991	1.000	1.000	1.000
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 44 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa unitaria (elaboración propia).

Intervalo de tiempo unitario	Precipitación (mm)											
	13 junio 2016	06 julio 2016	06 julio 2016	12 julio 2016	12 julio 2016	12 julio 2016	14 julio 2016	11 agosto 2016	22 agosto 2016	26 agosto 2016	27 agosto 2016	27 agosto 2016
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.042	0.188	0.063	0.055	0.007	0.026	0.042	0.034	0.042	0.034	0.042	0.068	0.100
0.083	0.313	0.167	0.164	0.027	0.026	0.534	0.069	0.146	0.069	0.146	0.136	0.200
0.125	0.375	0.417	0.063	0.236	0.054	0.814	0.069	0.208	0.069	0.208	0.237	0.300
0.167	0.375	0.583	0.111	0.273	0.510	0.831	0.069	0.396	0.069	0.396	0.458	0.400
0.208	0.500	0.698	0.222	0.291	0.748	0.831	0.103	0.479	0.103	0.479	0.576	0.500
0.250	0.563	0.823	0.333	0.309	0.857	0.831	0.172	0.542	0.172	0.542	0.644	0.550
0.292	0.625	0.833	0.476	0.382	0.918	0.839	0.207	0.583	0.207	0.583	0.695	0.600
0.333	0.688	0.833	0.492	0.455	0.939	0.873	0.276	0.646	0.276	0.646	0.712	0.700
0.375	0.750	0.844	0.540	0.545	0.952	0.890	0.414	0.708	0.414	0.708	0.729	0.750
0.417	0.750	0.844	0.556	0.600	0.966	0.915	0.552	0.792	0.552	0.792	0.746	0.800
0.458	0.750	0.865	0.571	0.655	0.986	0.941	0.621	0.875	0.621	0.875	0.780	0.850
0.500	0.813	0.896	0.587	0.745	0.993	0.966	0.793	0.917	0.793	0.917	0.814	0.900
0.542	0.938	0.917	0.587	0.836	0.993	0.992	0.862	0.958	0.862	0.958	0.864	0.900
0.583	0.938	0.917	0.603	0.909	1.000	1.000	0.897	0.979	0.897	0.979	0.949	0.950
0.625	1.000	0.927	0.635	0.927	1.000	1.000	0.931	1.000	0.931	1.000	0.983	0.950
0.667	1.000	0.927	0.794	0.945	1.000	1.000	0.966	1.000	0.966	1.000	1.000	1.000
0.708	1.000	0.938	0.857	0.964	1.000	1.000	0.966	1.000	0.966	1.000	1.000	1.000
0.750	1.000	0.958	0.889	0.982	1.000	1.000	0.966	1.000	0.966	1.000	1.000	1.000
0.792	1.000	0.979	0.921	0.982	1.000	1.000	0.966	1.000	0.966	1.000	1.000	1.000
0.833	1.000	0.990	0.952	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.875	1.000	1.000	0.968	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.917	1.000	1.000	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.958	1.000	1.000	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 44 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa unitaria (elaboración propia).

Intervalo de tiempo unitario	Precipitación (mm)											
	29 agosto 2016	24 septiembre 2016	03 octubre 2016	06 octubre 2016	12 noviembre 2016	12 marzo 2017	30 mayo 2017	26 junio 2017	13 julio 2017	19 julio 2017	26 julio 2017	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.042	0.045	0.008	0.021	0.077	0.077	0.029	0.150	0.071	0.125	0.037	0.056	0.056
0.083	0.045	0.154	0.031	0.154	0.077	0.086	0.200	0.143	0.125	0.185	0.111	0.111
0.125	0.045	0.325	0.031	0.231	0.154	0.200	0.250	0.143	0.125	0.333	0.111	0.111
0.167	0.136	0.569	0.041	0.308	0.231	0.343	0.250	0.214	0.250	0.407	0.111	0.111
0.208	0.227	0.683	0.062	0.462	0.308	0.486	0.400	0.286	0.250	0.519	0.111	0.111
0.250	0.250	0.756	0.082	0.615	0.385	0.600	0.450	0.286	0.375	0.593	0.167	0.167
0.292	0.273	0.813	0.082	0.769	0.538	0.714	0.500	0.357	0.375	0.667	0.278	0.278
0.333	0.341	0.829	0.093	0.846	0.615	0.829	0.600	0.357	0.500	0.704	0.333	0.333
0.375	0.545	0.837	0.093	0.846	0.692	0.914	0.650	0.357	0.500	0.741	0.444	0.444
0.417	0.614	0.846	0.093	0.846	0.769	0.971	0.650	0.429	0.625	0.815	0.611	0.611
0.458	0.636	0.854	0.093	0.846	0.846	0.971	0.700	0.500	0.625	0.852	0.722	0.722
0.500	0.705	0.862	0.351	0.923	0.846	0.971	0.700	0.571	0.625	0.889	0.778	0.778
0.542	0.750	0.870	0.845	0.923	0.923	1.000	0.750	0.786	0.875	0.926	0.778	0.778
0.583	0.841	0.878	0.959	0.923	0.923	1.000	0.800	0.929	0.875	0.963	0.778	0.778
0.625	0.932	0.894	0.990	0.923	0.923	1.000	0.850	0.929	0.875	1.000	0.778	0.778
0.667	0.955	0.902	1.000	1.000	1.000	1.000	0.950	1.000	1.000	1.000	0.889	0.889
0.708	0.977	0.919	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.944	0.944
0.750	0.977	0.935	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.792	0.977	0.951	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.833	1.000	0.959	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.875	1.000	0.976	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.917	1.000	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.958	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 44 (continuación) Cálculos realizados para la obtención de la curva masa unitaria (elaboración propia).

Intervalo de tiempo unitario	Precipitación (mm)										masa media	Altura de precipitación unitaria	
	07 agosto 2017	25 septiembre 2017	25 septiembre 2017	05 mayo 2018	13 junio 2018	19 junio 2018	26 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018	27 junio 2018			
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.042	0.073	0.024	0.012	0.053	0.018	0.016	0.033	0.167	0.071	0.061	0.061	0.061	0.061
0.083	0.341	0.024	0.253	0.263	0.193	0.230	0.267	0.208	0.143	0.164	0.164	0.164	0.104
0.125	0.512	0.024	0.446	0.474	0.333	0.361	0.467	0.333	0.143	0.242	0.242	0.242	0.078
0.167	0.537	0.048	0.542	0.526	0.474	0.443	0.667	0.375	0.214	0.323	0.323	0.323	0.080
0.208	0.561	0.071	0.578	0.579	0.526	0.525	0.700	0.375	0.286	0.390	0.390	0.390	0.067
0.250	0.561	0.071	0.590	0.632	0.561	0.574	0.733	0.417	0.357	0.449	0.449	0.449	0.059
0.292	0.610	0.095	0.614	0.684	0.596	0.607	0.767	0.417	0.429	0.500	0.500	0.500	0.051
0.333	0.707	0.119	0.651	0.737	0.632	0.623	0.800	0.458	0.500	0.559	0.559	0.559	0.059
0.375	0.829	0.262	0.675	0.789	0.684	0.639	0.833	0.500	0.571	0.619	0.619	0.619	0.060
0.417	0.878	0.452	0.711	0.789	0.754	0.656	0.867	0.542	0.571	0.676	0.676	0.676	0.057
0.458	0.902	0.738	0.747	0.789	0.789	0.705	0.900	0.583	0.643	0.717	0.717	0.717	0.041
0.500	0.951	0.857	0.783	0.842	0.825	0.770	0.933	0.625	0.714	0.762	0.762	0.762	0.046
0.542	0.951	0.857	0.819	0.895	0.860	0.852	0.967	0.667	0.786	0.821	0.821	0.821	0.058
0.583	0.976	0.881	0.831	0.895	0.877	0.869	1.000	0.708	0.857	0.858	0.858	0.858	0.037
0.625	0.976	0.952	0.843	0.895	0.895	0.885	1.000	0.750	0.929	0.889	0.889	0.889	0.031
0.667	1.000	0.976	0.855	0.895	0.912	0.902	1.000	0.792	0.929	0.922	0.922	0.922	0.033
0.708	1.000	1.000	0.892	0.947	0.930	0.918	1.000	0.833	0.929	0.941	0.941	0.941	0.019
0.750	1.000	1.000	0.928	1.000	0.947	0.951	1.000	0.875	1.000	0.958	0.958	0.958	0.017
0.792	1.000	1.000	0.940	1.000	0.965	0.967	1.000	0.917	1.000	0.969	0.969	0.969	0.010
0.833	1.000	1.000	0.964	1.000	0.982	0.984	1.000	0.958	1.000	0.978	0.978	0.978	0.009
0.875	1.000	1.000	0.976	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.986	0.986	0.986	0.008
0.917	1.000	1.000	0.988	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.990	0.990	0.990	0.004
0.958	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.996	0.996	0.996	0.007
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.004



## 9.2 Anexo 2. Mapas de máximos para las lluvias de diseño

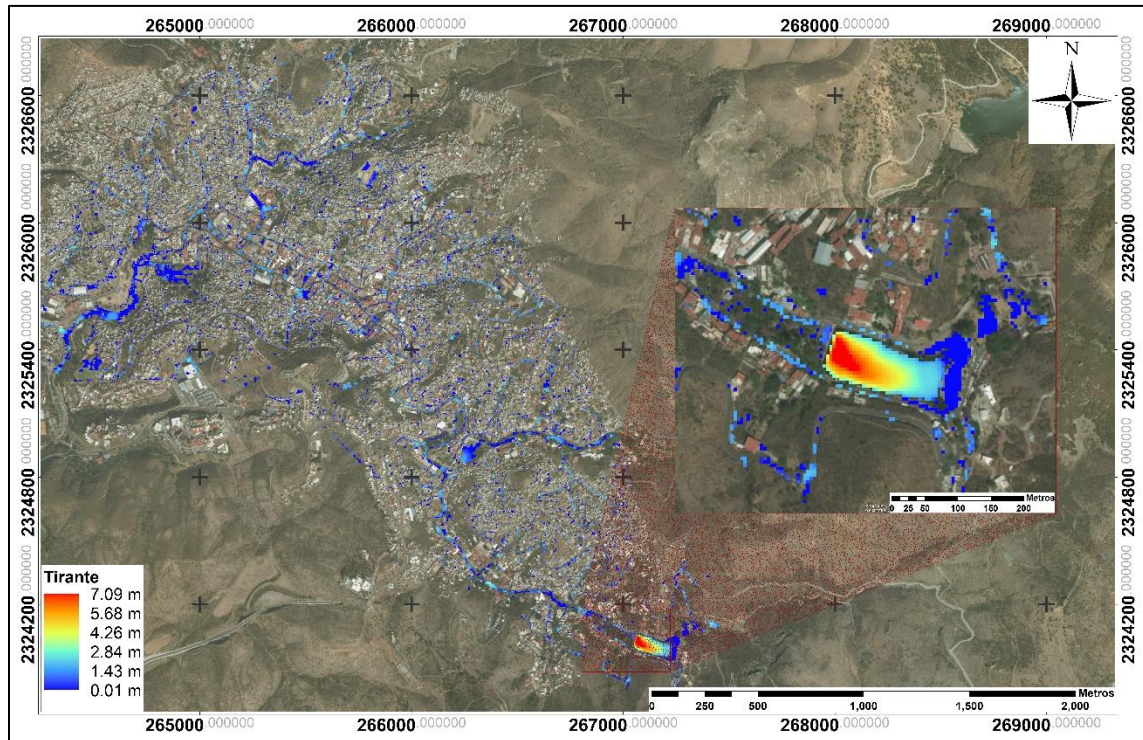


Figura 96 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).

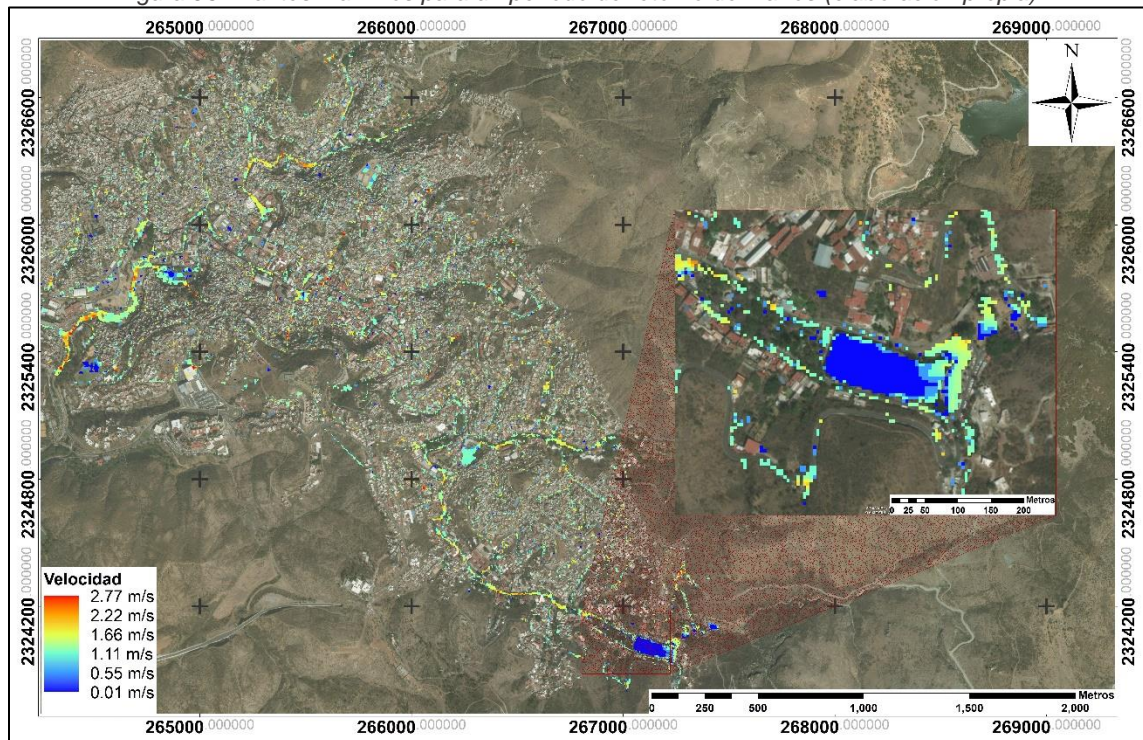


Figura 97 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).



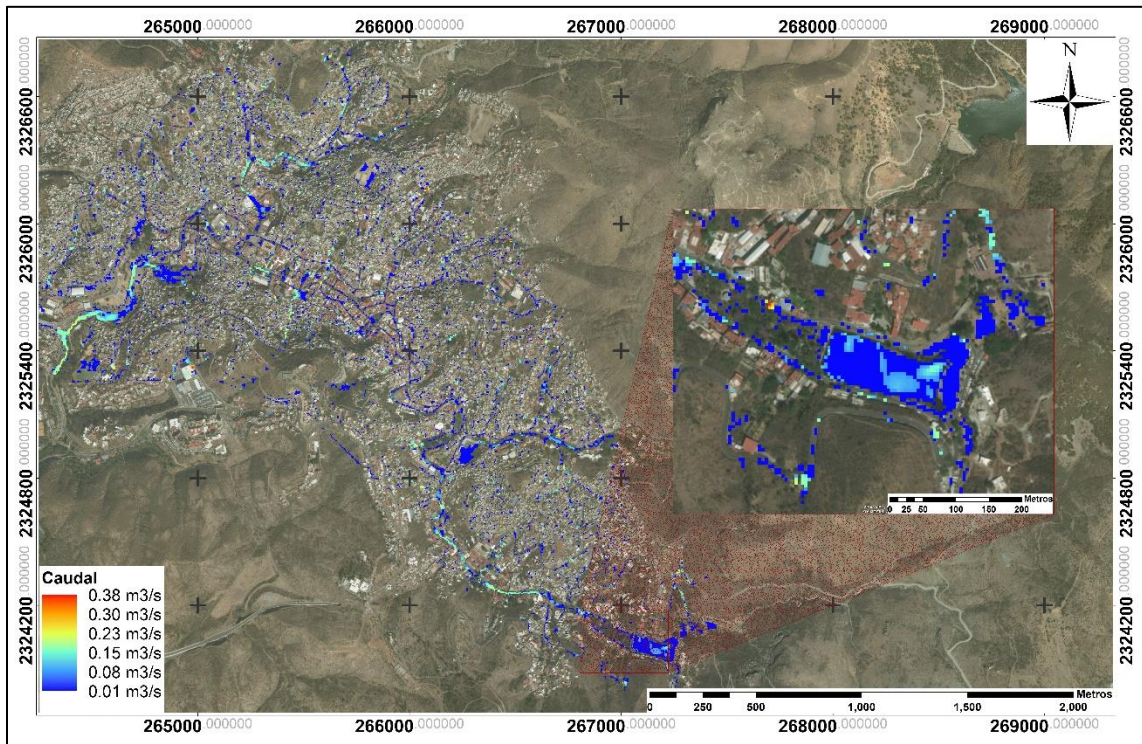


Figura 98 Caudales máximos para un periodo de retorno de 2 años (elaboración propia).

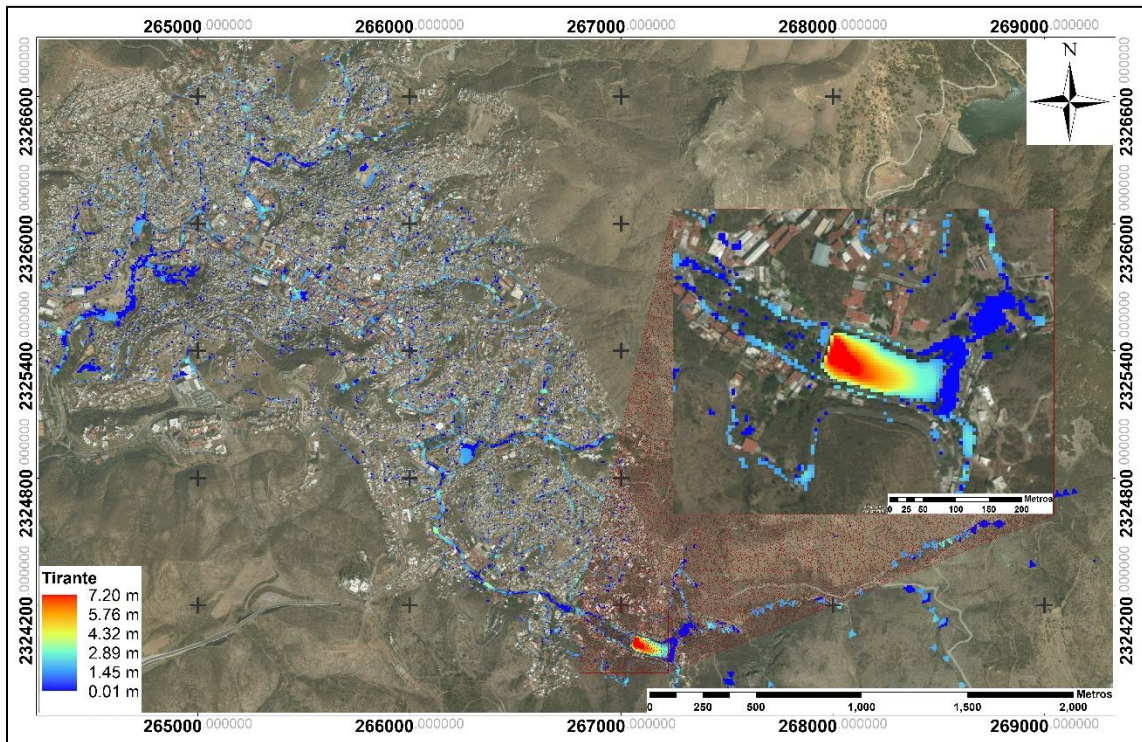


Figura 99 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia).



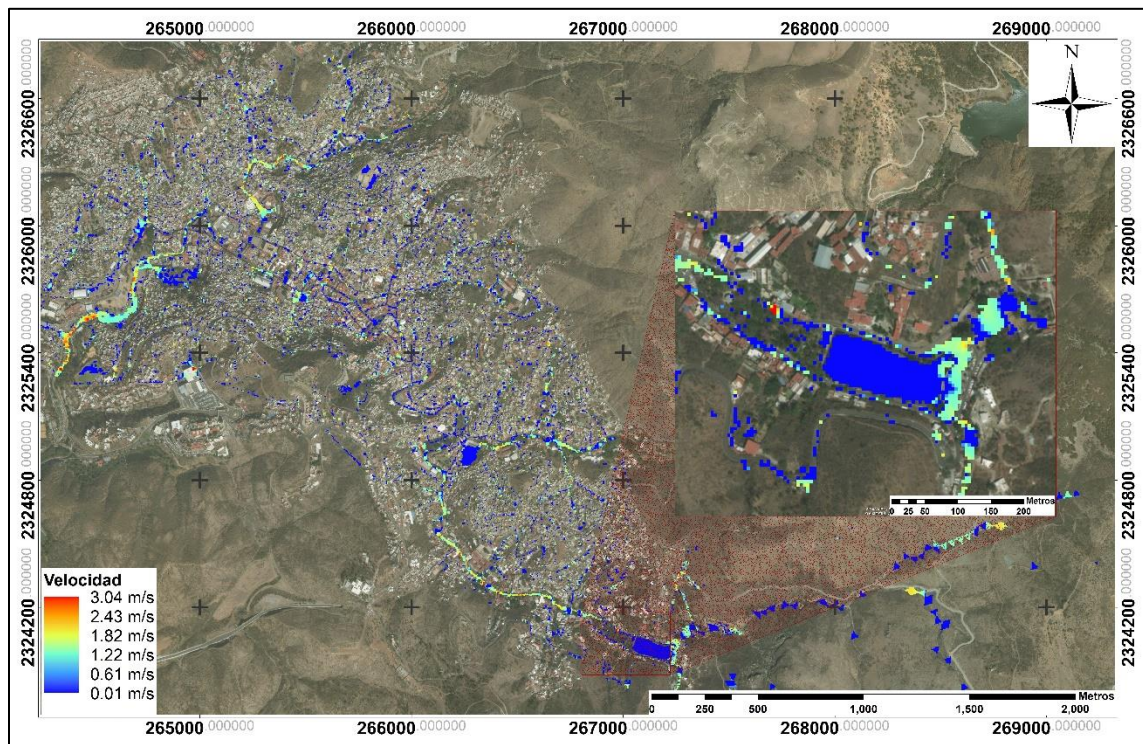


Figura 100 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia).

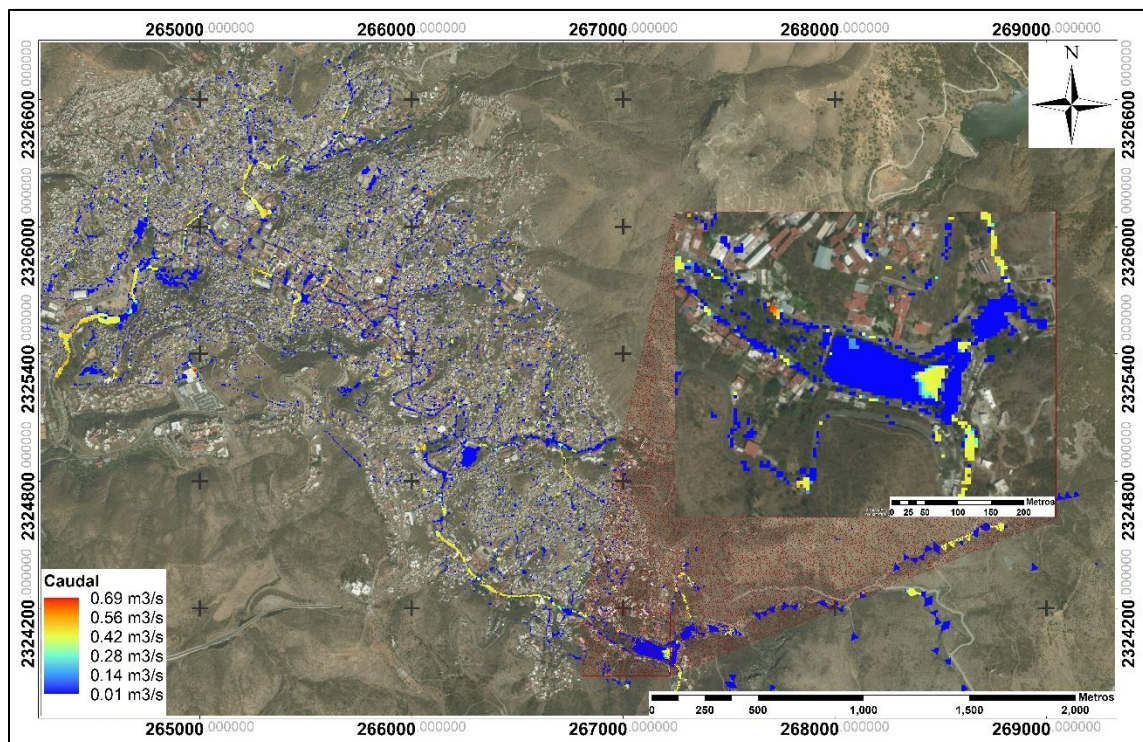


Figura 101 Caudales máximas para un periodo de retorno de 5 años (elaboración propia).



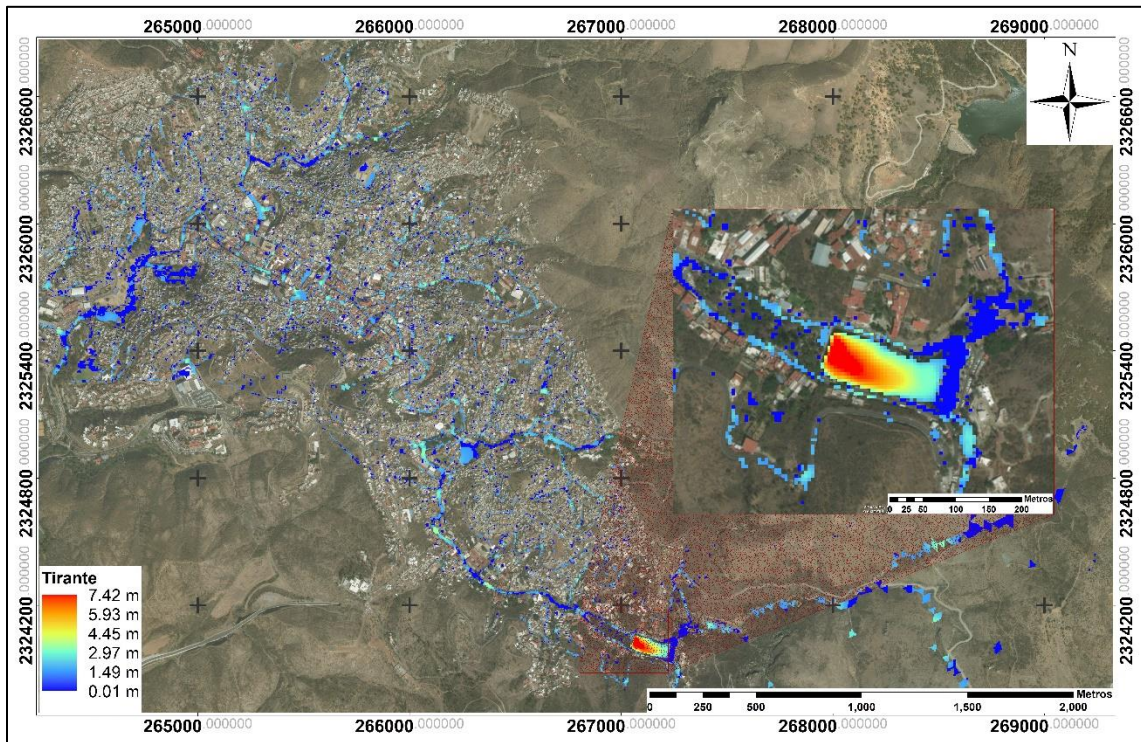


Figura 102 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia).

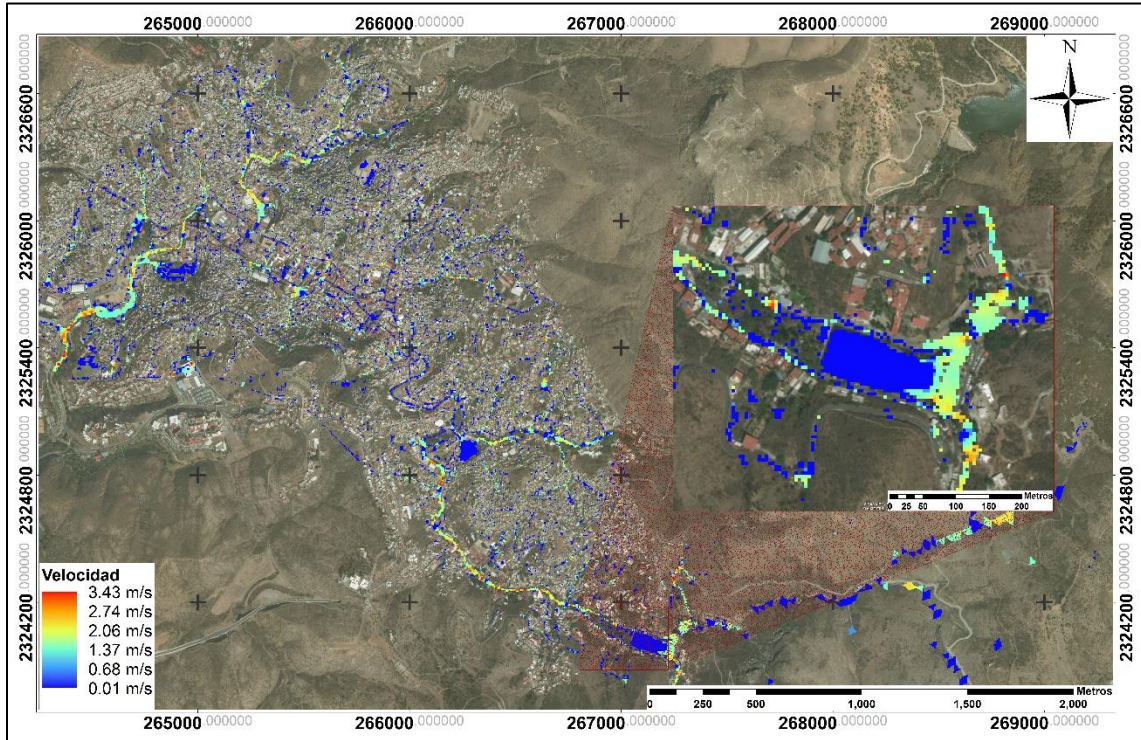


Figura 103 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia).



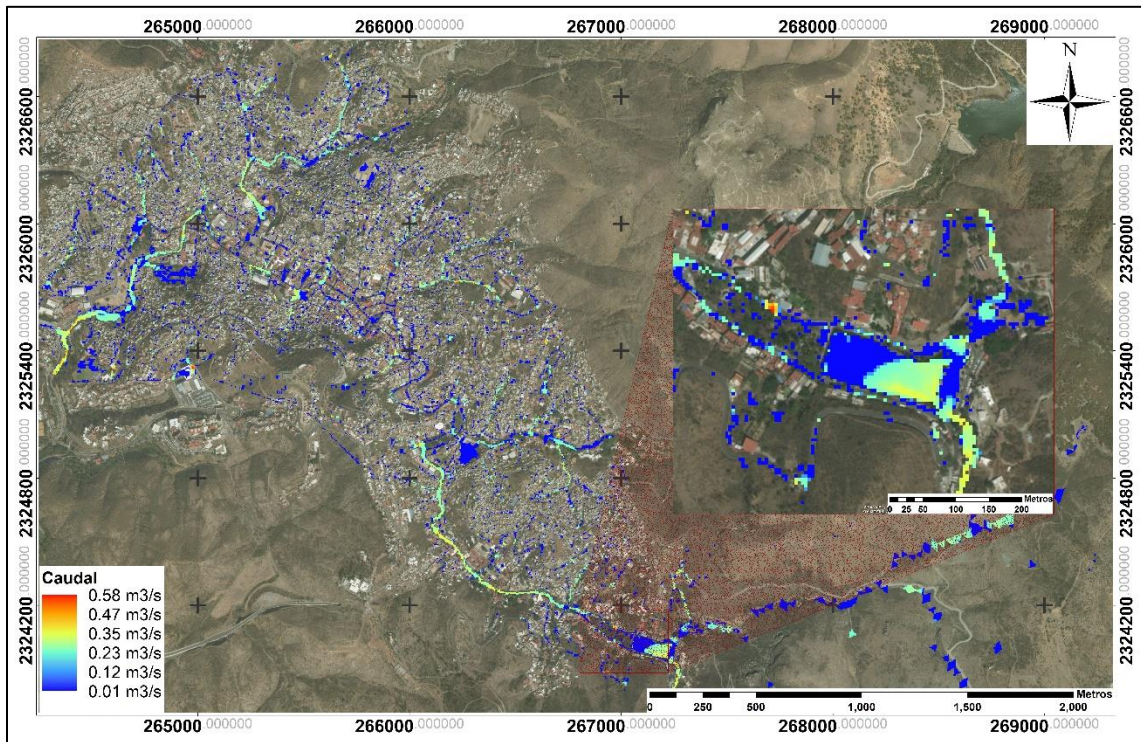


Figura 104 Caudales máximos para un periodo de retorno de 10 años (elaboración propia).

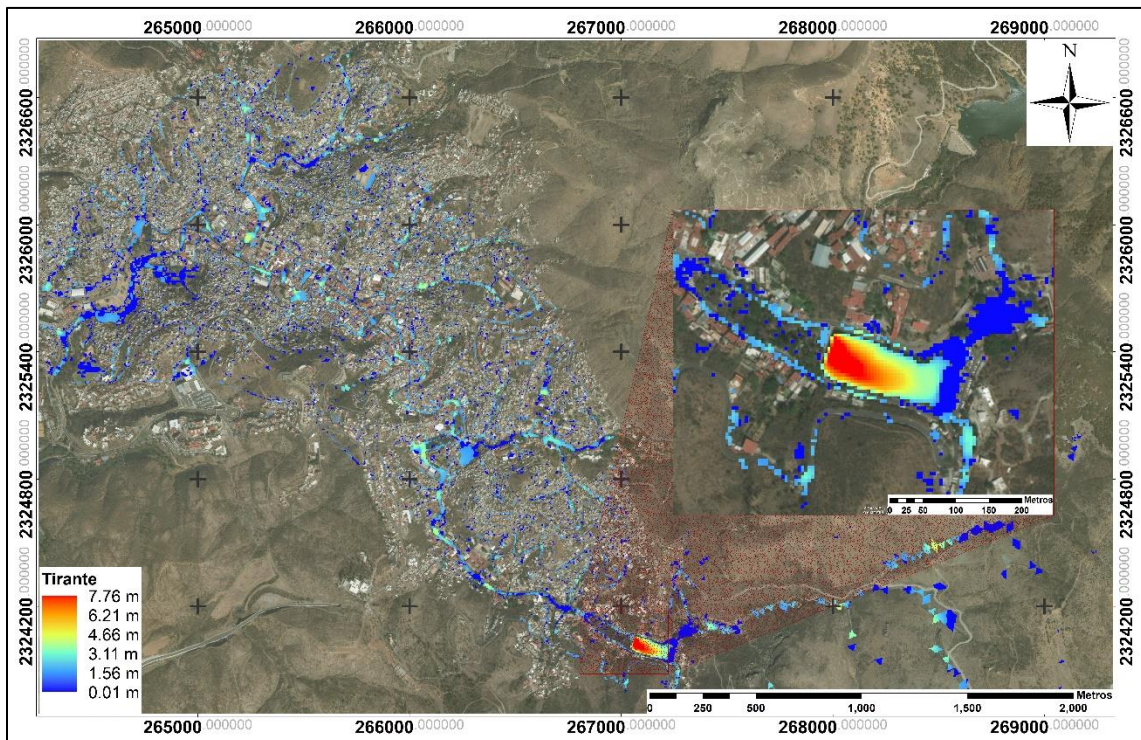


Figura 105 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).



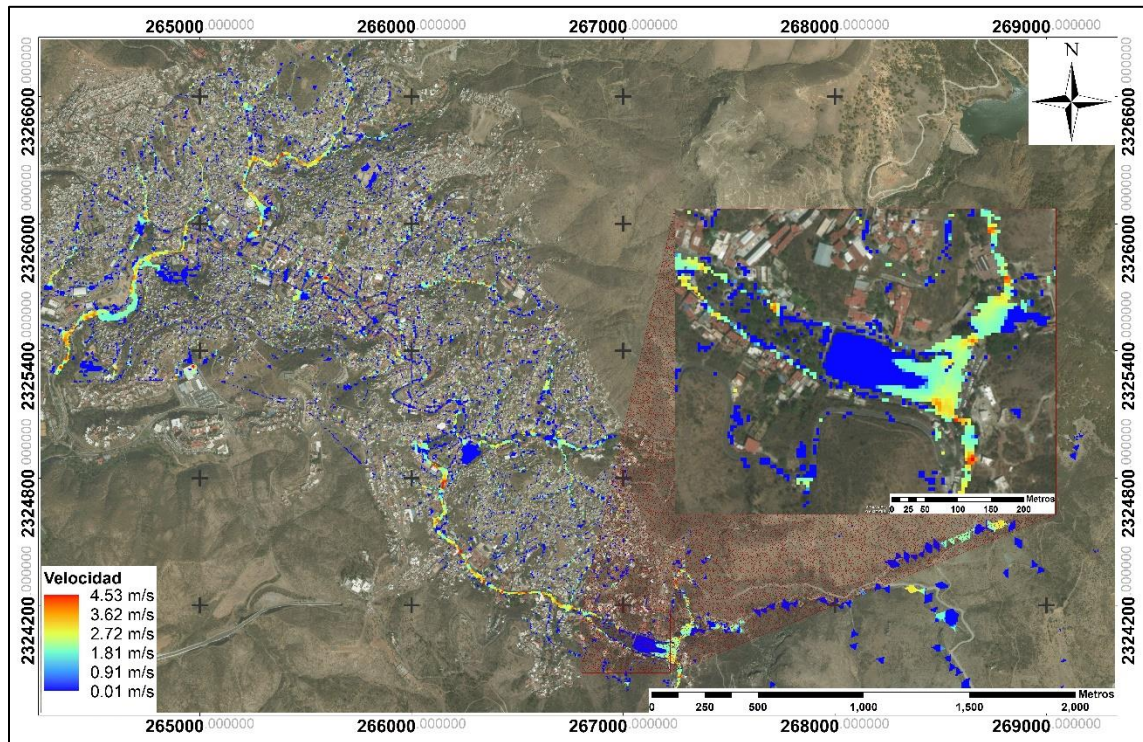


Figura 106 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).

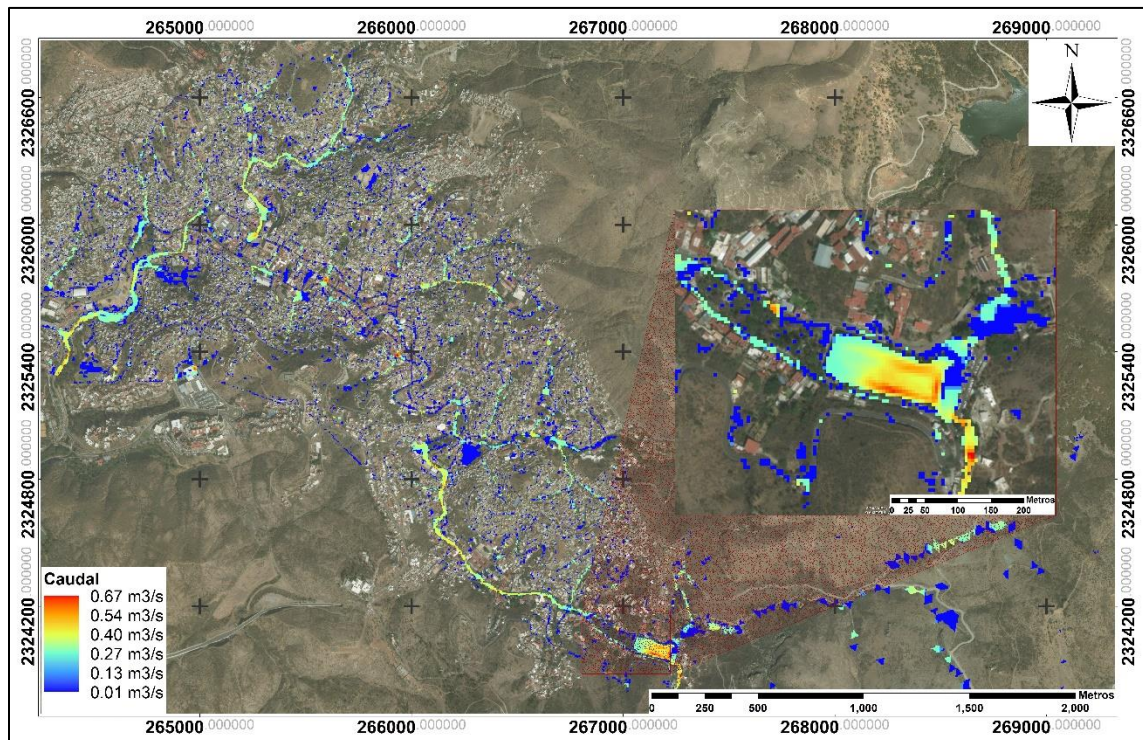


Figura 107 Caudales máximos para un periodo de retorno de 25 años (elaboración propia).



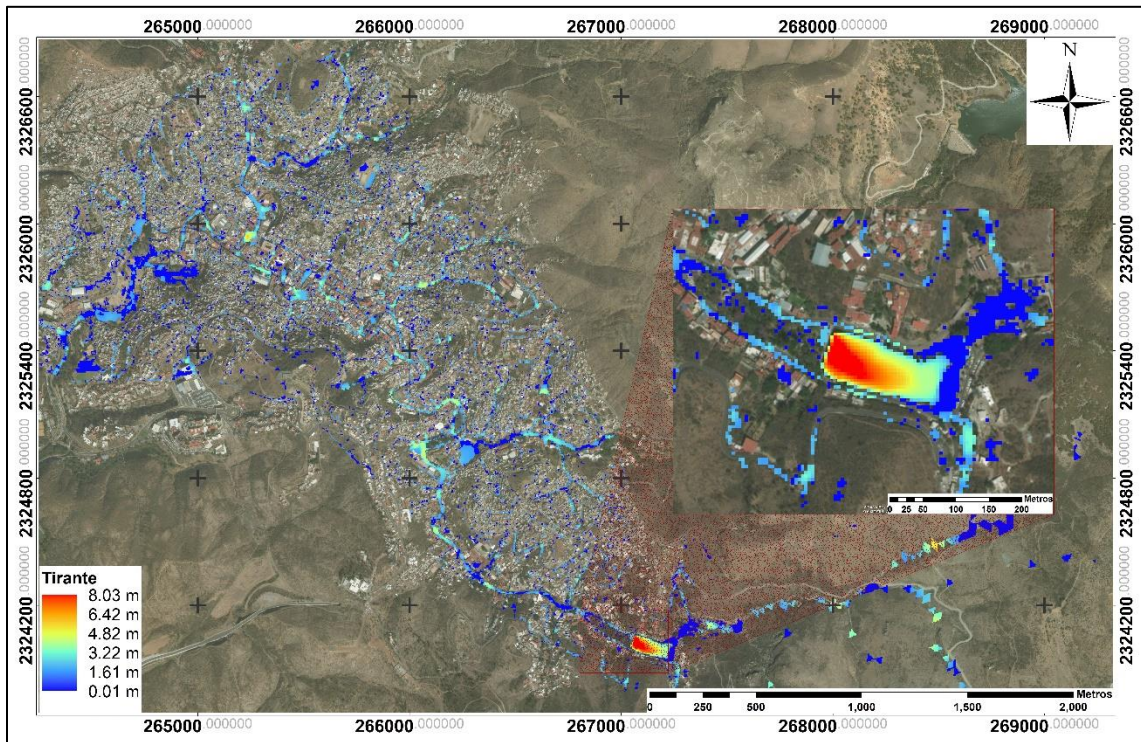


Figura 108 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 50 años (elaboración propia).

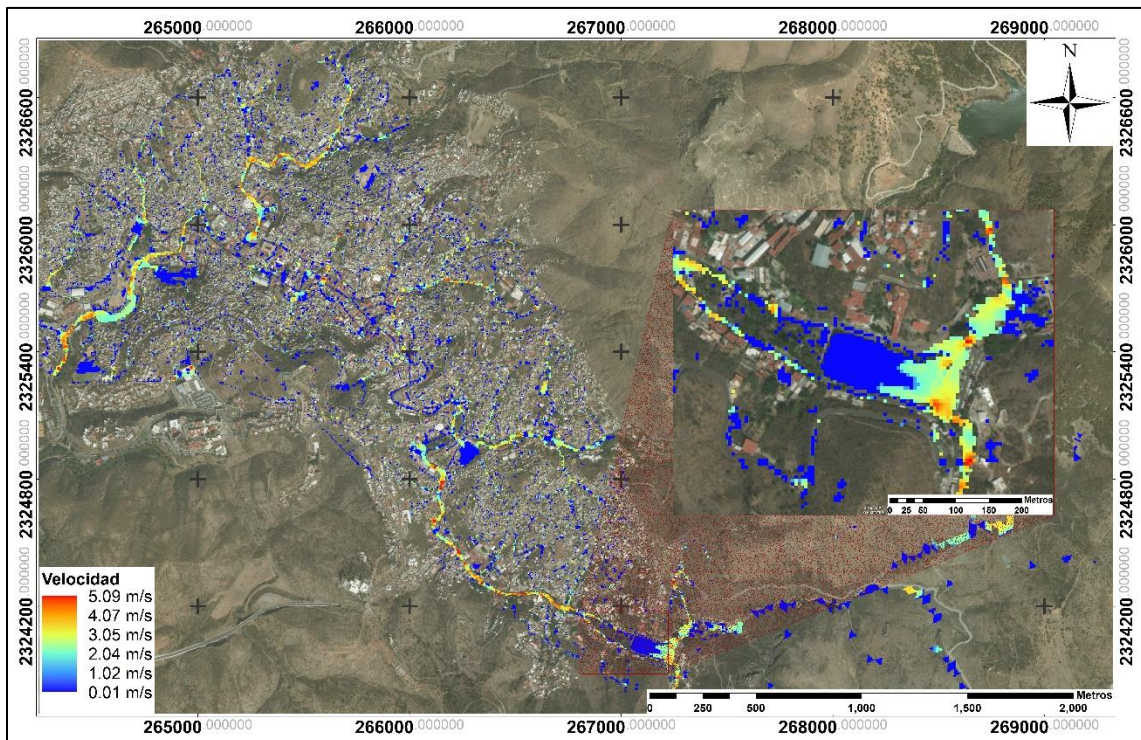


Figura 109 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 50 años (elaboración propia).



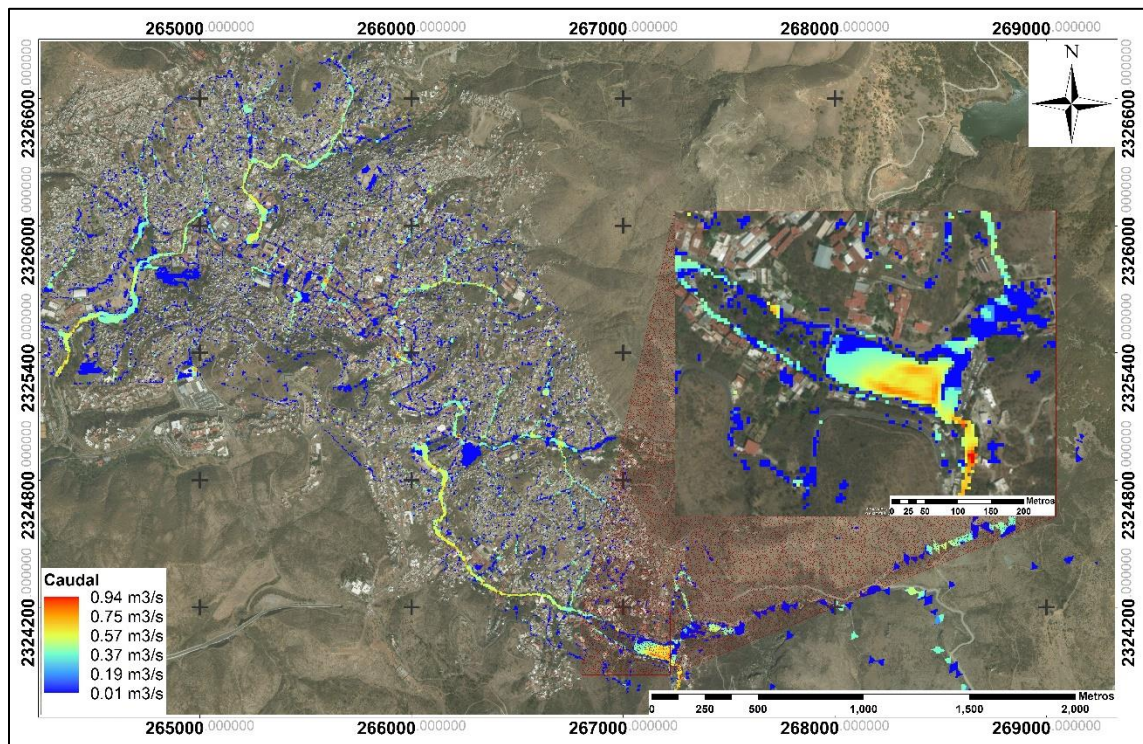


Figura 110 Caudales máximos para un periodo de retorno de 50 años (elaboración propia).

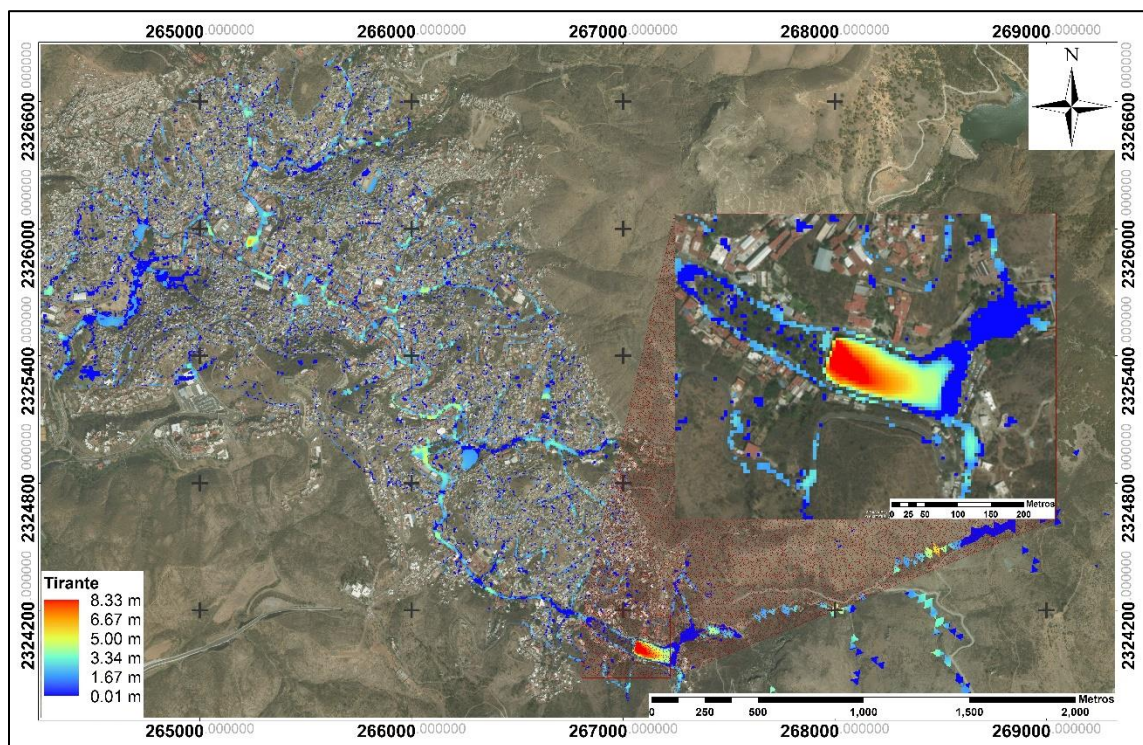


Figura 111 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 100 años (elaboración propia).



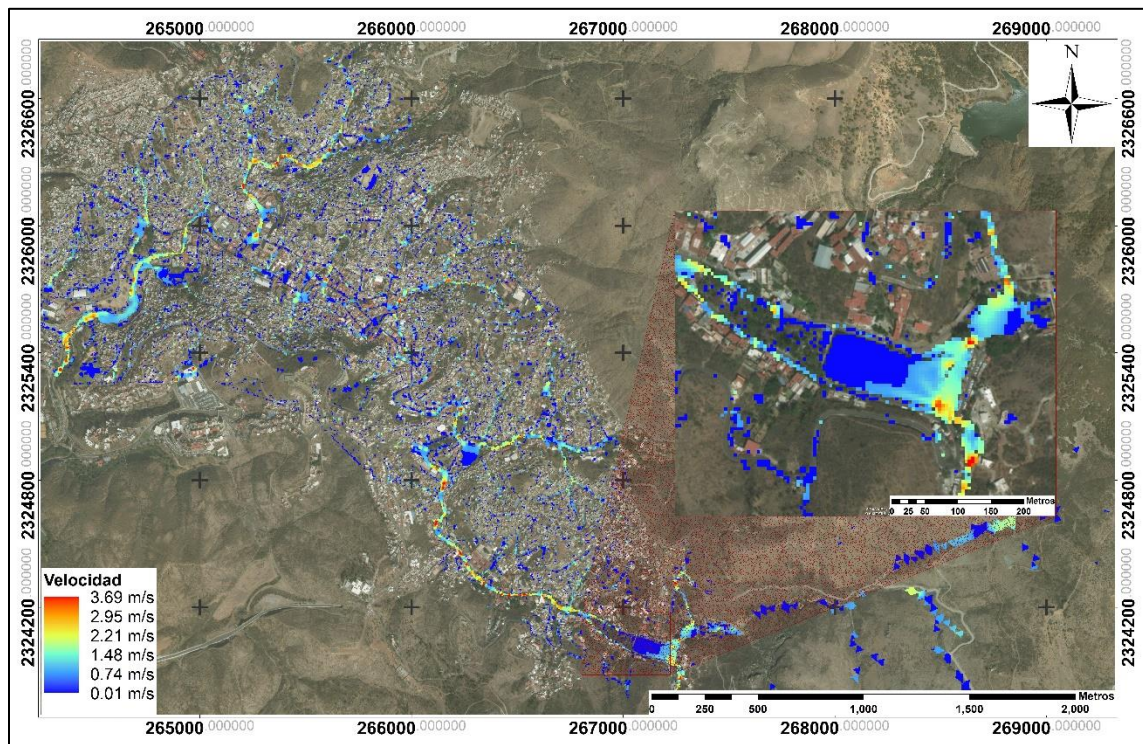


Figura 112 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 100 años (elaboración propia).

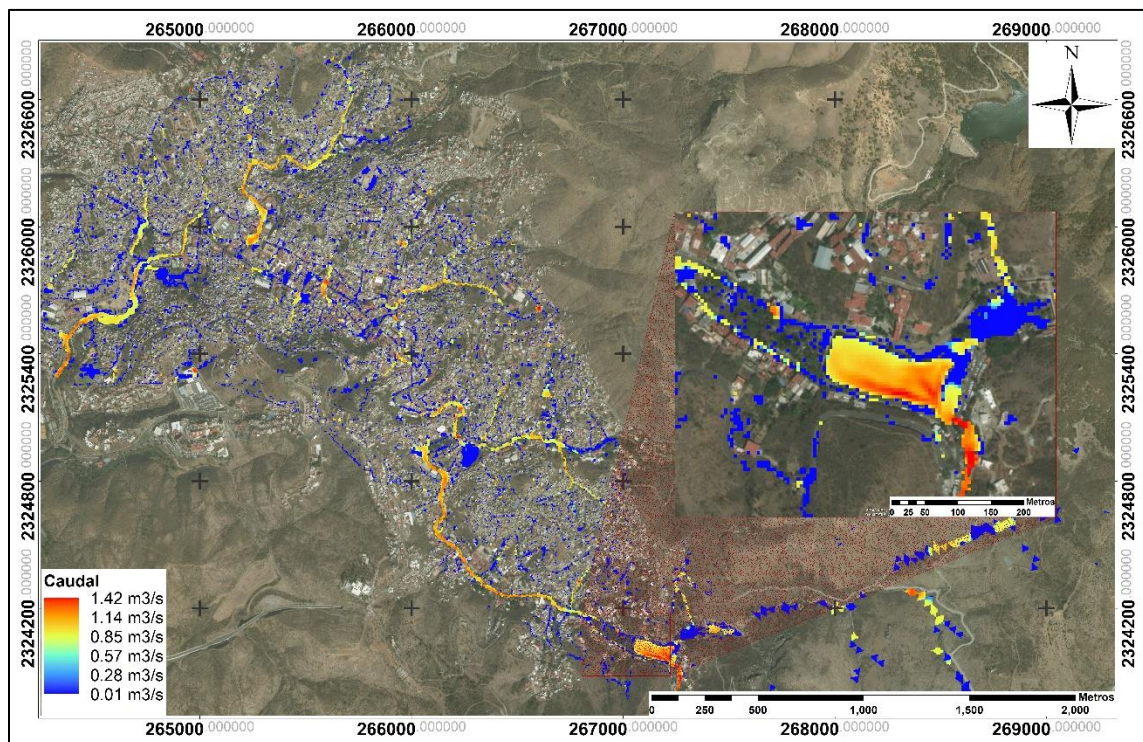


Figura 113 Caudales máximas para un periodo de retorno de 100 años (elaboración propia).



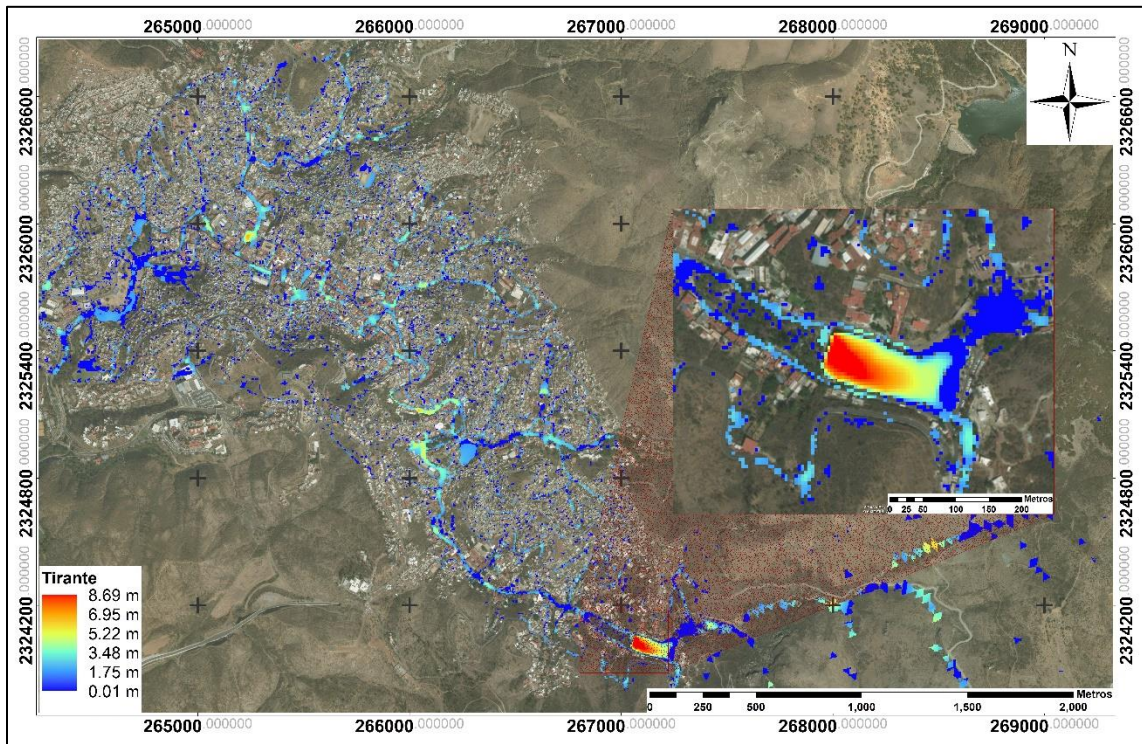


Figura 114 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 200 años (elaboración propia).

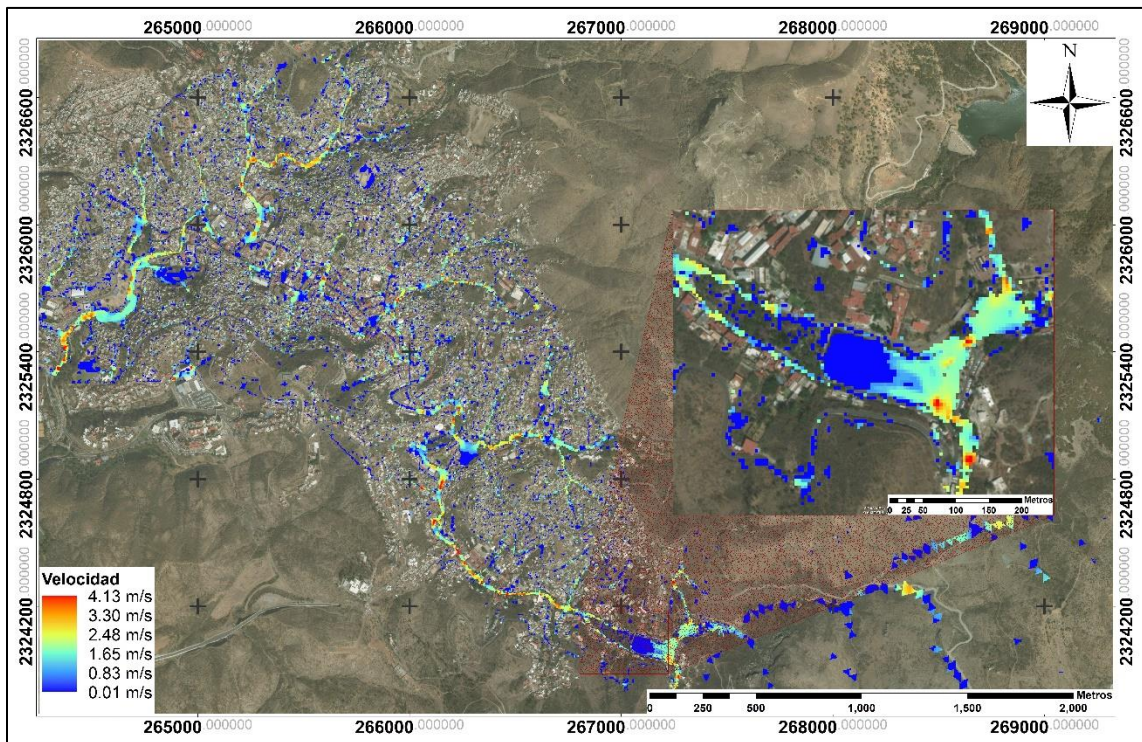


Figura 115 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 200 años (elaboración propia).



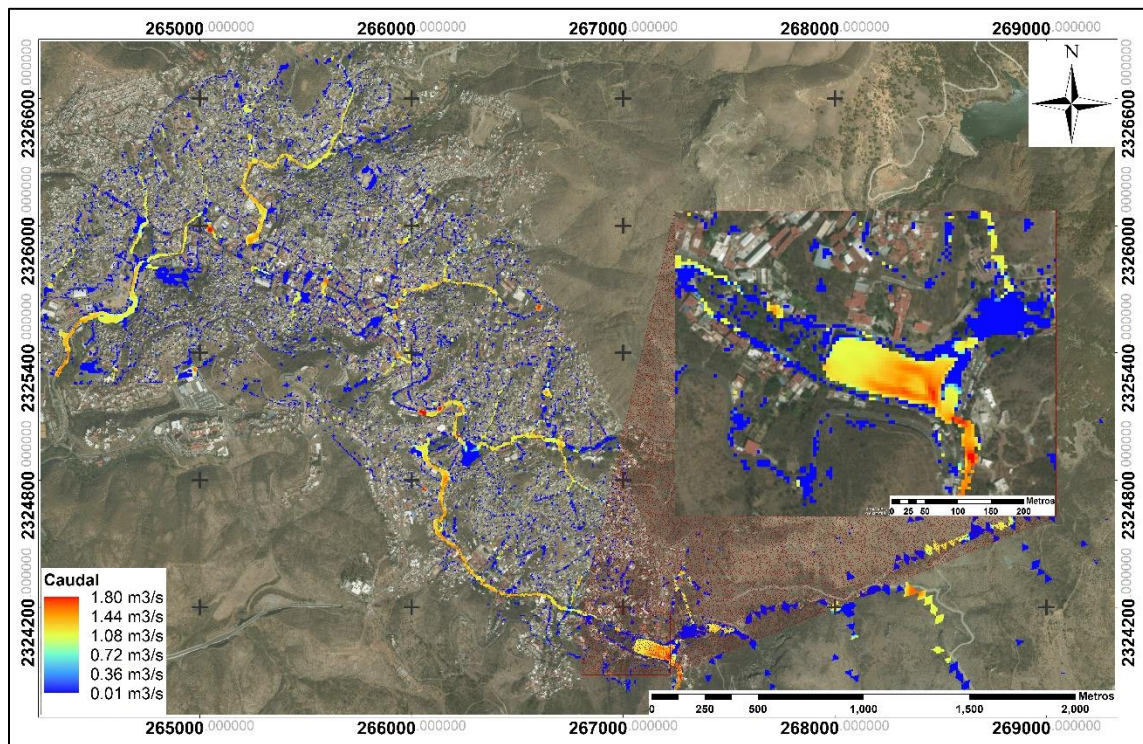


Figura 116 Caudales máximos para un periodo de retorno de 200 años (elaboración propia).

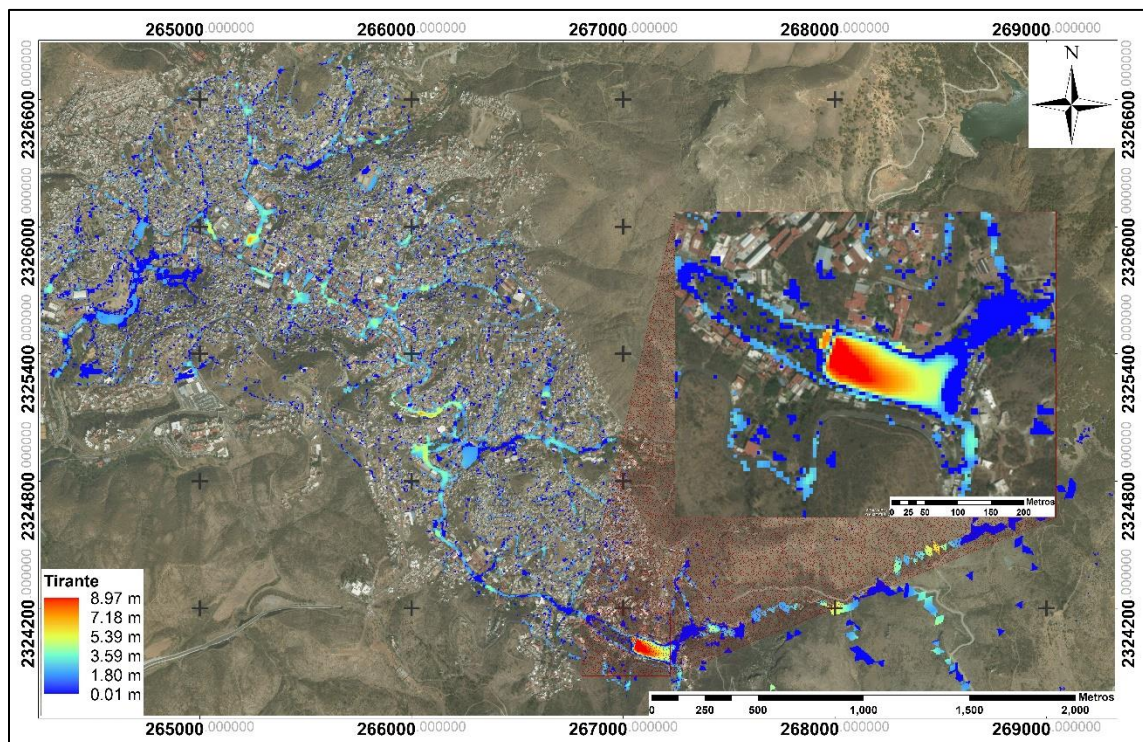


Figura 117 Tirantes máximos para un periodo de retorno de 500 años (elaboración propia).



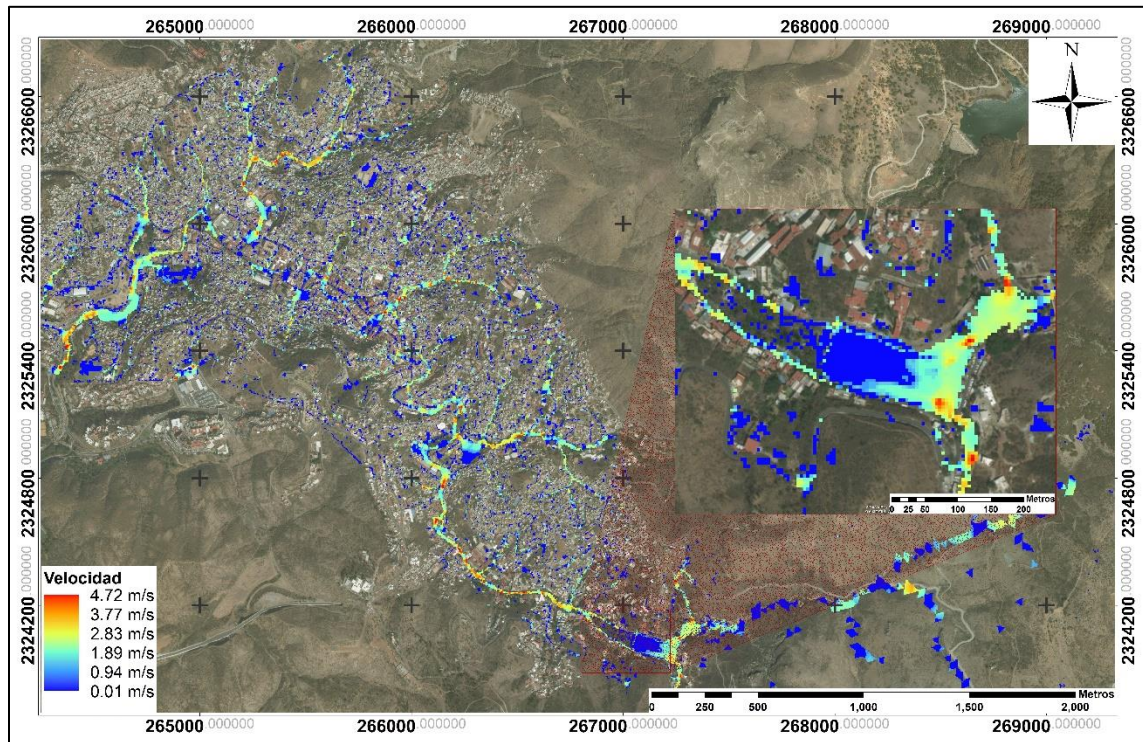


Figura 118 Velocidades máximas para un periodo de retorno de 500 años (elaboración propia).

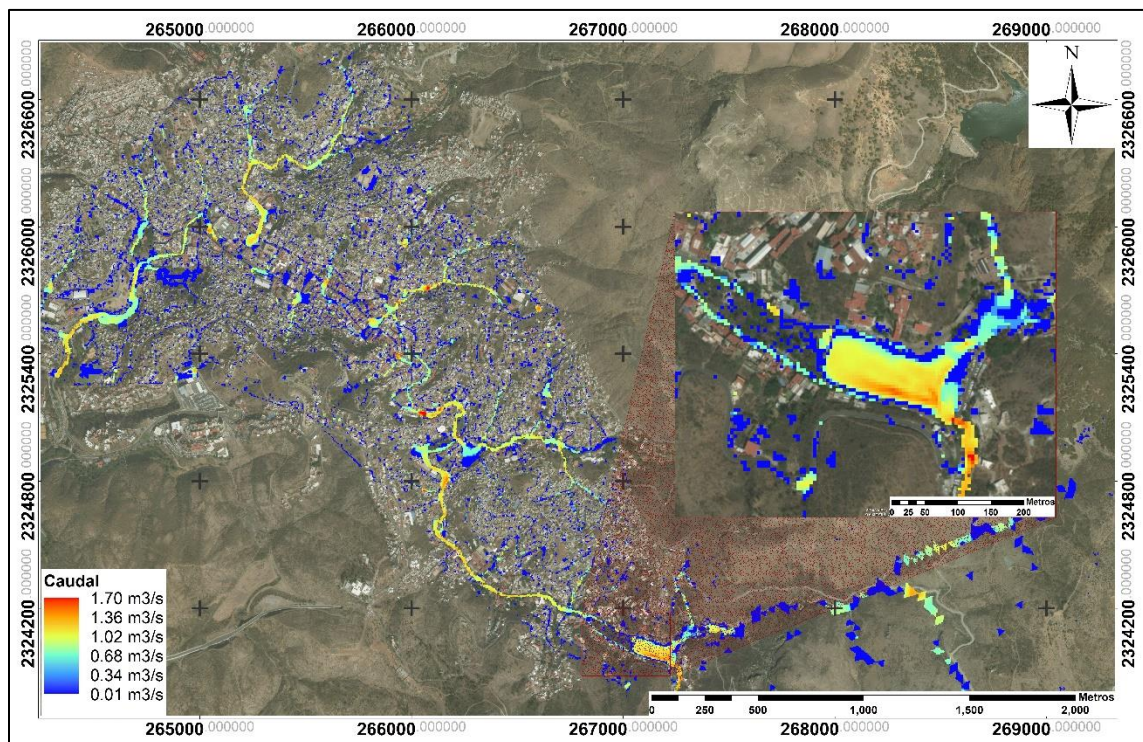


Figura 119 Caudales máximas para un periodo de retorno de 500 años (elaboración propia).