



**UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ
EXTENSIÓN CHONE**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

TÍTULO:

**“MODELO DE SIMULACIÓN DE LA RED DE ALCANTARILLADO
PLUVIAL ACTUAL DE LA CIUDAD DE CHONE”**

AUTORES:

**BARREIRO SANTANA DIANA ANDREA
MOREIRA MOREIRA DAMIÁN GERARDO**

TUTOR:

ING. ERIC CABRERA ESTUPIÑÁN, PhD.

CHONE-MANABÍ-ECUADOR

2017

ING. ERIC CABRERA ESTUPIÑÁN, PhD, Docente de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, extensión Chone, en calidad de tutor del trabajo de titulación.

CERTIFICO:

Que el presente trabajo de titulación: “**Modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone**”, ha sido exhaustivamente revisado en varias sesiones de trabajo y se encuentra listo para presentación y apto para su defensa.

Las opiniones y conceptos plasmados en este trabajo de titulación son fruto del trabajo, perseverancia y originalidad de sus autores: **Barreiro Santana Diana Andrea** y **Moreira Moreira Damián Gerardo**, siendo de su exclusiva responsabilidad.

Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD
TUTOR

Chone, Julio de 2017.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, **Barreiro Santana Diana Andrea** y **Moreira Moreira Damián Gerardo**, declaramos ser autores del presente trabajo de titulación: “**Modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone**”, siendo el **Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD** tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí y a sus representante legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certificamos que las ideas, opiniones, investigaciones, resultados, conclusiones y recomendaciones vertidos en el presente trabajo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente cedemos los derechos de este trabajo a la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, para que forme parte de su patrimonio de propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y trabajos de titulación, ya que ha sido realizado con apoyo financiero, académico o institucional de la universidad.

Barreiro Santana Diana Andrea
AUTOR

Moreira Moreira Damián Gerardo
AUTOR

Chone, Julio de 2017



UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ
EXTENSIÓN CHONE

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIEROS CIVILES

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación siguiendo la modalidad de Proyecto de Investigación, titulado: **“Modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone”**, elaborada por los egresados **Barreiro Santana Diana Andrea** y **Moreira Moreira Damián Gerardo** de la Escuela de Ingeniería Civil.

Ing. Odilón Schnabel Delgado, Mg
DECANO

Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD
TUTOR

Ing. Joel Pinargote Jimenez, PhD
MIEMBRO DE TRIBUNAL

Ing. Angel Alcívar García
MIEMBRO DE TRIBUNAL

SECRETARIA

DEDICATORIA

Antes que a nadie dedico este trabajo a Dios, Señor y dador de vida, porque es él quien me guía y da fortaleza no sólo ahora, sino en cada paso de mi vida, porque me da aliento para seguir cuando siento que todo se derrumba.

A mis padres, Tedy y Narcisa, por ser mi ejemplo de lucha, por demostrarme en cada momento su amor incondicional, por apoyarme durante todos mis años de estudio, pero más que nada por ser los pilares fundamentales de mi vida, sin ellos simplemente no hubiera podido culminar esta etapa. A mis hermanas, Pierina y Karolyn, porque con sus bromas siempre alegran mis días malos, haciendo más llevadero este largo camino. Sin lugar a dudas fui grandemente bendecida de haber nacido en el seno de una familia tan especial.

A mis ángeles del cielo, Manuel y Ángela, Diógenes y Alina, mis abuelos, imagino lo felices que están al ver cumplida esta meta, y a pesar de no estar hoy junto a mí, siento cada día su presencia en mi corazón, este logro también es de ustedes.

A mi tía María Luisa, mi segunda madre, sin su apoyo durante toda mi etapa universitaria y mi vida en general quizás hoy las cosas serían diferentes.

Para finalizar, dedico este trabajo a un ser muy especial, Damián, por ser mi compañero, mi amigo incondicional, no sólo durante esta investigación, sino en cada momento, bueno y malo, que he pasado, por la paciencia y amor brindados, por tantas muestras de comprensión, por ser siempre mi apoyo y el hombro en quien puedo recostarme, segura estoy de que este sólo será el inicio de un largo camino por recorrer juntos.

Diana Andrea Barreiro Santana.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres, a mi novia, a cada una de las personas, familiares y amigos, sin las cuales no hubiera podido lograr este objetivo.

A Dios, por ser quien guía mi camino, el ser que me fortalece y permite que mi vida esté cargada constantemente de bendiciones y alegrías.

A mi madre, por forjar mi carácter y hacer de mí una mejor persona.

A mi padre, por brindarme los recursos necesarios y ser más que un padre, un amigo.

A mi novia, por ser mi amiga incondicional, no sólo durante este trabajo de tesis, sino en cada momento de mi vida.

Damián Gerardo Moreira Moreira.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de investigación deseamos hacer extensivo nuestro agradecimiento a cada una de las personas e instituciones que han ayudado a nuestro desarrollo como profesionales, de manera especial:

Al Ing. Eric Cabrera Estupiñán, tutor de esta investigación, por su constante apoyo y asesoría durante el presente trabajo, porque siempre estuvo dispuesto a apoyarnos y con su experiencia como profesional supo orientarnos cuando necesitamos de él y por su trabajo comprometido en el desarrollo de esta investigación. Además le agradecemos infinitamente por sus muestras de estimación y por ser un gran ejemplo como profesional y humano.

A los técnicos del departamento de Plan estratégico y proyectos del GAD Municipal de Chone, especialmente al Ing. Rodolfo Marcillo, por la apertura brindada y dar las facilidades cuando necesitamos algún tipo de información.

A la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, extensión Chone, a cada uno de los docentes que contribuyeron en nuestra formación y a todos los profesionales que desde el inicio de nuestra vida universitaria estuvieron dispuestos a brindarnos su apoyo de manera desinteresada.

Por último queremos agradecer a nuestros familiares y amigos por su apoyo a lo largo de nuestras vidas, por motivarnos siempre a seguir el camino correcto.

Mil gracias a todos.

SÍNTESIS

Durante toda su historia la ciudad de Chone se ha visto afectada por inundaciones constantes que han traído consigo cuantiosas pérdidas humanas y materiales, éstas a su vez han generado un atraso en el crecimiento económico y poblacional de la ciudad. Vivir dicha realidad ha motivado el estudio de las causas que provocan el problema. Entre las principales se encuentran los aportes que recibe el Río Chone de tres importantes afluentes y la respuesta de la ciudad a eventos de precipitaciones intensas (funcionamiento del sistema de alcantarillado).

La investigación se centra en este último aspecto y en tal sentido se crea un modelo matemático de simulación de la red actual de drenaje pluvial de la ciudad de Chone empleando el programa SWMM 5.1, uno de los más usados de su tipo en el mundo y de libre uso y adquisición.

El modelo se aplica para diversos eventos de lluvia, haciéndose más énfasis en la lluvia de una hora de duración y período de retorno de 100 años, para lo cual se realizaron simulaciones de 6 horas con intervalos de 5 minutos del funcionamiento de la red obteniéndose los hidrogramas de salida de los puntos de descarga al río, así como los efectos de la disminución de la sección transversal de las tuberías debido a la acumulación de sedimentos, un fenómeno muy presente en la red. En este último punto se modificaron las secciones en 1/3, 1/2, 75% y 90% del diámetro obteniéndose que para los dos últimos casos la red no pudo evacuar los caudales generados, entrando en presión varios de los pozos y obteniéndose los hidrogramas de salida de agua de esos pozos hacia la calle, hidrogramas que provocan inundación urbana. También se identificaron varios sectores de la red con serios problemas de drenaje.

PALABRAS CLAVES

Palabras clave: Hidrología urbana, inundaciones urbanas, modelo SWMM 5.1, redes de drenaje pluvial.

ABSTRACT

Throughout its history the city of Chone has been affected by constant floods that have brought with it large human and material losses, these have generated a delay in the economic and population growth of the city. Living this reality has motivated the study of the problem causes. Among the main ones are the flows received by the Chone River from three important tributaries and the city's response to intense rainfall events (operation of the storm drainage networks).

The research focuses on the latter aspect and in this sense creates a mathematical model of simulation of the current storm drainage network of Chone using the program SWMM 5.1, one of the most used of its type in the world and of free use and acquisition.

The model is applied for various rain events, with more emphasis on a rainfall of one hour duration and return period of 100 years, for which simulations of 6 hours with 5-minute intervals of the operation of the network were made obtaining the river Outfalls hydrograms as well as pipes cross-section decrease effects due to sediments accumulation. A phenomenon very present in the network. In this last point the sections were modified 1/3, 1/2, 75% y 90% times the diameter obtaining for the last two cases the network could not evacuate the generated flows, getting on pressure some of the wells and obtaining the flooding hydrograms. Several sectors of the network were also identified with serious drainage problems.

KEYWORDS

Keywords: Urban hydrology, urban floods, SWMM 5.1 model, storm drainage networks.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE	11
1.1. La hidrología urbana, una mirada actual.....	11
1.1.1. Problemas asociados al drenaje pluvial urbano.....	15
1.1.2. Respuesta hidrológica ante el crecimiento de urbanizaciones en la cuenca.	17
1.2. La modelación matemática de las redes de drenaje pluvial urbano	20
1.2.1. Problemas y etapas de la modelación matemática en redes de drenaje pluvial urbano. 21	
1.2.2. La modelación dual del drenaje pluvial urbano, una idea revolucionaria. ..	24
1.3. Aplicación de los Sistemas de Información Geoespacial SIG, a la modelación matemática de los sistemas de drenaje pluvial urbano.	25
1.3.1. Etapas de pre y post procesamiento de la información espacial.....	27
1.4. Principales modelos de simulación del drenaje pluvial urbano.....	28
1.4.1. Modelo SWMM, características y desarrollo.....	30
1.3.3.1. Estructura del modelo.....	31
1.3.3.2. Características del modelo hidrológico de escorrentía en SWMM.	31
1.4.2. ¿Qué modelo usar?	32
1.5. Sistema de Alcantarillado pluvial de la ciudad de Chone.	32
1.6. Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.	33

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.	35
2.1 Análisis estadístico de los eventos de precipitación máxima	35
2.1.1. Concepto de período de retorno	36
2.1.2. Ajuste estadístico de series de lluvias máximas a la función de distribución acumulada de eventos máximos de Gumbel.....	36
2.1.3. Análisis de homogeneidad y pruebas de bondad de ajuste de las series de lluvias máximas.....	38
2.1.3.1. Análisis de homogeneidad.....	38
2.1.3.2. Prueba de bondad de ajuste de Smirnov Kolmogorov.	38
2.1.4. Curvas de intensidad frecuencia y duración IFD.	39
2.1.4.1. Obtención de Curvas IDF partiendo de datos de lluvia máxima mensual..	40
2.1.5. Obtención hietogramas de aguaceros sintéticos a partir de las curvas IFD.....	43
2.1.5.1. Método del bloque alterno.....	43
2.2. El modelo conceptual de SWMM versión 5.0.....	44
2.2.1. Componentes físicos (Visual Objects)	44
2.2.2. Cuencas (Subcatchments).....	45
2.2.3. Nudos de conexión.	46
2.2.4. Nudos de vertido (Outfall Nodes)	47
2.2.5. Conductos	48
2.2.6. Reguladores de caudal.....	49
2.2.7. Ventana principal de SWMM.....	50

2.3. Método de cálculo de SWMM.....	52
2.3.1. Modelo hidrológico de SWMM. Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial.	52
2.3.1.1. Cálculo de la infiltración, (método del Número de la Curva o CN del NRCS).	53
2.3.2. Modelos hidráulicos de transporte.....	54
2.3.2.1. Modelo de Flujo Uniforme (Steady State Routing).....	54
2.3.2.2. Modelo de la Onda Cinemática (Kinematic Wave).....	55
2.3.3.3. Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave)	56
 CAPÍTULO 3. MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO DE LA RED DE ALCANTARILLADO PLUVIAL ACTUAL DE LA CIUDAD DE CHONE....	59
3.1. Caso de estudio. Descripción y características generales.....	59
3.2. Procesamiento de los datos de precipitaciones máximas para la ciudad de Chone..	61
3.2.1. Procesamiento inicial de datos, serie de trabajo.....	61
3.2.2. Análisis de homogeneidad de la serie de trabajo.....	62
3.2.3. Comprobación del ajuste de la serie de trabajo a la función teórica de probabilidad Gumbel.	63
3.2.4. Obtención de las curvas de intensidad – frecuencia y duración IFD para la estación M0162 y de hietogramas de trabajo.	64
3.2.4.1. Cálculo de las Precipitaciones Máximas Probables para diferentes frecuencias y evento de 24 horas de duración.	64
3.2.4.2. Obtención de las curvas de intensidad – frecuencia y duración IFD para la estación M0162.....	66

3.2.4.3. Obtención de hietogramas de trabajo.	66
3.3. Creación del modelo de simulación del sistema futuro de drenaje pluvial de Chone.....	68
3.3.1. Procedimiento para la elaboración del modelo general de la red de drenaje pluvial actual de la ciudad de Chone en el software SWMM 5.1.....	68
3.3.2. Descripción de las actividades realizadas y productos obtenidos.	69
3.4. Componentes definidos en el modelo de la red de alcantarillado pluvial de proyecto de Chone.	77
3.5. Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.	79
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO PROPUESTO ANTE DIFERENTES ESCENARIOS HIDROMETEOROLÓGICOS.	82
4.1. Simulación de la red de drenaje pluvial actual de Chone para un evento de lluvia de una hora de duración y 100 años de período de retorno, Escenario 1.	82
4.1.1. Tramos con problemas evidentes en la red, caso del tramo pozo Pz-298 hasta el Pz-292.....	88
4.1.2. Análisis de variación de parámetros hidráulicos por considerar tuberías con presencia de sedimentos que reduce su sección transversal.	91
4.2. Simulación de la red de drenaje pluvial actual de Chone para eventos de lluvia de una hora de duración y 10 y 25 años de período de retorno, Escenarios 2 y 3.	97
4.3. Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.....	98

CONCLUSIONES.....	100
RECOMENDACIONES	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXOS.....	110

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ciclo natural del agua.....	11
Figura 1.2. Ciclo natural del agua.....	12
Figura 1.3. Sistema de drenaje urbano.	14
Figura 1.4. Características del balance hídrico de una cuenca.	18
Figura 1.5. Esquema de un sistema de drenaje dual urbano.....	25
Figura 2.1. Ejemplo de los componentes Físicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje.	45
Figura 2.2. Ventana principal de SWMM 5.1.	50
Figura 2.3. Esquema conceptual del fenómeno de escorrentía en SWMM 5.1.....	53
Figura 2.4. Esquema de una cuenca simple.....	55
Figura 3.1. Ubicación de la ciudad de Chone (área de estudio). Estación climatológica principal del INAMHI, código M0162.....	59
Figura 3.2. Curva de simple masa de la serie de trabajo.	62
Figura 3.3. Curvas de Intensidad-frecuencia-duración IFD para la estación climatológica M0162.....	66
Figura 3.4. Hietogramas de lluvias de una hora y períodos de retorno $T=10, 25$ y 100 años.....	67
Figura 3.5. Red de drenaje pluvial futura de la ciudad de Chone.....	70
Figura 3.6. Polígonos que representan áreas de drenaje hacia los pozos de la red.....	72
Figura 3.7. Definición de serie temporal de hietogramas en SWMM 5.1.	73

Figura 3.8. Definición del objeto pluviómetro y entrada de sus datos.	74
Figura 3.9. Definición del objeto pluviómetro y entrada de sus datos.	75
Figura 3.10. Continuación de la ventana Subcatchment Sub-380 de la figura anterior.	76
Figura 3.11. Representación de pozos con sus respectivas alturas (cotas de fondo).....	77
Figura 3.12. Representación de las subcuencas en SWMM 5.1	79
Figura 4.1. Ventana principal de la simulación de la red de drenaje pluvial para lluvia de 1 hora y T=100 años.	83
Figura 4.2. Hidrogramas de salida en los puntos de descarga, escenario 1.....	85
Figura 4.3. Creación de un perfil longitudinal de la red, desde el pozo Pz-14 hasta el nodo de descarga Out-19_Pz-10.....	87
Figura 4.4. Perfil de elevación desde el pozo Pz_14 hasta la descarga Out-19_Pz-10, tiempo 40 min.....	88
Figura 4.5. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292.....	88
Figura 4.6. Perfil de elevación desde el pozo Pz-298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 15 min.....	89
Figura 4.7. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 25 min.....	90
Figura 4.8. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 30 min.....	90
Figura 4.9. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 35 min.....	91
Figura 4.10. Tramo de estudio (desde el pozos Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10) y sus área de aporte.	92

Figura 4.11. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), sin variación de la sección transversal de las tuberías.	92
Figura 4.12. Opción para concebir la variación de la sección transversal de la tubería.	93
Figura 4.13. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías en un tercio de su diámetro.	94
Figura 4.14. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías en la mitad de su diámetro.	94
Figura 4.15. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías un 75% de su diámetro.	95
Figura 4.16. Hidrograma de salida de agua del pozo Pz-15 hacia la calle.	95
Figura 4.17. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías un 90% de su diámetro.	96
Figura 4.18. Hidrogramas de salida en el punto de descarga Out-19_Pz-10.	96
Figura 4.19. Simulación del escenario 2, lluvia de duración 1h y T=10 años.	97
Figura 4.20. Simulación del escenario 3, lluvia de duración 1h y T=25 años.	98

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Características de los sistemas de drenaje pluvial.....	14
Tabla 2.1: Coeficientes aplicados a las lluvias máximas probables de duración 24 hr para obtener sus homólogos correspondientes a tiempos de aguaceros en horas.....	41
Tabla 2.2: Coeficientes aplicados a las lluvias máximas probables de duración 24 hr para obtener sus homólogos correspondientes a tiempos de aguaceros en días.	41
Tabla 2.3: Ecuaciones empíricas para ajustar las curvas de Intensidad–frecuencia-duración (IFD).	42
Tabla 3.1: Serie de valores de lluvia máxima mensual de la estación climatológica M0126, período 1990- 2012, 23 años.	61
Tabla 3.2: Tabla de aplicación del test de Student.	63
Tabla 3.3: Resultados finales del test de Student.	63
Tabla 3.4: Tabla de cálculo de la prueba de Smirnov Kolmogorov.	63
Tabla 3.5: Tabla de cálculos para la obtención de las Precipitaciones Máximas Probables para distintas frecuencias y evento de 24 horas de duración.	65
Tabla 3.6: Tabla de cálculos para la obtención de las Precipitaciones Máximas Probables para eventos lluviosos de distintas frecuencias y duraciones.	65
Tabla 3.7: Longitud de tuberías de hormigón de la red de drenaje actual de Chone con sus diámetros.	71
Tabla 3.8: Longitud de tuberías de PVC de la red de drenaje actual de Chone con sus diámetros.	71
Tabla 3.9: Cantidad de tuberías de PVC de la red de drenaje actual de Chone correspondientes a los mismos diámetros.	78

Tabla 3.10: Cantidad de tuberías de hormigón de la red de drenaje actual de Chone correspondientes a los mismos diámetros.	78
Tabla 4.1: Caudales máximos en cada uno de los puntos de descarga.....	86

INTRODUCCIÓN

El agua representa uno de los recursos naturales más preciados en cualquier país, debido a los abundantes beneficios sociales y económicos que genera su uso consciente, dentro de cualquier localidad es un recurso insustituible. Las precipitaciones, sin lugar a dudas, generan grandes beneficios, de manera especial a los lugares que padecen de sequía, a pesar de todas las ventajas que pueden generar estas lluvias todo en exceso tiende a ser malo, y dichas precipitaciones extremadamente intensas causan los desbordamientos de los ríos y estos a sus a vez inundaciones.

La medición rutinaria de la temperatura atmosférica en estaciones meteorológicas ha permitido el monitoreo de esta variable en diversas regiones del planeta desde finales del siglo XIX. Gracias a estos datos, es muy claro que la temperatura media del planeta ha experimentado un incremento significativo de casi 0.5°C (Caballero, Lozano, & Ortega, 2008). Este aumento de la temperatura ha traído consigo una modificación del clima de la tierra que se puede constatar en una variación de las estaciones de invierno y verano, períodos de sequía más prolongados y fenómenos lluviosos más intensos, que en muchas ocasiones generan inundaciones, etc.

Dentro de este ámbito, las inundaciones causadas por lluvias intensas son uno de los desastres naturales que mayormente afectan a diversas comunidades y sectores alrededor del mundo, éstas traen consigo innumerables pérdidas materiales e incluso humanas.

Ésta realidad no es para el Ecuador una excepción, año tras año muchas ciudades del país se ven afectadas por grandes inundaciones causadas por lluvias abundantes, generando además el desbordamiento de ríos y colapsos en los sistemas de alcantarillado, afectando de manera importante la economía y progreso de las ciudades directamente afectadas, y estas afectaciones aumentan cuando se produce un fenómeno natural que se lo conoce como “Fenómeno del Niño”. En Ecuador, a lo largo del siglo veinte se han producido numerosos fenómenos El Niño con efectos negativos. Los más notables, en orden de magnitud descendente y sin considerar el actual, han sido los de 1982-1983, 1957-1958 y 1972-1973 (Publica, 2010).

Dentro de todas las ciudades del país que son afectadas por este fenómeno la ciudad de Chone ubicada en la provincia de Manabí, es una de las que más inundaciones y pérdidas ha tenido durante toda su historia, se conoce que en los últimos 35 años han ocurrido

cerca de 200 inundaciones (Gil, Varela, & Mardones, Gestión Integral del Riesgo por Inundaciones: Caso de estudio Ciudad de Chone, 2005). Dicha ciudad se encuentra en el centro de la provincia costera que limita al oeste con el océano Pacífico, razón por la cual la ciudad se ha visto afectada por el fenómeno de El Niño en múltiples ocasiones, además de esto el Río Chone recibe aportaciones de otros tres afluentes, los ríos Grande, Mosquito y Garrapata, lo que sumado a las lluvias abundantes de la época invernal generan caudales que causan las inundaciones antes mencionadas.

Se debe tener presente que otra de las causas directas de las inundaciones dentro de la ciudad es el mal estado del sistema de alcantarillado actual, esto genera que el lugar sea vulnerable ante lluvias de gran intensidad (GAD Chone, 2015). Cabe indicar que no existe un estudio técnico en que se muestre el funcionamiento de la red de alcantarillado actual de la ciudad de Chone.

Es importante conocer que un sistema de alcantarillado “consiste en una serie de redes de tuberías y obras complementarias necesarias para recibir, conducir y evacuar las aguas residuales y los escurrimientos superficiales producidos por las lluvias” (SIAPA, 2014).

Prácticamente en todas las ciudades se tiene la necesidad de evacuar las aguas producidas por las lluvias abundantes, de esta manera se evita la inundación de viviendas, comercios, industrias, instituciones, entre otras. Además las personas también desean desalojar el agua utilizada para su aseo y consumo. En este contexto, “el desarrollo urbano altera de manera importante la hidrología de las cuencas donde se origina. Como consecuencia del desarrollo urbanístico, los cauces naturales que conforman la red hidrográfica original deben ser conservados y adecuados a las nuevas condiciones, esto para que no afecte de forma directa su capacidad de desagüe y por tanto no se propicie la existencia de inundaciones” (Domenech, 2014). Es por esta razón que surge la necesidad de realizar obras de ingeniería capaces de garantizar la correcta conducción de las aguas pluviales y residuales con el fin de lograr el desarrollo de las ciudades.

Un sistema de alcantarillado está constituido por una red de conductos e instalaciones complementarias que permiten la operación, mantenimiento y reparación del mismo. Su objetivo es la evacuación de las aguas residuales y las pluviales, que escurren sobre calles y avenidas, evitando con ello la acumulación y propiciando el drenaje de la zona a la que sirven. De ese modo se impide la

generación y propagación de enfermedades relacionadas con aguas contaminadas (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Son pocos los países en el mundo que dentro de sus leyes garantizan una vida digna para las personas, mejorar su calidad de vida, garantizar su derecho a los servicios básicos, a un ambiente saludable, junto con un desarrollo sustentable y sostenible de los recursos.

Ecuador es uno de esos países; en el artículo 66 de la Constitución actual, aprobada en el 2008, se establece que “el derecho a una vida digna, que asegure la salud, alimentación y nutrición, agua potable, vivienda, saneamiento ambiental, educación, trabajo, empleo, descanso y ocio, cultura física, vestido, seguridad social y otros servicios sociales necesarios”. Por ello, mejorar la calidad de vida de la población es uno de los objetivos del (Plan Nacional del Buen Vivir, 2013-2017).

Dicho programa es uno de los ejes del modelo del estado ecuatoriano, en el que principalmente se vela por la calidad de vida de la población, así como su bienestar personal, profesional, social, entre otros.

En el objetivo 3 del Plan Nacional del Buen Vivir se menciona que “Entre los derechos para mejorar la calidad de vida se incluyen el acceso al agua y a la alimentación (art. 12), a vivir en un ambiente sano (art. 14), a un hábitat seguro y saludable, a una vivienda digna con independencia de la situación social y económica (art. 30), al ejercicio del derecho a la ciudad (art. 31) y a la salud (art.32)”.

Se indica claramente el derecho a vivir en un ambiente sano, como se conoce las inundaciones traen consigo múltiples enfermedades, propagación de insectos, y una de las causas principales para que se den este tipo de eventos es el mal estado de los sistemas de alcantarillado de las ciudades, la falta de análisis y mantenimiento de los mismos.

Con relación al sistema de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone se puede decir que no se encuentra en buen estado (de forma general), existen sectores que se encuentran mejor que otros y hay zonas periféricas pobladas que carecen de este servicio. Uno de los problemas fundamentales que presenta el sistema de alcantarillado pluvial es la colmatación de sumideros y conductos, debido a que existe una cantidad apreciable de calles sin asfaltar y por lo tanto mucho polvo y lodo se acumula en este importante sistema que termina por colapsar en algunos sectores.

La solución a este último problema radica en realizar un proyecto de ingeniería donde se rediseñe todo el sistema de la ciudad, afortunadamente este proyecto ya existe, ver (Macías L. , 2015) y posteriormente llevándose a cabo una fuerte inversión para la construcción de la solución aportada en la etapa de proyecto; aquí se tiene que considerar la pavimentación de todas las arterias de la ciudad así como soluciones urbanísticas que garanticen contener la llegada de polvo y lodo al nuevo sistema.

Indistintamente que se tenga un sistema de alcantarillado pluvial nuevo o el existente (con todos sus problemas) hay una realidad que es común a ambos y es que son sistemas dinámicos y que su operación y mantenimiento son vitales para mantenerlo. Es por eso que los especialistas encargados de su manejo necesitan conocer cómo es el funcionamiento del sistema de forma integral.

Por tal motivo el presente proyecto pretende analizar el funcionamiento del sistema de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone, proponiendo un modelo de simulación hidrodinámico con el que se podrá evaluar la respuesta del sistema ante diversos escenarios de intensas lluvias en la ciudad.

Sin dudas este es un tema que ha venido aquejando a la ciudad prácticamente desde toda su existencia, lo que ha causado además un retraso en su crecimiento y desarrollo, puesto que las inundaciones ya mencionadas han ocasionado un número incalculable de pérdidas materiales, así como la falta de inversión dentro de la ciudad.

Para llevar a cabo un proyecto de esta índole, en la actualidad se utilizan modernas técnicas y modelos matemáticos que son capaces de diseñar y analizar sistemas de alcantarillado de aguas pluviales y sanitarias, de abasto de agua, entre otros, éstos modelos actualmente se encuentran íntimamente vinculados a Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Es indispensable la utilización de nuevas herramientas en el ámbito de la ingeniería, no solo para facilitar el trabajo sino para poder mejorar la productividad del mismo, en tiempo, eficiencia y calidad. Los problemas relacionados con la ingeniería suelen ser muy complejos, es por esto que, en la actualidad involucrar la tecnología juega un papel determinante.

Prácticamente todos los eventos, fenómenos u objetos de estudio vinculados a la Ingeniería se producen en un espacio geográfico determinado y pueden ser georreferenciados mediante un sistema de coordenadas. En este aspecto, las tecnologías de información geográfica pueden mejorar notablemente la investigación científica en estas disciplinas, abriendo otras perspectivas u oportunidades de conocimiento, planteando nuevas interrogantes, aplicando diferentes metodologías de análisis y revelando nuevos datos que sin la utilización de estas tecnologías serían imperceptibles, en general, facilitan la aparición de nuevas interpretaciones de la misma realidad. Los Sistemas de Información Geográfica han generado cambios paradigmáticos tecnológica e intelectualmente, en especial en el ámbito de la cartografía y la geociencia (Del Bosque, Fernández, Martín-Forero, & Pérez, 2012). Es por esta razón que resulta conveniente conocer, qué es un SIG.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés) constituyen una importante herramienta de trabajo para la investigación y la planificación, no sólo en el campo académico sino también en el dominio técnico a diversos niveles de organización espacial y territorial, bien sea de carácter público, privada, científico o militar. Dada su gran capacidad para el almacenamiento y manipulación de grandes volúmenes de datos espaciales georreferenciables, los SIG facilitan el análisis y la toma de decisiones. No obstante, la calidad y exactitud de los sistemas de información dependen de la organización, equipamiento y personal responsable para su manejo y mantenimiento (Gómez H. , 2006)

Los SIG son una tecnología muy poderosa dentro del ámbito de la Ingeniería que permite al usuario la posibilidad de gestionar y analizar datos de tipo espacial de manera rápida y sencilla. “Un SIG se puede definir además, como aquel método o técnica de tratamiento de la información geográfica que permite combinar eficazmente información básica para obtener información derivada” (Dominguez, 2000). El proceso tecnológico es uno de los elementos determinantes del futuro y puede resultar trascendental en la toma de decisiones.

Como ya se mencionó con anterioridad existen modernas y actuales técnicas y modelos matemáticos para realizar diseños y evaluación de distintas obras de ingeniería, estas técnicas brindan precisión y eficacia a la hora de realizar análisis. Uno de los modelos

más utilizados alrededor del mundo es el Stormwater Management Model (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales) más conocido como SWMM por sus siglas en inglés.

El SWMM fue creado por la Environmental Protection Agency (Agencia de Protección del Ambiente) de los Estados Unidos, EPA por sus siglas en inglés. Es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, éste puede ser utilizado para la realización de un único evento o para una simulación continua en período extendido (Rossman, 2005). Este programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada. “Asimismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y calidad del agua de la escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo” (Rossman, 2005).

SWMM considera distintos procesos hidrológicos que se producen en la salida de las aguas urbanas. Entre éstos se encuentran:

- Precipitaciones variables en el tiempo
- Evaporación de las aguas superficiales estancadas
- Acumulación y deshielo de nieve
- Intercepción de precipitaciones por almacenamiento en depresiones
- Infiltración de las precipitaciones en capas de suelo no saturadas
- Entrada del agua de la infiltración en acuíferos
- Intercambio de flujo en acuíferos y el sistema de transporte
- Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial

La variabilidad en todos estos procesos se alcanza dividiendo una determinada área de estudio en áreas de captación de agua más pequeñas y homogéneas (denominadas cuencas). Cada una de estas cuencas contiene su propia fracción de subáreas permeables e impermeables. El flujo superficial puede producirse entre las distintas subáreas, entre las distintas cuencas o entre los puntos de entrada al sistema de drenaje, (Rossman, 2005).

Unido a lo dicho anteriormente, SWMM posee un conjunto flexible de herramientas de modelación de características hidráulicas utilizado para analizar el flujo debido a la escorrentía superficial y los aportes externos de caudales por medio de una red de tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, y demás estructuras.

Todas estas características ya mencionadas unidas a que es un software de libre acceso y fácil manejo lo hacen idóneo para ser utilizado en el presente trabajo de investigación.

Tradicionalmente, se suele diseñar el sistema de drenaje empleando métodos basados en el uso del método racional para la estimación del caudal de diseño de cualquiera de los elementos que conforman el sistema, sin embargo este método no toma en cuenta la variabilidad temporal de la lluvia, sobreestima el caudal de diseño a medida que aumenta el caudal de la cuenca y por lo general se dificulta el análisis de escenarios y alternativas (Rincón & Muñoz, Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM., 2013).

En la actualidad, con los grandes avances tecnológicos se utilizan modernos y ventajosos modelos matemáticos, como el SWMM que con las características que ya se han mencionado con anterioridad brindan la posibilidad de predecir con mayor facilidad y precisión las respuestas que pueden generar los sistemas de drenaje antes diferentes eventos meteorológicos, todo esto de una manera más ágil y confiable.

Dentro del ámbito en que se desarrolla este proyecto no existen estudios relacionados a evaluar el sistema de alcantarillado pluvial actual de la ciudad, su comportamiento ante eventos de lluvias su agilidad y calidad.

Por todo lo dicho anteriormente se puede plantear el siguiente **problema de investigación:**

- Se desconoce el comportamiento del Sistema de Alcantarillado Pluvial actual de la ciudad de Chone ante diferentes eventos meteorológicos.

Para abordar este problema se define como **objeto de investigación o estudio:**

- Gestión de los recursos hidráulicos

Como **campo de acción:**

- Redes de alcantarillado pluvial.

Con el fin de dar respuesta al siguiente problema de investigación planteado se definió el siguiente **Objetivo General:**

- Crear un modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial de la ciudad de Chone, y con éste simular y evaluar su comportamiento ante diferentes eventos meteorológicos.

Y se parte de la siguiente **hipótesis de investigación**:

- Con la creación de un modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone, se puede obtener el comportamiento del sistema en general ante diversos escenarios meteorológicos.

Seguidamente atendiendo a las necesidades del proyecto y a la metodología se establecen las siguientes **variables de investigación**:

Variables independientes:

- Modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone

Variable dependiente:

- Funcionamiento del sistema de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone.

Las **tareas de investigación** desarrolladas para cumplir con el objetivo general planteado y demostrar la hipótesis, se detallan a continuación:

Tarea 1: Realizar un análisis del estado del arte referente a los modelos de simulación de redes de alcantarillado pluvial.

Tarea 2: Aprender a emplear el modelo de simulación seleccionado.

Tarea 3: Obtener y generar información para el modelo de simulación partiendo de datos espaciales y de atributos (redes existentes en autocad o levantamiento) y de datos alfanuméricos.

Tarea 4: Crear el modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de Chone.

Tarea 5: Simular el funcionamiento del sistema de alcantarillado pluvial de Chone ante diferentes escenarios hidrometeorológicos.

Tarea 6: Evaluar los resultados de las simulaciones de escenarios y proponer soluciones de ingeniería a nivel conceptual.

Dentro de la **estructura del trabajo** se puntualizan cuatro capítulos. En el Capítulo 1 se realiza una revisión del estado del arte con respecto a los principales modelos matemáticos de simulación como una herramienta que ha roto paradigmas y que se encuentra en el mercado, se precisan las respuestas hidrológicas de la cuenca ante diversos problemas asociados al drenaje pluvial urbano y además se muestra las ventajas de los Sistemas de Información Geográficas (SIG) ante la integración de los modelos matemáticos. Finalmente se elegirá el modelo matemático a utilizar para el análisis del comportamiento de la red en estudio.

En el capítulo 2 se presenta una fundamentación teórica de todos los procedimientos, métodos, materiales, entre otros que serán utilizados en los capítulos posteriores. Es importantes destacar la determinación de los aguaceros sintéticos (estímulos al modelo). Se analizan las ventajas y características teóricas del modelo SWMM, y las formulaciones gobernantes en el flujo de superficie libre.

El capítulo 3 está orientado a obtener el modelo de drenaje urbano general de la cuenca de Chone. El modelo antes mencionado corresponde a la red del sistema de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone.

Por último en el capítulo 4 se aplica el modelo creado teniendo en consideración los diversos escenarios de precipitaciones, al finalizar se presentan los resultados y se realizan los respectivos análisis.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1. La hidrología urbana, una mirada actual.

Uno de los conceptos fundamentales de la hidrología y del manejo de recursos hidráulicos, es el ciclo hidrológico, también denominado ciclo del agua. Existen diversas definiciones para el ciclo hidrológico, pero generalmente es entendido como un modelo conceptual que describe el almacenamiento y circulación del agua entre la biósfera, atmósfera, litósfera e hidrósfera. El agua puede ser almacenada en los océanos, lagos, atmósfera, ríos, suelos, glaciares, nevados y acuíferos. La circulación entre estos depósitos o almacenamientos es causada por procesos como: evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración, percolación y escurrimiento, los cuales son denominados componentes del ciclo hidrológico (González, 2013).

Todas estas fases ya mencionadas son de gran importancia para que el agua mantenga los niveles de vida estables y permita el desarrollo de un territorio sano.



Figura 1.1. Ciclo natural del agua.

Fuente: (Rodríguez, 2013)

Sin embargo, en la ciudad, el ciclo del agua es distinto, las precipitaciones atraviesan una nube de contaminación y llegan a un suelo prácticamente impermeable y arrastra toda la suciedad almacenada a través de canales, finalmente esta agua es vertida en el río o mar para volver a empezar el ciclo, olvidando la infiltración al terreno y los beneficios derivados de la evaporación en el lugar (Rodríguez, 2013).

El estudio del ciclo hidrológico y de las inundaciones no es algo innovador en la historia del ser humano. Desde tiempos antiguos, las crecidas del Nilo han condicionado la morfología, el crecimiento y el desarrollo de los antiguos egipcios, mas esto no ha impedido el progreso de las ciudades, debido a que con el empleo de sistemas de pozos utilizaron a su favor estos problemas de la naturaleza. De ahí la importancia del estudio de la hidrología y sus principios asociados a la realidad que viven muchas poblaciones en la actualidad.

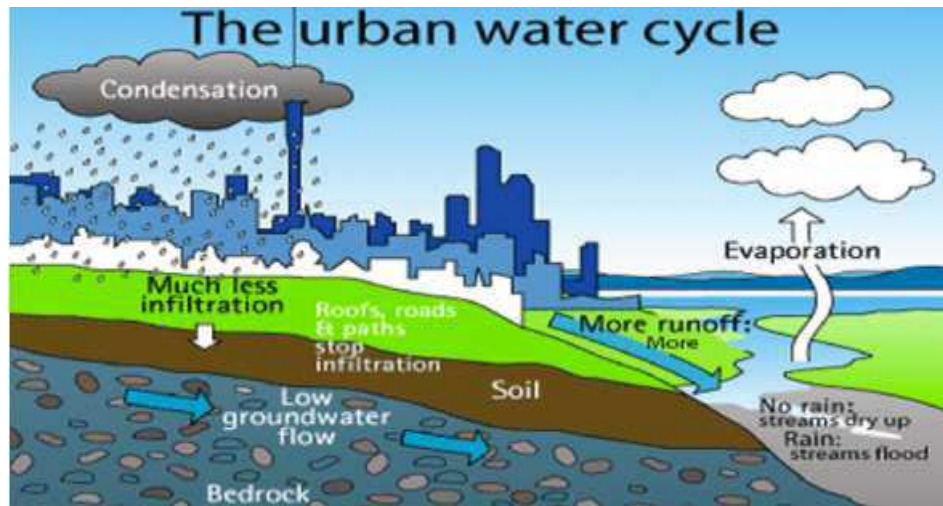


Figura 1.2. Ciclo urbano del agua.

Fuente: Google Images

La hidrología ha experimentado constantes cambios y avances en el último tercio de siglo. Según (Sahuquillo, 2002) estos avances están ligados al aumento de potencia de los ordenadores que permite realizar modelos y simulaciones en los que se tienen en cuenta muchos más fenómenos. Pero sin duda es la posibilidad de realizar modelos distribuidos con los que se pueden abarcar cuencas más amplias a distintas escalas es lo que está permitiendo abrir cada vez más las posibilidades de estos modelos.

Dentro de la hidrología urbana resulta importante tener en cuenta el crecimiento constante y acelerado de las ciudades, hecho que provoca un aumento considerable de las aguas lluvias superficiales, trayendo consigo inundaciones y obsolescencia de los sistemas de drenaje. Por esta razón, cuando existen precipitaciones abundantes son afectadas las actividades urbanas, las personas, sus bienes y la infraestructura (Burgos, 2007).

La urbanización es uno de los procesos que afecta de manera más significativa a las condiciones naturales de la cuenca y a su ciclo hidrológico, reduciendo la interceptación

natural y la evapotranspiración, impermeabilizando y compactando el suelo, modificando las vías naturales de drenaje y aumentando la contaminación de los recursos hídricos (Rodríguez, 2013).

De acuerdo a un informe presentado por la Organización de Naciones Unidas (Wilmoth, 2014) se conoce que aproximadamente el 54% de la población mundial reside en áreas urbanas, habiéndose incrementado en más de un 80% en los últimos 20 años según (Flumen, 2007), y se prevé que para el 2050 llegará a más del 66%. Además se detalla también que Asia alberga en estos momentos el 53% de la población urbana mundial, seguida de Europa (14%) y América Latina y el Caribe (13%). Los autores del informe resaltan que el crecimiento poblacional que se registrará en numerosas ciudades supondrá grandes desafíos en cuanto a atender los requerimientos de los habitantes en lo que respecta a vivienda, infraestructura, transporte y la provisión de servicios básicos.

El crecimiento de las ciudades exige notables inversiones en infraestructuras, siendo la mayoría de ellas utilizadas diariamente por el ciudadano. Este es el caso de las vías de comunicación, zonas verdes, centros hospitalarios, redes para el suministro de fluidos, etc. No obstante, el uso de estas infraestructuras y el normal desarrollo de la actividad ciudadana están, en ciertos momentos, condicionados por el correcto funcionamiento de otra infraestructura: la red de drenaje de aguas pluviales (Dolz & Gómez, 1994).

Día a día los ciudadanos disfrutan de vías de comunicación, esto hace que las personas “valoren la voluntad política y la capacidad técnica que las hicieron posibles” (Dolz & Gómez, 1994). Es difícil que esto suceda con una red de drenaje pluvial que se encuentra “escondida” en el subsuelo, cuya propia naturaleza no contempla el contacto directo con el ciudadano y por tanto le resulta difícil valorar su correcto funcionamiento.

En países en desarrollo, los problemas de tormentas e inundaciones restringen el crecimiento económico y social hasta cierto punto, la necesidad de controlar y mejorar los niveles de drenaje de aguas lluvias resulta indispensable para mejorar la calidad de vida. Varios investigadores han analizado las características de la precipitación y el escurrimiento, en especial en el primer enjuague, que normalmente lleva una gran masa de contaminantes (Wei, y otros, 2016).

De esta manera es importante conocer un concepto básico de un sistema de drenaje urbano, según (Granda, 2013) estos sistemas están comprendidos por una serie de elementos que van desde el sistema de captación de aguas pluviales hasta las canalizaciones y conductos que permiten la conducción y descarga de las aguas de lluvia precipitadas en el medio, hasta los cauces naturales y artificiales, para su libre escurrimiento. Bajo este concepto se pueden definir dos tipos de sistemas: El Sistema Principal y el Sistema Secundario.

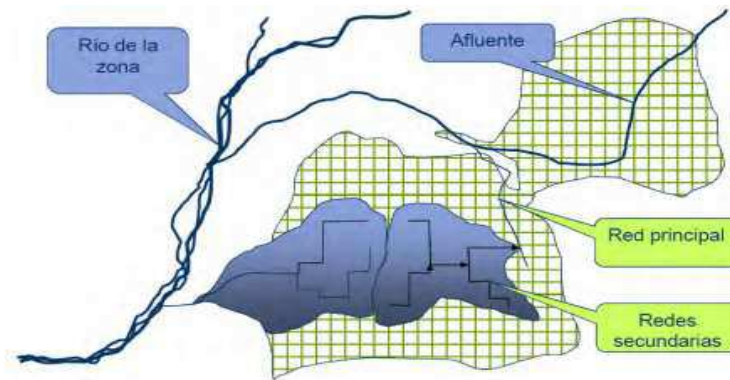


Figura 1.3. Sistema de drenaje urbano.
Fuente: (Granda, 2013)

Es importante destacar que ambos tipos de sistemas tienen características específicas que los diferencian, éstas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1.1: Características de los sistemas de drenaje pluvial.

Sistema	Características
Mayor o principal (Macrodrenaje)	<ul style="list-style-type: none"> • Cuencas regionales, grandes • Aportes externos a las ciudades • Formado por cauces naturales importantes • Cuenca aportante exterior a la zona urbana • Grandes aportes en crecidas • Diseños para Tr^d grandes (100, 1000, ... , años)
Menor o secundario (Microdrenaje)	<ul style="list-style-type: none"> • Cuencas urbanas, pequeñas • Aportes internos en las ciudades • Formado por cauces naturales menores y artificiales • Cuenca aportante interior a la zona urbana • Aportes moderados en crecidas • Diseños para Tr menores (2, 5, 10, ... , años) • Problemas menores, ejemplos: Inundaciones frecuentes en calles y avenidas. • Consecuencias de inundación: Pérdidas de bienes, incomodidades, muchos afectados.

Fuente: (Granda, 2013)

1.1.1. Problemas asociados al drenaje pluvial urbano.

Entre los principales impactos ocasionados por un inadecuado diseño de un sistema de drenaje están las inundaciones y daños a las propiedades y personas. Tradicionalmente, a nivel de urbanismo, suele diseñarse el sistema de drenaje empleando metodologías basadas en el uso del método racional para la estimación del caudal de diseño de cualquiera de los elementos que conforman el sistema. Sin embargo, como bien es sabido, este método no toma en cuenta la variabilidad temporal de la lluvia, sobreestima el caudal de diseño a medida que aumenta el área de la cuenca y por lo general se dificulta el análisis de escenarios y alternativas. Por otra parte, el diseño de los elementos se realiza suponiendo flujo uniforme, lo cual también se aleja de la realidad dado que el flujo es no permanente y variado (remansos, resaltos hidráulicos, etc.) (Rincón & Muñoz, Hydraulic design of dual drainage systems using the SWMM model, 2013).

Dentro de las ciudades los sistemas de drenaje no representan una gran preocupación para la sociedad, debido a que únicamente presentan problemas cuando existen grandes precipitaciones, y es ésta una de las razones por las que en muchas ocasiones se descuidan dichas infraestructuras causando grandes perjuicios a corto plazo dentro la ciudad, afectando de esta manera el progreso y engrandecimiento de los pueblos, y en general la calidad de vida de las personas.

Uno de los factores que aumentan los problemas asociados al drenaje urbano es el incremento de los “porcentajes de áreas impermeables, que se da como resultado del crecimiento urbanístico” (Sánchez, Nueva herramienta para análisis de sistemas de drenaje pluvial urbano, 2010) de las localidades en los últimos tiempos.

La aceleración de los procesos urbanísticos trae consigo mayor generación de basura hacia los ambientes urbanos, lo cual requiere de altas inversiones tanto en la recolección y disposición de los desechos como en la limpieza de calles y avenidas. En muchas ocasiones, dichas inversiones no se planifican al mismo ritmo en que crecen las urbanizaciones, trayendo como consecuencia la acumulación excesiva de basura y desechos sólidos que en su mayoría van a parar a los canales y sumideros de la ciudad (Sánchez, Nueva herramienta para análisis de sistemas de drenaje pluvial urbano, 2010).

La gestión de inundaciones urbanas comprende el análisis del comportamiento del agua pluvial en la red de calles y el análisis hidráulico de los elementos que interactúan con el flujo: aceras, las obras de captación (sumideros), los colectores enterrados, las propias calles y los cruces. Para este análisis, las calles se conceptualizan como canales en lámina libre con flujo predominantemente unidimensional, exceptuando los cruces que requieren de un estudio detallado por las connotaciones de su comportamiento bi o tridimensional y su impacto en la distribución de caudales (Russo, Gómez, & Martínez, 2006). Cuando se hace referencia al sistema de drenaje se incluyen tanto el sistema superficial como el subterráneo o el sub-superficial.

Las inundaciones causan millones de dólares en pérdidas económicas a nivel mundial y existe una clara tendencia de aumento debido al cambio climático y al aumento poblacional que conlleva a que más propiedades se encuentren en riesgos (Díaz, y otros, 2016). El Ecuador no está exento a esta problemática, y es en la zona costanera donde se presenta con mayor magnitud, esto es causado principalmente por los fuertes temporales invernales que año tras año azotan a la zona. Una de las poblaciones que durante décadas ha sido afectada por grandes inundaciones y que es conocida a nivel nacional, entre otras cosas por esto, es la Ciudad de Chone.

La ciudad de Chone, representada una de las fuerzas agrícolas y ganaderas más importantes del país, con gran historia y tradición cultural, de allí la importancia de contar con servicios públicos de calidad y que funcionen adecuadamente. En tal sentido, uno de los problemas que ha venido padeciendo el área urbana de la ciudad de Chone está relacionado con la deficiencia en la capacidad de los sistemas de drenaje urbano para evacuar las aguas de lluvia, lo cual origina un represamiento prolongado de dichas aguas en diversas zonas de la ciudad, afectando el flujo normal tanto de personas como de vehículos.

Otro de los problemas asociados con la acumulación de aguas pluviales en las áreas urbanas de la ciudad, tiene que ver con la proliferación de vectores y enfermedades en zonas donde se mezcla el agua residual con el agua pluvial afectando la salud de las comunidades aledañas a las áreas más críticas, del mismo modo esta acumulación excesiva de agua en calles y avenidas, ha contribuido al deterioro progresivo de la infraestructura vial, requiriendo enormes inversiones de recursos que al cabo de unos pocos años vuelven a ser necesarios, cuando la

vialidad nuevamente se afecta por el estancamiento de las aguas de lluvia (Sánchez & Strippoli, Modelo hidrológico - hidráulico para evaluar un sistema de drenaje urbano en zonas planas, 2009)

Diferentes autores suelen distinguir 4 subproblemas principales dentro del llamado problema general del drenaje urbano. Se pueden enumerar según su secuencia física como:

- Determinar la cantidad de agua con la que se trata.
- Introducir el agua en la red.
- Diseñar una red de conductos suficientes para transportar los caudales de cálculo.
- Verter dichos caudales a un medio receptor.

De los cuatro subproblemas de drenaje urbano, el primero de ellos es el problema hidrológico, es decir, determinar la cantidad de agua que se debe evacuar desde la superficie de la ciudad. El segundo se refiere a que el agua de escorrentía que se genera en la superficie, sea recogida e introducida en la red de alcantarillado subterránea. El tercer problema es el llamado problema hidráulico: diseñar una red con capacidad suficiente para que los caudales captados circulen sin problemas hasta el punto de desagüe, mientras que el cuarto de los subproblemas se refiere a estudiar las consecuencias desde el punto de vista de cantidad y calidad sobre el medio receptor (Rodríguez, 2013).

Es importante dentro de las áreas urbanas en continuo crecimiento evaluar cuál es el impacto de esa urbanización sobre el sistema de alcantarillado pluvial existente, porque como se ha mencionado, es el aumento de la población uno de los aspectos que ocasiona colapsos en las redes de drenaje, y por tanto un mal funcionamiento del mismo.

1.1.2. Respuesta hidrológica ante el crecimiento de urbanizaciones en la cuenca.

Los efectos combinados de la urbanización, la industrialización y el crecimiento poblacional alteran el paisaje natural y la respuesta hidrológica de las cuencas.

Durante una tormenta, la precipitación cae sobre el terreno en cantidades que varían notablemente en magnitud e intensidad. La parte de la precipitación que no es interceptada

por la vegetación, al llegar al suelo se infiltra o comienza a escurrir. La lluvia que se infiltra es una pérdida de escurrimiento, aunque después puede aparecer como descarga o drenaje de los suelos.

El flujo sobre el terreno llega a los riachuelos y estos posteriormente forman los cauces secundarios los cuales finalmente definen el colector principal de la cuenca. Ya sea sobre el terreno o bien en los cauces, el agua para fluir debe tener un tirante o lámina y entonces por consecuencia, una parte del escurrimiento es almacenado temporalmente en la cuenca. Este almacenamiento natural tiene un efecto de atenuación del escurrimiento, es decir que reduce la magnitud del flujo de respuesta de la cuenca. Entre más vegetación tiene la cuenca, más atenuación ocurre en el flujo sobre terreno y en los cauces (González, 2013).

En el caso de una cuenta urbanizada una gran parte de su superficie que tenía vegetación o suelo natural se vuelve impermeable, debido a la construcción de casas (techos y patios), calles, banquetas y estacionamientos. Los efectos de esta impermeabilización son varios, por ejemplo, la lluvia ya no se infiltra y por lo tanto el volumen de escurrimiento se incrementa. En la siguiente figura se presenta el efecto sobre las variables del ciclo hidrológico debido a la urbanización.

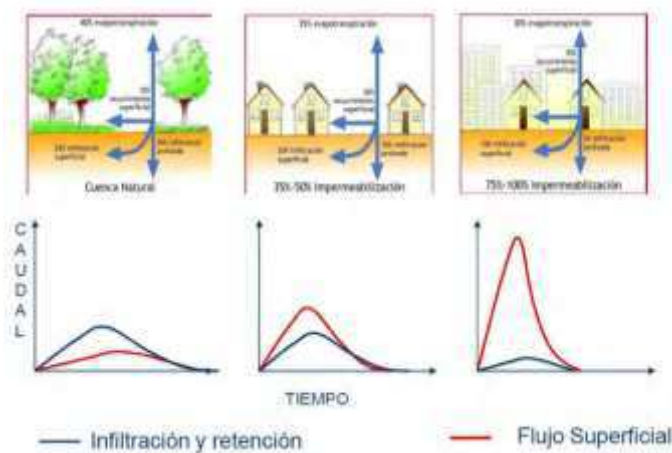


Figura 1.4. Características del balance hídrico de una cuenca.

Fuente: (Granda, 2013)

Los procesos de urbanización implican el incremento de áreas más impermeables lo cual genera dos efectos en el ciclo hidrológico urbano; por un lado un mayor volumen de escurrimiento superficial del agua de lluvia y en segundo lugar el lavado y transporte de fuentes difusas de contaminación que posteriormente son descargadas a los cuerpos

naturales de agua (Sánchez, Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas, 2012).

El tiempo de concentración y de rezago son variables utilizadas extensivamente en el diseño hidrológico para determinar la capacidad hidráulica máxima de diferentes estructuras; se trata de variables que son propias para cada sitio y que dependen de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia (Vélez & Botero, 2011). El tiempo de concentración también es conocido como el tiempo de respuesta o de equilibrio; Según (Llamas Siendones, 1993) se define como el tiempo requerido para que durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe.

Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe. Lo cual no siempre corresponde al fenómeno real, pues pueden existir lugares en la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al desagüe que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante ya que depende ligeramente de las características de la lluvia.

El estudio y la modelación del movimiento del agua pluvial en zonas altamente urbanizadas es un asunto complejo, más aun cuando se requiere determinar el riesgo de inundación ante la ocurrencia de un evento de lluvia extremo (Sánchez, Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas, 2012). Según (Lancaster, Preene, & Marshall, 2004) las inundaciones se clasifican en 4 categorías: inundaciones costeras, fluviales o producto de los desbordamientos de ríos, las inundaciones por ascenso del nivel freático (subterráneas) y las inundaciones pluviales o localizadas, estas últimas estudiadas por la Hidrología Urbana. Esta rama de la Hidrología analiza el ciclo del agua a una escala mucho menor que los procesos hidrológicos en ambientes rurales o naturales, cabe resaltar, que las investigaciones en esta área se han incrementado a nivel mundial y en América Latina, tanto en el mejoramiento de las técnicas de análisis como la aparición de nuevas herramientas computacionales aplicadas para la evaluación y diseño.

Es importante que los diseños de sistemas de drenaje tengan entre sus prioridades el incremento de la urbanización en las zonas de estudio, debido a que este parámetro traerá variaciones en la respuesta hidrológica de la cuenca ante diferentes escenarios hidrometeorológicos.

1.2. La modelación matemática de las redes de drenaje pluvial urbano

Las redes de drenaje pluvial son complejos sistemas de tuberías y construcciones utilizados para la recolección y transporte de las aguas producidas por precipitaciones, desde el sitio en donde se generan hasta el sitio en que se vierten al medio natural o para que sean tratadas. La complejidad que estos grandes sistemas poseen ha llevado a ingenieros y demás profesionales vinculados al tema, a desarrollar modelos que permitan comprender y evaluar de manera más eficaz su funcionamiento.

En ingeniería la modelación es la representación matemática más o menos simplificada de un fenómeno físico observable que permite simular su funcionamiento y así estudiar el efecto de determinados parámetros y que permite realizar previsiones (Berroeta, Santiabañez, Clarys, & Diericks, 2000).

El constante y acelerado avance de la tecnología ha ayudado a desarrollar softwares de modelación que permiten contar con potentes capacidades de cálculo, resolviendo con rapidez las ecuaciones matemáticas representativas de fenómenos físicos determinados.

Según Triviño (2004), citado por (Rodríguez, 2013) simular el comportamiento de una cuenca hidrológica con la ayuda de un modelo matemático cobra sentido cuando la información obtenida con el mismo resulta imprescindible para lograr un objetivo difícilmente alcanzable por otros medios menos costosos. Los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conversión lluvia-caudal, aportando datos sobre la distribución espacial de la escorrentía superficial y mejorando la calidad de la cartografía temática sobre zonas inundables zonas de riesgo de inundación.

De acuerdo con Pérez (2001), citado por (Cabrera E. , Sistema para la administración de la Explotación de Agua Subterránea, 2009) en ingeniería hidráulica la simulación se ha logrado utilizando fundamentalmente seis tipos de modelos: numéricos, estadísticos, de flujo de tuberías, analógicos, físicos y analíticos. En la actualidad los modelos numéricos son los más empleados ya que presentan generalmente una rapidez en la obtención de los

resultados, posibilidades de generalización, bajo costo para un nivel aceptable de realización y precisión en sus resultados.

Según (Granda, 2013) un modelo numérico es una representación matemática de un fenómeno del medio ambiente; utilizado para simular las condiciones ambientales y su respuesta ante estímulos o impactos determinados. Una vez que el modelo ha sido seleccionado o construido pueden ser evaluados los efectos de la acción propuesta y sus alternativas de solución.

1.2.1. Problemas y etapas de la modelación matemática en redes de drenaje pluvial urbano.

Son varios los problemas asociados a las redes de drenaje pluvial urbano, entre los que se pueden solucionar con un modelo matemático se analizarán básicamente dos: revisión de una red existente y diseño de una red. El primero de los casos es también conocido como directo y es el más simple, se deben contar con los datos de configuración en planta y altimetría de la red, de la misma manera es importante tener información de ubicación, cotas y dimensiones de los pozos, sumideros y demás elementos que conforman la red además de materiales, longitudes y diámetros de las tuberías. En esta situación los problemas que se analizan son los niveles de agua en cada una de las conducciones y los flujos.

Mientras que en el segundo de los problemas se parte de un modelo de elevación del terreno y se pudiera proponer una configuración de la red, sin embargo se desconocen diámetros, pendientes y cotas de las tuberías y pozos. En este caso se deben considerar los costos globales para la inversión en la red, para el análisis de estos costos se debe tratar siempre de optimizar recursos teniendo en cuenta pendientes máximas y mínimas, velocidades en las tuberías, entre otros aspectos.

De acuerdo con las diferentes etapas de diseño y de revisión de redes de drenaje pluvial, es necesario partir de una base de datos topográfica, edafológica, hidrológica e hidráulica, que permitirá esquematizar el trazado preliminar de la red de drenaje pluvial. Como criterio para establecer la capacidad de infiltración, se supone que las subcuencas definidas en la zona donde se implemente la estrategia, tengan cierta capacidad de infiltración y obedezcan a modelos en función del contenido de humedad precedente de los suelos. Los ensayos de campo geotécnicos son recomendables con adecuado nivel de

confianza, para caracterizar la permeabilidad de las diferentes unidades o formaciones geológicas presentes en el área de estudio. Cuando no se cuenta con estudios y datos de permeabilidad de los suelos basados en mediciones de campo, se recomienda su estimación como parámetros de calibración, tal como se expresa en (Da Silva, Martínez, & Jiménez, 2014). Para la precipitación se tiene como criterio que siempre que la intensidad de la lluvia sea menor que la capacidad de infiltración, se infiltra todo lo que llueve y, en caso contrario, la diferencia se traduce en escurrimiento (Da Silva, Martínez, & Jiménez, 2016).

No menos importante es tener en cuenta el análisis espacial preliminar de las relaciones existentes entre el sector objeto de estudio y los sectores vecinos, para esclarecer el comportamiento de los escurrimientos entre los barrios colindantes; de dónde vienen y hacia dónde van.

Se recaba para el diagnóstico de la red de drenaje pluvial, la información pluviográfica y/o pluviométrica de estaciones climatológicas situadas próximas a la zona en estudio y en diferentes formatos. En ocasiones, cuando predomina la escasez de datos, resulta necesario introducir patrones de lluvia adimensionales, aplicando analogía con cuencas vecinas o a partir de estudios reportados en la literatura especializada según (Mul 2009) citado por (Da Silva, Martínez, & Jiménez, 2016). La selección del modelo de infiltración, partiendo del tipo y usos de suelo en la cuenca urbana analizada, permitirá caracterizar los parámetros de infiltración y diagnosticar las vías en términos de velocidad y profundidad de circulación.

De acuerdo con Sánchez (2012) citado por (Da Silva, Martínez, & Jiménez, 2016), los registros de escurrimiento en la cuenca en forma de hidrogramas o huellas de avenida, son incluidos en el proceso de calibración. Identificadas las vías de mayor peligro en términos de velocidad y profundidad de circulación por el proceso de diagnóstico, se procede a la **etapa del diseño de la red de drenaje pluvial** para cierto periodo de retorno T_r , el cual es seleccionado acorde con normativas vigentes o a partir de criterios técnico económicos, donde será efectuado el dimensionamiento de conducciones, captaciones y estructuras complementarias.

Los caudales obtenidos dependerán de las condiciones topográficas, del criterio de peligro empleado y de la tormenta de diseño asociada, así como del área a drenar. Se deben

dimensionar las estructuras del sistema de drenaje pluvial de acuerdo con criterios particulares de diseño, construcción y operación. Para este nivel de la estrategia, pueden ser empleadas diferentes herramientas de diseño racional de redes de drenaje pluvial. Resultarían muy atractivas aquellas soluciones que pudieran concebirse, si el modelador dispone de herramientas que introduzcan técnicas de optimización, para obtener la red de drenaje pluvial de costo mínimo.

La verificación de la estrategia se hace a partir del tránsito de avenidas por la red de drenaje pluvial para periodos de retorno superiores al de diseño, evaluando la posible sobrecarga o no de la red, tanto en el interior de los conductos como en los nodos de la misma, con el objetivo de evaluar si las estructuras de las redes de drenaje pluvial han sido sub-diseñadas o resultan sobre-diseñadas durante la operación del sistema.

Existen básicamente cuatro etapas para la modelación matemática en redes de drenaje pluvial urbana, estas son: caracterización, calibración, validación y simulación.

Caracterización: Esta etapa está orientada a la búsqueda de información detallada y al análisis de la información, realizando una investigación exploratoria del sistema, entre otros parámetros, esto con el objetivo de recabar los datos necesarios para la elaboración del modelo.

Calibración: Dentro de esta etapa tienen lugar la asignación de coeficientes y parámetros que representan las condiciones físicas del fenómeno a modelar, determinar de manera correcta cada uno de estos parámetros permitirá tener mejores resultados.

Validación: En esta etapa se prueba el modelo con estímulos o eventos reales y se valida la veracidad del mismo, si los resultados son aceptables se procede a continuar con la etapa final de simulación, caso contrario se debe verificar el proceso de calibración.

Simulación: Finalmente cuando se ha validado el modelo con los eventos reales se procede a realizar la simulación, así se brinda una herramienta muy útil para evaluar la respuesta del sistema ante eventos externos, de esta manera los técnicos pueden tomar decisiones más acertadas sin necesidad de que realmente ocurran problemas en el sistema.

1.2.2. La modelación dual del drenaje pluvial urbano, una idea revolucionaria.

Entre los principales impactos ocasionados por un inadecuado diseño de un sistema de drenaje están las inundaciones y daños a las propiedades y personas. Tradicionalmente, a nivel de urbanismo, suele diseñarse el sistema de drenaje empleando metodologías basadas en el uso del método racional para la estimación del caudal de diseño de cualquiera de los elementos que conforman el sistema. Sin embargo, como bien es sabido, este método no toma en cuenta la variabilidad temporal de la lluvia, sobreestima el caudal de diseño a medida que aumenta el área de la cuenca y por lo general se dificulta el análisis de escenarios y alternativas. Por otra parte, el diseño de los elementos se realiza suponiendo flujo uniforme, lo cual también se aleja de la realidad dado que el flujo es no permanente y variado (remansos, resaltos hidráulicos, etc.) (Rincón & Muñoz, Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM, 2013).

En la actualidad, con los grandes avances de la tecnología, se han desarrollado modelos matemáticos numéricos, de libre acceso, que brindan la posibilidad de predecir con mayor precisión la respuesta de un sistema de drenaje ante diferentes escenarios de precipitaciones de una forma eficiente.

Debido al continuo crecimiento de las ciudades, o a la ocurrencia de un extraordinario evento de precipitaciones, en muchas ocasiones sobrepasa las medidas de diseño de algunos de los elementos de drenaje urbano, es especial de los colectores, provocando que el sistema de drenaje de determinada población sea incapaz de desalojar el escurrimiento provocado por dicho evento (Aragón-Hernández, 2013). Teniendo como resultado inundaciones que traen consigo pérdidas innumerables tanto económicas como humanas.

Hoy en día, la gran mayoría de los estudios hidrológicos e hidráulicos de cuencas urbanas se realiza asumiendo que la escorrentía generada en superficie se introduce en la red de colectores en los puntos más próximos pertenecientes a dicha red para cada zona y, a partir de aquí, se realiza el cálculo hidráulico de los conductos. En ellos, generalmente, no se consideran en detalle las interacciones entre lo que sucede en superficie y lo que pasa en la red subterránea. Así, como ejemplo simplificador, no se evalúa el flujo en calles y las transferencias de caudal que pueden darse: entradas a la red de alcantarillado

vía sumideros o salidas de la misma cuando entra en carga y, consecuentemente, se produce retorno de agua al exterior (Múrcia-Balaguer, 2011). Por esta razón es importante analizar las ventajas ofrecidas por un modelo dual.

De forma general, se puede decir que un sistema de drenaje dual urbano está formado por tres sistemas: un sistema superficial de transporte de escorrentía (sistema menor) y un sistema de captación de la escorrentía superficial (Figura 1.5) (Múrcia-Balaguer, 2011).

El sistema superficial está compuesto en la mayoría de los casos por las calles, éstos son elementos primarios de transporte de la escorrentía superficial. La programación de flujo en dichos elementos se puede realizar utilizando una aproximación unidimensional o bidimensional del flujo no permanente en lámina libre. Si el flujo en la calle permanece confinado por los bordillos, una aproximación unidimensional parece ser la mejor opción, pues al coste computacional es mucho menor en relación a una aproximación bidimensional (Leandro, et al., 2009) citado por (Múrcia-Balaguer, 2011).

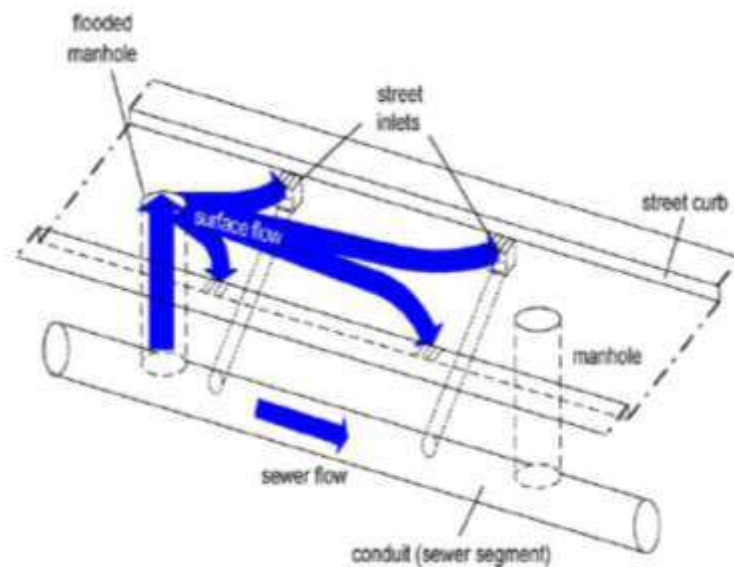


Figura 1.5. Esquema de un sistema de drenaje dual urbano.

Fuente: (Múrcia-Balaguer, 2011)

1.3. Aplicación de los Sistemas de Información Geoespacial SIG, a la modelación matemática de los sistemas de drenaje pluvial urbano.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han irrumpido en el mundo de la tecnología de manera muy rápida, gracias al abaratamiento de los equipos informáticos.

Esta irrupción rápida ha propiciado que en mundo se hable frecuentemente de ellos y se planee utilizarlos, a menudo sin tener muy claro qué son en realidad y qué son capaces de hacer.

Existen numerosas definiciones de un SIG, según (ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc), 1990) “un SIG es un conjunto organizado de hardware, software y datos geográficos, diseñado específicamente para capturar, almacenar, poner al día, manipular, analizar y mostrar todo tipo de información referenciada geográficamente.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente mediante la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no se podría obtener de otra forma.

Debido a la necesidad de integrar el conocimiento científico a otras disciplinas, se hace necesario realizar análisis que permitan manejar información con base espacial. Por esta razón, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son la herramienta idónea para estos proyectos ya que se puede utilizar información variada y de distintas fuentes que facilita el análisis simultáneo de un mismo problema.

Teniendo en cuenta lo ya mencionado, es importante distinguir entre datos geográficos e información geográfica. Datos geográficos son aquellos datos que tienen una referencia geográfica sobre la superficie terrestre. Información geográfica es un juego interrelacionado de datos geográficos que representan una realidad territorial y que han sido seleccionados con un finalidad determinada. La información geográfica es pues fruto de un proceso interpretativo y subjetivo en virtud del cual un conjunto de elementos gráficos pasa a representar una realidad geográfica o un conjunto de elementos del mundo real (Rodríguez, 2013).

Unas líneas en un plano pueden ser datos geográficos si están correctamente georreferenciados. Pero para que se consideren información geográfica deberán contener información suplementaria, con el fin de conocer el elemento al que corresponde. Deberá tener una continuidad entre tramos y una dirección, porque en caso contrario no podrá representar las características del elemento. Para que unos datos geográficos puedan

configurarse como información geográfica, deben reunir ciertas características que pueden resumirse en las tres siguientes:

- **Georreferenciación:** Los datos tienen que estar definidos en el espacio mediante un sistema de coordenadas geográficas referido a un sistema de proyección.
- **Atributos:** Tienen que poderse relacionar el dato geográfico con unos atributos alfanuméricos que definen y describen su naturaleza real.
- **Relación espacial con otros elementos similares:** Tiene que ser posible conocer cómo se relaciona con otros elementos similares o distintos: continuidad, sentido, proximidad, etc. Es lo que se denomina como relaciones topológicas o topología, faltaría el tiempo (instante de existencia del dato).

1.3.1. Etapas de pre y post procesamiento de la información espacial.

Por ser tan versátiles, el campo de aplicación de los Sistemas de Información Geográfica es muy amplio, pudiendo utilizarse en la mayoría de las actividades con una componente espacial. La profunda revolución que han provocado las nuevas tecnologías ha incidido de manera decisiva en su evolución.

Heaney et. al, (2001) citado por (Sánchez, Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas, 2012) propone 4 métodos para definir las diferentes formas en que un SIG se puede vincular con un modelo hidrológico-hidráulico para zonas urbanas. Estos métodos son: el intercambio de datos, programa intermedio, programa interface y programa de integración.

Los SIG como herramientas para pre – procesar datos pueden ser usados en dos sentidos a) como un preprocesador de almacenamiento simple de los datos espaciales b) Como preprocesador para estimar parámetros de entrada a los modelos. Por otro lado, las aplicaciones SIG orientadas al post – procesamiento se han desarrollado para procesar rápidamente las salidas de los modelos de simulación mediante la integración de la geometría espacial con los resultados hidráulico que permiten visualizar en la cuenca urbana mapas de profundidad del agua (mapa de peligrosidad), mapas de los vectores de velocidad, o para obtener estadísticas espaciales (Sánchez, Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas, 2012).

1.4. Principales modelos de simulación del drenaje pluvial urbano.

La filosofía con la cual se han construido los modelos matemáticos computacionales en la última década, encuadra dentro del enfoque de modelación integrada, donde se vinculan en un solo modulo la transformación lluvia – escorrentía y el transito hidráulico en el medio urbano, de acuerdo a Meller A, (2004), citado por (Sánchez, Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas, 2012)

En el mercado hay disponibles diversos tipos de programas para la modelación del flujo de agua dentro del medio urbano tanto en canales como en el sistema de alcantarillado pluvial; entre ellos se puede mencionar: MOUSE, SWMM, MIKE 11, MIKE 21, SOBEK, HYDRUS-2D, HEC HMS y HEC-RAS, TABS-MD, AUTODESK STORM AND SANITARY ANALYSIS, entre otros. A continuación se describen sus características generales:

MOUSE: Sistema integrado de diseño y modelización de sistemas de escorrentía superficial, canales y redes de conducciones que permite acometer estudios de calidad de aguas, transporte de sedimentos y diseño de redes de pluviales y saneamiento. No es de libre acceso (Miliarium Aureum, S.L., 2011).

SWMM (Storm Water Management Model): Programa de modelización y diseño de redes urbanas de saneamiento y drenaje de aguas pluviales (Miliarium Aureum, S.L., 2011)

- **MIKE SWMM** Versión de Boss International (\$)
- **SWMM** Versión EPA

MIKE 11: Se trata de uno de los modelos más utilizados desde hace años en Europa. Desarrollado por el DHI, permite simular flujo en cauces, llanuras de inundación, en diferentes brazos del mismo río, etc. Se utiliza frecuentemente a la hora de estudiar propagación de avenidas. Permite la interacción con otros modelos del DHI, como MIKE 21 (Flujo bidimensional) MOUSE, etc. (Bladé, Sánchez-Juny, Sánchez, Niñerola, & Gómez, 2009).

MIKE 21: Es un modelo de última generación en el campo de la modelación costera. Puede simular procesos físicos, químicos y biológicos en ambiente marino (ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc), 1990).

SOBEK: Modelo desarrollado por Delft Hydraulics, recientemente ha aparecido en el mercado. Presenta una interfaz gráfica de elevada calidad y ha sido pensado para operar ya en un entorno GIS. Presenta un motor gráfico muy avanzado y versátil, permitiendo la interacción con otros modelos de simulación, por ejemplo SOBEK-URBAN para análisis de inundación en zonas urbanas, estudios de calidad de aguas superficiales, e incluso análisis bidimensional (Bladé, Sánchez-Juny, Sánchez, Niñerola, & Gómez, 2009)

HYDRUS-2D: Modelo bidimensional de simulación del flujo de agua y transporte de solutos a través de un medio poroso con saturación variable (Miliarium Aureum, S.L., 2011).

HEC HMS y HEC-RAS: Modelo de dominio público de simulación de curvas de remanso en régimen estacionario, unidimensional, con flujo gradualmente variado en cauces naturales y canales (Miliarium Aureum, S.L., 2011).

TABS-MD: Modelo de simulación para el estudio multidimensional de la hidrodinámica en ríos, embalses, bahías y estuarios. Puede utilizarse en el estudio del flujo y el impacto sobre transporte y deposición de sedimentos y salinidad (Miliarium Aureum, S.L., 2011).

AUTODESK STORM AND SANITARY ANALYSIS: es una completa aplicación para realizar análisis hidrológicos e hidráulicos. Ayuda a planificar y diseñar sistemas de desagüe urbanos, alcantarillado para aguas pluviales (sistemas de drenaje de carreteras incluidos) y sistemas de saneamiento. Integra el análisis de aguas pluviales y aguas residuales durante la planificación y el diseño. De este modo, contribuye a mejorar la productividad general del proyecto y a incrementar la capacidad de ingeniería (AUTODESK Knowledge Network, 2016).

En la última década, numerosas investigaciones sobre la modelación y análisis del flujo en superficies urbanas han sido desarrolladas, unas orientadas a la creación de nuevos modelos y otras al mejoramiento de su interfaz gráfica o de su algoritmo numérico para reducir el tiempo invertido en máquina. En general, los modelos más conocidos por su continua aplicación en problemas de drenaje urbano son el MOUSE (En Europa) y el

SWMM (América), ambos permiten trabajar con la planeación ya que están diseñados para proporcionar una perspectiva de los efectos en la cantidad y calidad del agua pluvial en ambientes urbanos, sin embargo el SWMM a diferencia del MOUSE es de dominio público. La primera versión fue desarrollada a finales de 1971 por Metcalf and Eddy, de la Universidad de Florida (Resources Engineers for the U.S. Environmental Protection Agency EPA).

1.4.1. Modelo SWMM, características y desarrollo.

El modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM (Storm Water Management Model) de la agencia de protección del medio ambiente de los Estados Unidos (USEPA. U.S. Environmental Protection Agency), es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico- hidráulico de un sistema de drenaje urbano. Este modelo lleva más de treinta años de uso en los Estados Unidos y se ha difundido por todo el mundo, siendo una herramienta de cálculo reconocida a nivel mundial (Rodríguez, 2013).

Es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico SWMM analiza el recorrido de esta agua a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Así mismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad de agua de escorrentía de cada cuenta, así como el caudal, el nivel de agua en los posos o la calidad de agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo (Rodríguez-Anzola & Rodríguez-Duarte, 2014).

Desde su creación en 1971 hasta la actualidad ha tenido innumerables e importantes mejoras, y debido a sus grandes beneficios es considerado como uno de los modelos más utilizados en el mundo. En el año 2002, la EPA's Water Supply and Water Resources Division y la firma consultora CDM acordaron desarrollar la versión de SWMM completamente reescrita. El objetivo de este proyecto fue aplicar técnicas modernas de programación para producir un programa más fácil de mantener, extender y usar. A la

vez, un riguroso programa de certificación de calidad fue desarrollado para asegurar que los resultados obtenidos por la nueva versión fueran compatibles con versiones anteriores.

1.3.3.1. Estructura del modelo.

De acuerdo con (Granda, 2013) SWMM básicamente está compuesto de la siguiente manera:

a) Fuente de datos: El bloque Runolff genera escorrentía superficial y subsuperficial basado en hietogramas de precipitación, condiciones previas, uso de suelo y topografía. El flujo base puede ser generado usando el Bloque Transport.

b) Cuerpo central: Lo constituyen los bloques Runolff, Transport y Extran simula flujos y compuestos contaminantes a través del sistema de alcantarillado.

c) Dispositivos de tratamiento: Lo constituyen los bloques Storage/Treatment que caracterizan los efectos de los dispositivos de control de flujo y calidad.

1.3.3.2. Características del modelo hidrológico de escorrentía en SWMM.

El modelo SWMM considera distintos procesos hidrológicos producidos en la salida de las aguas urbanas. Entre éstos se pueden mencionar los siguientes:

- Precipitaciones variables en el tiempo
- Evaporación de las aguas superficiales estancadas
- Acumulación y deshielo de nieve
- Intercepción de precipitaciones por almacenamiento en depresiones
- Infiltración de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas
- Entrada del agua de la infiltración en acuíferos
- Intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de transporte
- Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial

La variabilidad espacial en todos estos procesos se alcanza dividiendo una determinada área de estudio en áreas de captación de agua más pequeñas y homogéneas denominadas subcuencas. Cada una de éstas contiene su propia fracción de subáreas permeables e impermeables. El flujo superficial puede producirse entre las distintas subáreas, entre las distintas subcuencas o entre los puntos de entrada al sistema de drenaje (Granda, 2013).

1.4.2. ¿Qué modelo usar?

La elección del modelo y del método de modelado dependerá siempre de la finalidad, la escala espacial del problema, el nivel de detalle requerido, la disponibilidad de datos y el tiempo y las restricciones de gastos para el problema urbano particular que se está investigando.

Se considera que no es la solidez matemática del modelo, el único criterio para su selección y aplicación, el énfasis y la orientación de esta investigación se focaliza en analizar otros aspectos como: la disponibilidad (comercial o dominio público), su factibilidad para ser implementado en zonas predominantemente planas y su facilidad para la edición, pre y post-procesamiento de la información.

Por lo anteriormente indicado y luego de la respectiva investigación se decide utilizar el modelo matemático SWMM 5.0 para este trabajo de investigación, debido a que brinda un estable y potente esquema numérico, es de dominio público, existe gran confiabilidad en los resultados que se obtienen de sus simulaciones, y para finalizar es ampliamente utilizado a nivel mundial por lo que se encuentra variada información que respalda su eficiencia.

1.5. Sistema de Alcantarillado pluvial de la ciudad de Chone.

De acuerdo con los datos históricos, la ciudad de Chone, ubicada en la provincia de Manabí ha soportado más de 200 inundaciones en un período de 35 años, hasta el año 1998. En términos generales, las inundaciones que soporta la ciudad son de recurrencia anual, aún en períodos invernales de baja intensidad, todo esto ha traído como consecuencia la afectación directa a las actividades humanas que se desarrollan en la zona de influencia, dando origen a la reducción de la tasa de crecimiento demográfico de la ciudad, intensificación del trabajo informal e incremento de la desocupación.

Uno de los principales problemas que causan dichas inundaciones es mal estado del sistema de alcantarillado pluvial, en muchos sectores de la ciudad no existen redes para la evacuación de aguas lluvias, en otros no ha existido el correcto mantenimiento del sistema por lo que se encuentran inoperantes y varias zonas resulta insuficiente para las condiciones actuales.

Por lo ya mencionado, resulta importante analizar el funcionamiento del sistema actual con cada una de sus falencias y la respuesta que éste tendrá ante diferentes eventos de precipitaciones. Cada uno de estos parámetros ha motivado esta investigación, con la que se pretende evaluar el funcionamiento de la red y con esto brindar a los técnicos del GADM de Chone un modelo matemático del sistema de alcantarillado pluvial actual de la ciudad en el software SWMM.

1.6. Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.

Luego de un profundo análisis de la bibliografía investigada se puede concluir en que se encuentra en constante crecimiento el interés de científicos y profesionales técnicos en modelar numéricamente los diferentes fenómenos que ocurren habitualmente en los sistemas de drenaje pluvial urbano, así se podrán obtener métodos más precisos y confiables que permitirán atenuar de alguna manera los efectos de las inundaciones en las ciudades causados por el mal funcionamiento de los sistemas de alcantarillado pluvial. Esta amplia información bibliográfica confirma la actualidad del tema de investigación y la importancia que tienen este tipo de modelos.

La modelación matemática es la tecnología más utilizada en el mundo para comprender la dinámica del funcionamiento de los sistemas de drenaje pluvial. Esta modelación se materializa con la existencia de robustos modelos numéricos dotados en softwares con interfaces que permiten gestionar toda la información espacial y de atributos importantes para las etapas de pre y post procesamiento. Frecuentemente los modelos pueden utilizarse en conjunto con un Sistema de Información Geoespacial que permiten también el intercambio de ficheros.

Finalmente, se realiza un análisis de cada uno de los modelos matemáticos de redes de drenaje pluvial urbano más utilizados en el campo de la ingeniería. Con dicho análisis se determina que la plataforma idónea a emplear para la creación del modelo de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone es la de SWMM 5.0. Este modelo posee una gran solidez matemática, así como una amplia confiabilidad en los resultados que se obtienen, es de dominio público y a lo largo de los años ha tenido un continuo y amplio desarrollo y perfeccionamiento, por lo que se ubica entre los que posee mayor aceptación en todo el mundo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.1 Análisis estadístico de los eventos de precipitación máxima

Para la determinación de los caudales que deben ser evacuados por el sistema de drenaje urbano se debe entender que estos son generados por eventos de lluvias intensas que suceden en las áreas urbanas. En tal sentido, es de vital importancia tener un conocimiento lo más preciso posible de las características de los eventos pluviométricos (aguaceros o tormentas) a los que va a estar sometida una cierta ciudad. Esta es una información de partida tanto para el diseño como la revisión de los sistemas de drenaje pluvial urbano. Desde el punto de vista de la modelación matemática de los sistemas de alcantarillado pluvial, la lluvia viene a constituir un estímulo sobre el sistema y lo que se obtiene del mismo es su respuesta ante dicho estímulo (Cabrera, y otros, 2016).

Las precipitaciones se miden normalmente en términos de la altura de la lámina de agua generada por la lluvia caída y se expresan comúnmente en milímetros. Esta lámina indica la altura de agua que se acumula en una superficie horizontal (PHI-UNESCO_DT29, 2013).

Se entiende por tormenta al conjunto de lluvias asociadas a una perturbación meteorológica. También se puede definir como el período de fuerte lluvia ininterrumpida que raramente sobrepasa una duración de algunas horas (Robredo, s.f).

En general, para definir una tormenta de diseño, en una cuenca hidrológica, es necesario considerar a las variables involucradas con la magnitud, la duración, la frecuencia o probabilidad de ocurrencia, la porción de área que abarca la tormenta y la distribución de la lluvia en el tiempo o hietograma de diseño (García, 2006).

Con lo dicho anteriormente se puede entender que una característica que presenta la lluvia (en especial los eventos de lluvia máxima, tormentas), es que para su análisis desde el punto de vista de ingeniería es muy común tratarla como una variable estadística de tipo aleatoria, y en este sentido es vital contar con la mayor cantidad posible de registros diarios, mensuales y anuales de dicha variable, para poder determinar por ejemplo la precipitación media máxima diaria, la frecuencia con la que un evento de lluvia de una determinada intensidad se puede repetir, etc.

2.1.1. Concepto de período de retorno

La probabilidad p de ocurrencia de un evento extremo aleatorio x que se puede definir con la siguiente expresión:

$$p = P(x \geq x_T) \quad (2.1)$$

Está íntimamente relacionada con el llamado período de retorno, denotado con la letra T de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{p} \quad (2.2)$$

El periodo de retorno de un evento con una magnitud dada puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada (Acosta & Sierra, 2013), o sea cada cuánto tiempo es posible que acontezca un evento de una determinada naturaleza (Robredo, s.f).

Por lo tanto la probabilidad de no ocurrencia de un evento extremo para N años será:

$$P(x < x_T) = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (2.3)$$

Siendo: x y x_T el evento aleatorio a analizar y el valor máximo de la variable aleatoria para el cual se quiere conocer la probabilidad de no ser excedido.

2.1.2. Ajuste estadístico de series de lluvias máximas a la función de distribución acumulada de eventos máximos de Gumbel.

Las series de lluvias máximas pueden ajustarse de forma muy precisa a funciones de distribución de frecuencias (llamadas de valores máximos) como por ejemplo: Gumbell, GEV (Valores extremos generalizados), Log Pearson III, etc, ver Rodríguez (2013). En este trabajo se empleará la distribución de frecuencias de valores extremos de Gumbel por cuanto es un referente internacional para este tipo de estudios (HidrojING, 2013).

Dicha distribución tiene la siguiente función de distribución acumulada

$$F(x_T) = P(x \leq x_T) = e^{-e^{-\left(\frac{x_T-u}{\alpha}\right)}} \quad (2.4)$$

En donde los términos α y u responden a las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot S \quad (2.5)$$

$$u = \bar{x} - 0.5772 \cdot \alpha \quad (2.6)$$

Donde:

$F(x_T)$ es la probabilidad de que el límite x_T de la variable aleatoria x no sea superado

\bar{x} y S son la media y la desviación estándar de la serie estadística.

α y u son parámetros de la función de distribución acumulada de Gumbel.

A continuación se obtendrá el valor de la precipitación x_T para un período de retorno T determinado.

Combinando las expresiones 2.1, 2.2 y 2.4 se puede llegar a una relación entre el período de retorno y la función de distribución $F(x_T)$.

$$\frac{1}{T} = 1 - F(x_T) \quad (2.7)$$

Despejando la función de distribución y sumando queda la siguiente expresión:

$$F(x_T) = \frac{T-1}{T} \quad (2.8)$$

Por otra parte, la expresión 2.4 puede ser simplificada si se concibe la variable reducida y_T , quedando como se muestra en 2.10.

$$y_T = \frac{x_T - u}{\alpha} \quad (2.9)$$

$$F(x_T) = e^{-e^{-y_T}} \quad (2.10)$$

Si a la expresión 2.10 se le aplica dos veces la ley fundamental de los logaritmos de forma inversa se obtiene que:

$$y_T = -\ln\left(\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right) \quad (2.11)$$

Combinando las expresiones 2.9 y 2.11 se obtiene la siguiente expresión del valor de la precipitación x_T para un período de retorno T determinado.

$$x_T = \left\{ \alpha \cdot \left[-\ln \left(\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \right\} + u \quad (2.12)$$

Estas expresiones serán empleadas en el capítulo 3 para el cálculo de las precipitaciones medias máximas diarias probables.

2.1.3. Análisis de homogeneidad y pruebas de bondad de ajuste de las series de lluvias máximas.

2.1.3.1. Análisis de homogeneidad.

Según González et al. (2003), los estudios estadísticos con series de lluvias y caudales máximos deben primeramente comprobar la homogeneidad de la serie. Este análisis de homogeneidad tiene dos fases la primera: fase exploratoria que permite la detección de comportamientos específicos de la muestra o propiedades importantes de los registros. Esto se logra con análisis gráfico (curvas de simple o doble masa) y el cálculo de estadígrafos básicos, como media, desviación típica, varianza, etc. Si en las curvas de simple masa no aparecen tramos con distorsiones o con diferencias marcadas de pendientes, lo que evidencia un comportamiento uniforme se puede asegurar que en principio la serie es homogénea.

Para reafirmar esta valoración, las series deben someterse a una fase más rigurosa que se conoce como fase confirmatoria, en la cual se aplican pruebas estadísticas de detección de cambio en la media, la varianza y la tendencia de las series. Existen un amplio grupo de pruebas paramétrica y no paramétricas para ser empleadas en esta fase (González et al., 2003), una de las pruebas más usadas con este fin es la prueba de Student que será empleada en este trabajo y cuyo procedimiento podrá ser consultado en el anexo A1.

2.1.3.2. Prueba de bondad de ajuste de Smirnov Kolmogorov.

Una vez que se garantiza la homogeneidad de la serie, esta se ajusta a una función teórica de probabilidades y para tener certeza que este ajuste es lo suficientemente preciso es necesario aplicar un test de bondad de ajuste. Uno de los test más usados en este tipo de estudios es el conocido Test o prueba de Smirnov Kolmogorov también conocido por test

de Diferencia absoluta máxima (González et al., 2003). En el anexo A2 aparece el procedimiento de esta prueba.

2.1.4. Curvas de intensidad frecuencia y duración IFD.

Una forma de caracterizar las precipitaciones máximas en un punto o una zona determinada es por medio de la intensidad de precipitación, que representa la cantidad de lluvia caída en función del tiempo, expresada normalmente en mm/h. Asimismo, es posible relacionar dicha intensidad con la frecuencia con que ocurre y con la duración del evento, a través de técnicas estadísticas. De esta forma se obtienen las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF), las que están construidas en base a intensidades máximas (PHI-UNESCO_DT29, 2013), (Gómez & Aristizabal, 2002).

Las curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración son propias para cada sitio en especial, aunque en la actualidad existen plataformas informática basadas en un SIG que permiten a los usuarios, entre otras cosas, obtener las curvas IFD en cualquier punto de una zona geográfica determinada, ver PHI-UNESCO_DT29 (2013), además se sugiere a los lectores interesados visitar la página web del Centro de estudios de diseño hidrometeorológico del Servicio meteorológico nacional NOAA de los Estados Unidos donde presentan el Servidor de datos de frecuencia de precipitaciones, ver NOAA (2017).

Básicamente se pueden tener dos variantes para la elaboración de las curvas IFD, estas dependen del tipo de información de lluvia que se tenga, la que está íntimamente relacionada con el equipo de medición.

Variante 1: Se tiene una red pluviográfica o de pluviómetros automáticos en los que se puede obtener el comportamiento temporal de los aguaceros y por tanto la variación de las intensidades.

En este caso se debe efectuar un análisis estadístico de los registros históricos de las tormentas (Gómez & Aristizabal, 2002). Una metodología para la elaboración de las curvas IFD bajo estas premisas se puede encontrar en González, Jorge, Martínez & Marrero (2003).

Variante 2: En este caso se cuenta solo con la información de pluviómetros, los que registran las láminas diarias (mm) de lluvia caída a partir de las cuales se obtienen las láminas máximas diarias (en 24 horas) mensuales y anuales.

Para que las curvas IFD sean lo más exactas y precisas posible es preferible la primera de las variantes porque se trabaja directamente con todos los aguaceros caídos en la zona, sin embargo la realidad de muchas zonas es que la información pluviográfica es muy escasa y muchas veces inexistente, por tal motivo es muy frecuente el empleo de un método que se basa en los datos de lluvia máxima diaria (en 24 horas) mensuales. Las curvas IFD obtenidas por este método son conocidas como sintéticas o aproximadas y de no existir más ninguna información pueden emplearse, siempre teniéndose en cuenta que pueden existir diferencias con los valores reales (Diez, 2014).

En este trabajo se elaboran las curvas IFD de una estación climatológica de la que se tienen los datos de lluvia diarios, por tal motivo se emplea la segunda variante. Una explicación del método usado se realiza a continuación

2.1.4.1. Obtención de Curvas IDF partiendo de datos de lluvia máxima mensual

La obtención de las curvas IDF considera los 3 pasos siguientes:

1. El primer paso es definir el uso de una función de distribución de probabilidad (PDF) o una función de distribución acumulada (FDA) para cada grupo formado por los valores de intensidad máxima de precipitación para una duración específica (PHI-UNESCO_DT29, 2013).
2. En el segundo paso, se calculan las intensidades de lluvia para cada una de las duraciones y un conjunto de períodos de retorno seleccionados (por ejemplo, 5, 10, 20, 50, 100 años, etc.). Esto se realiza mediante el uso de las funciones de distribución de probabilidad derivados en el primer paso (PHI-UNESCO_DT29, 2013).
3. En el tercer paso se construyen las gráficas para las curvas IDF para lo que existen distintos modelos matemáticos que relacionan la intensidad con la duración y frecuencia o periodo de retorno. Luego, será posible obtener los valores de intensidad para cada duración y periodo de retorno deseado, graficando una curva para cada periodo de retorno (PHI-UNESCO_DT29, 2013).

Cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas representan la intensidad media en intervalos de diferente

duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico periodo de retorno (PHI-UNESCO_DT29, 2013).

A continuación se explica con más detalle el proceso:

Cuando se tiene una serie de años con información pluviométrica diaria se pueden extraer los valores de lluvia máxima en cada mes y posteriormente seleccionar en el año cuál es el valor mensual mayor, creándose así una serie anual de valores máximos de lluvia. Esta serie (muestra) debe ser lo suficientemente larga para ser lo más representativa posible de la población a la que pertenece, se recomienda que sea mayor a 20 años.

Una vez que se tiene la serie de trabajo, se debe comprobar su homogeneidad, para posteriormente ajustarla a una función de distribución de frecuencias de valores máximos, en este caso se emplea Gumbell como se explicó en la sección 2.1.2. Se debe aplicar alguna prueba de bondad de ajuste para garantizar la calidad de la función seleccionada. Con las variables probabilísticas de la serie ajustada y su combinación con el concepto de período de retorno se podrán obtener los valores de Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias o períodos de retorno y para una duración del evento de 24 horas.

Seguidamente se aplican los coeficientes que se muestran en las tablas 2.1 y 2.2 para obtener las Precipitaciones Máximas Probables para distintas frecuencias y tiempos de aguaceros diferentes a 24 horas, ver Campos (1998).

Tabla 2.1: Coeficientes aplicados a las lluvias máximas probables de duración 24 hr para obtener sus homólogas correspondientes a tiempos de aguaceros en horas.

Duraciones de los aguaceros o tormentas (hr)									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Coeficientes aplicados a las lluvias máximas probables de duración 24 hr para obtener sus homólogas correspondientes a tiempos de aguaceros en días.									
0.3	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.8	0.91	1

Fuente: (Campos, 1998)

Tabla 2.2: Coeficientes aplicados a las lluvias máximas probables de duración 24 hr para obtener sus homólogas correspondientes a tiempos de aguaceros en días.

Duraciones de los aguaceros o tormentas (días)					
2	3	4	5	6	7
Coeficientes aplicados a las lluvias máximas probables de duración 24 hr para obtener sus homólogas correspondientes a tiempos de aguaceros en días.					
1.32	1.63	1.85	2.05	2.22	2.38

Fuente: (Campos, 1998)

Estos últimos valores se dividen por la duración del aguacero y se obtienen las intensidades. En este punto ya se pueden graficar los resultados, obteniéndose las llamadas curvas IFD de la estación. En el capítulo 3 se aplicará esta metodología y se obtendrán dichas curvas para la estación climática de la ciudad de Chone.

Como es práctica común se suele encontrar las ecuaciones de mejor ajuste para cada curva IFD siguiendo modelos preestablecidos en la literatura como los que se muestran en la tabla 2.3 donde:

$T(\text{años})$ Es el período de retorno o frecuencia de ocurrencia

$t(\text{min})$ Tiempo de duración de la tormenta

$I(\text{mm/min})$ Intensidad de la lluvia

Tabla 2.3: Ecuaciones empíricas para ajustar las curvas de Intensidad–frecuencia-duración (IFD).

Autor (es) y año	Ecuaciones	Datos
Sherman (1931) citado por PHI-UNESCO_DT7 (2013)	$I = \frac{k \cdot T^m}{(t + b)^n}$	k, b, m, n son parámetros
Bernard (1932) citado por (Pereyra, Pérez & Gómez, 2004)	$I = \frac{k \cdot T^m}{t^n}$	k, m, n son parámetros
Wenzel (1982) citado por (Chow, Maidment & Mays, 1994)	$I = \frac{c}{(t^e + f)}$	c, e, f son parámetros
Chen (1983) citada por PHI-UNESCO_DT7 (2013)	$I = \frac{a}{(b + t)^n}$	a, b, n son parámetros
Chow et al (1994) modificando la expresión de Wenzel	$I = \frac{c \cdot T^m}{t + f}$	c, m, f son parámetros
Chow et al (1994) modificando la expresión de Wenzel	$I = \frac{c \cdot T^m}{(t^e + f)}$	c, m, f son parámetros
Aparicio (1997)	$I = \frac{k \cdot T^m}{(t + c)^n}$	k, c, m, n son parámetros
Koutsoyiannis et al (1998) citado por PHI-UNESCO_DT7 (2013)	$I = k \left\{ \frac{m - \left[\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right]}{(t + b)^n} \right\}$	k, b, m, n son parámetros

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

El último modelo fue ajustado para Atenas, Grecia y supone que la intensidad sigue una distribución doble exponencial o Gumbel.

2.1.5. Obtención hietogramas de aguaceros sintéticos a partir de las curvas IFD.

Si se desea realizar una modelación matemática de todo el proceso de lluvia escurrimiento para un sistema de drenaje pluvial de una ciudad, no basta con tener las curvas IFD de la zona de estudio, se necesita un registro detallado desde el punto de vista temporal de las láminas de lluvia precipitadas en aguaceros de una cierta intensidad media y un período de recurrencia, a lo que se le llama hietograma.

Los hietogramas de los aguaceros pueden ser generados con la información gráfica de los pluviógrafos o digital de los pluviómetros automatizados, sin embargo en las zonas donde no se cuenta con estos dispositivos se pueden generar hietogramas llamados sintéticos partiendo de las curvas IFD.

Para este último objetivo (Chow et al., 1994) presenta dos métodos, 1- Método del bloque alterno y 2- Método de la intensidad instantánea. Las características de estos métodos pueden ser consultadas en la referencia anterior. A continuación se brinda una explicación básica del método de bloque alterno que será el empleado en esta investigación.

2.1.5.1. Método del bloque alterno

Este método describe una forma simple de confeccionar un hietograma partiendo de las curvas IFD. Primeramente se define una duración t_d del aguacero (por ejemplo 1 hora) y los intervalos de tiempo Δt en los cuales interesa crear el hietograma (por ejemplo 5 min) de forma tal que $t_d = n \cdot \Delta t$. Posteriormente se decide le período de retorno para el cual se desea elaborar el hietograma, se entra en la curva IFD con cada uno de los valores de tiempo $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$, pudiéndose obtener las intensidades correspondientes, valores estos que una vez multiplicados por sus intervalos de tiempo vienen a ser la lámina de lluvia caída de forma acumulada. Por lo tanto si a estos últimos valores se le haya sus diferencias entre valores sucesivos se puede obtener la precipitación por cada unidad de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal, de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración y los bloques hacia la derecha e izquierda del central decrecen (Chow et al., 1994).

2.2. El modelo conceptual de SWMM versión 5.0.

SWMM representa el comportamiento de un sistema de drenaje mediante una serie de flujos de agua y materia entre los principales módulos que componen un análisis medioambiental. Estos módulos y sus correspondientes objetos de SWMM son los siguientes:

- El Módulo Atmosférico, desde la cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto Pluviométrico (**Rain Gage**) para representar las entradas de lluvia en el sistema.
- El Módulo de Superficie del Suelo, que se representa a través de uno o más objetos cuenca (**Subcatchment**). Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve; y generan flujos de salida en forma de infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.
- El Módulo de aguas subterráneas recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte. Este módulo se modela utilizando los objetos **Aquifers** (Acuíferos).

En un determinado modelo de SWMM no es necesario que aparezcan todos los Módulos descritos anteriormente. Por ejemplo, un modelo puede tener tan solo el Módulo de Transporte, utilizando como entradas unos hidrogramas previamente definidos (GMMF, 2005).

2.2.1. Componentes físicos (Visual Objects)

La siguiente figura muestra los componentes físicos que pueden presentarse en un sistema de drenaje de aguas pluviales. Estos componentes u objetos pueden representarse dentro del mapa SWMM. Los siguientes apartados describen cada uno de estos objetos.

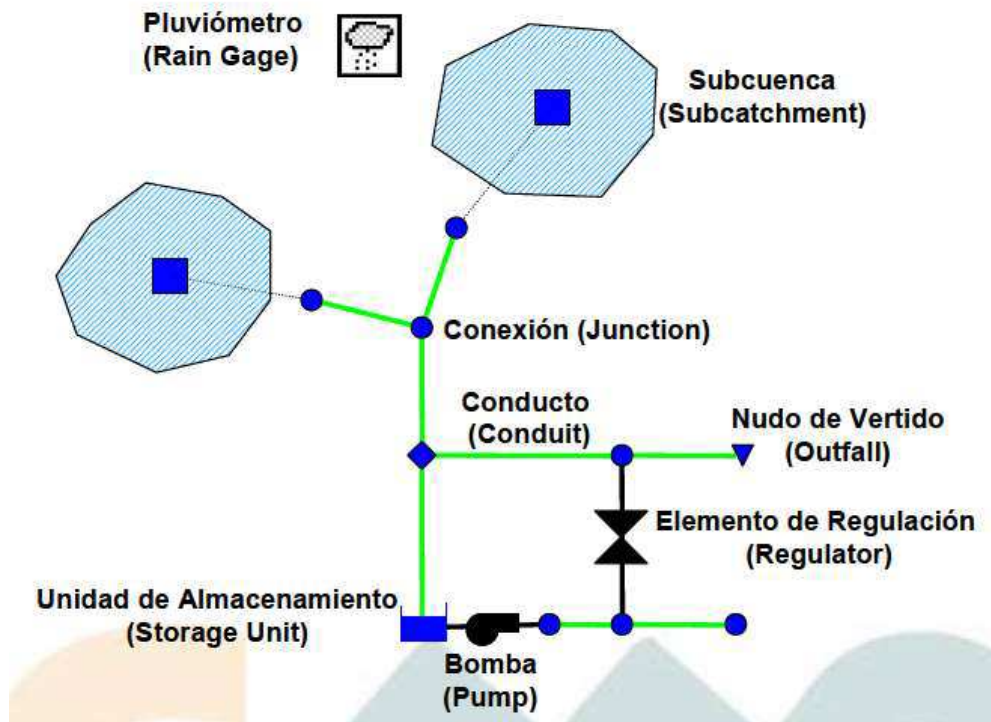


Figura 2.1. Ejemplo de los componentes Físicos empleados en el modelo de un sistema de drenaje.

Fuente: (GMMF, 2005)

2.2.2. Cuencas (Subcatchments).

Las cuencas son unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia un punto de descarga. El usuario del programa es el encargado de dividir el área de estudio en el número adecuado de cuencas pueden e identificar el punto de salida (outlet) de cada una de ellas. Los puntos de salida (outlet) de cada una de las cuencas pueden ser bien nudos de sistema de drenaje o bien otras cuencas.

Las cuencas pueden dividirse en subáreas permeables y subáreas impermeables. La escorrentía superficial puede infiltrarse en la parte superior del terreno de las subáreas permeables, pero no a través de las subáreas impermeables. Las áreas impermeables pueden dividirse a su vez en dos subáreas: una que contiene el almacenamiento en depresión y otra que no lo contempla. El flujo de escorrentía desde un subárea de la cuenca puede fluir hacia otra subárea o por el contrario dos subáreas pueden drenar directamente hacia la salida de la cuenca.

La infiltración de lluvia de las zonas permeables de una determinada cuenca sobre la parte superior del suelo no saturado puede describirse utilizando tres modelos diferentes:

- El modelo de infiltración de Horton.
- El modelo de infiltración de Green-Ampt.
- El modelo de infiltración basado en el número de curva del SCS.

Para modelar la acumulación, redistribución y deshielo de las precipitaciones que caen en forma de nieve en una cuenca, es necesario crear un objeto de Modelación de Nieve (Snow Pack object). Para modelar el flujo de aguas subterráneas entre un acuífero situado por debajo de la cuenca y un nudo del sistema de drenaje, es necesario establecer los parámetros de Aguas Subterráneas (Groundwater parameters) de la cuenca. La acumulación y el arrastre de contaminantes desde las cuencas pueden asociarse con los Usos del Suelo (Land Uses) asignados a la cuenca.

El resto de los parámetros principales de entrada de una cuenca son:

- El pluviómetro asignado.
- El nudo o la cuenca donde descarga la cuenca representada.
- Los usos de suelo asignados.
- Las áreas y superficies tributarias.
- El porcentaje de impermeabilidad.
- La pendiente de la cuenca.
- La anchura característica del flujo en superficie.
- Valor del coeficiente de Manning n para el flujo superficial tanto para áreas permeables como para áreas impermeables.
- El almacenamiento en depresión tanto para áreas permeables como áreas impermeables.
- El porcentaje de suelo impermeable carente de almacenamiento en depresión.

2.2.3. Nudos de conexión.

Las conexiones son nudos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. Físicamente pueden representar la confluencia de canales superficiales naturales, pozos de registro (manholes) del sistema de drenaje, o elementos de conexión de tuberías. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones. El exceso

de agua en un nudo se traduce en un flujo parcialmente presurizado mientras las conducciones conectadas se encuentran en carga. Este exceso de agua puede perderse completamente del sistema o por el contrario estancarse en la parte superior para posteriormente volver a entrar de nuevo en la conexión.

Los parámetros principales de entrada de una conexión son:

- Cota de fondo o fondo del pozo que puede encontrarse en la conexión.
- Profundidad del pozo.
- Área superficial del área estancada cuando se produce un fenómeno de inundación. Es un parámetro opcional de entrada.
- Datos de aportes externos de caudal. Es también otro parámetro opcional.

2.2.4. Nudos de vertido (Outfall Nodes)

Los Nudos de Vertido son nudos terminales del sistema de drenaje utilizados para definir las condiciones de contorno finales aguas abajo del sistema en el caso de utilizar el modelo de flujo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave). Para otros tipos de flujo, los nudos de vertido se comportan como conexiones. Una restricción del modelo es que solo es posible conectar una línea con un Nudo de Vertido.

Las condiciones de contornos en los Nudos de Vertido pueden describirse mediante una de las siguientes relaciones:

- El calado crítico o el calado uniforme en la conexión con el conducto.
- Un nivel fijo de agua.
- Una serie temporal que representa el nivel de agua en el punto de descarga a lo largo del tiempo.

Los parámetros de entrada principales de un Nudo de Vertido son:

- La cota de fondo.
- La descripción del tipo y estado de la condición de contorno.

La presencia de una válvula de compuerta (flat valve) para prevenir el flujo inverso desde el Nudo de Vertido.

2.2.5. Conductos

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal, las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa. Así mismo, el programa permite también definir áreas de sección transversal irregular permitiendo representar con ello cauces naturales.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por el conducto (Q), la sección del mismo (A), su radio hidráulico (R_h) y la pendiente (S), tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos. En unidades anglosajonas la ecuación de Manning se escribe:

$$Q = \frac{1.49}{n} A R_h^{2/3} \sqrt{S}$$

Así mismo, dicha ecuación en unidades del Sistema Internacional se expresa como:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \sqrt{S}$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning. Para el caso del Flujo Uniforme (Steady Flow) y para el caso del Análisis mediante la Onda Cinemática (Cinematic Wave), S se interpreta como la pendiente de la conducción. En el caso de emplear el Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave) se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la pérdida por unidad de longitud).

Los principales parámetros de entrada para las conducciones son:

- Nombres de los nudos de entrada y salida.
- Alturas del conducto respecto de la cota de fondo de los nudos inicial y final.
- Longitud del conducto.
- Coeficiente de Manning.
- Geometría de pérdidas tanto para la entrada como para la salida del conducto.
- Presencia de una válvula de compuerta para prevenir el flujo inverso.

2.2.6. Reguladores de caudal.

Los Reguladores de Caudal (Flow Regulators) son estructuras y dispositivos utilizados para controlar y derivar los caudales dentro del sistema de transporte. Físicamente se emplean para:

- Control de emisiones desde las unidades de almacenamiento.
- Prevención de fenómenos de entrada en carga inaceptables de conductos.
- Derivación de caudales para su tratamiento en los sistemas de intercepción.

Los elementos reguladores de caudal que puede modelar SWMM son los siguientes:

- Orificios (Orifices).
- Vertederos (Weirs)
- Descargas (Outlets).

Las descargas (outlets) son dispositivos de control del caudal que se emplean de forma habitual para controlar los caudales de descarga de las unidades de almacenamiento. Se emplean para modelar sistemas con relaciones especiales entre la altura y el caudal de descarga que no pueden ser caracterizadas mediante bombas, orificios y vertederos. Las descargas se representan internamente en SWMM mediante una línea conectada entre dos nudos. Así mismo, cualquiera de las descargas puede disponer de una válvula de compuerta que impide el flujo en una de las direcciones.

Las descargas vinculadas a unidades de almacenamiento están presentes en cualquiera de los tres modelos hidráulicos definidos en el programa. En el caso de que los orificios no estén vinculados a unidades de almacenamiento, tan solo puede utilizarse con el modelo hidráulico de la Onda Dinámica (Dynamic Wave).

El flujo a través de la descarga se especifica mediante una tabla definida por el usuario que recoge el flujo de caudal en función de la altura de diferencias en la misma.

Los principales parámetros de una descarga son:

- Nombre de los nudos de entrada y salida de la descarga.
- Altura sobre la cota de fondo del nudo de entrada.

- Función o tabla que establece la relación entre la altura y el caudal descargado por el vertedero.

2.2.7. Ventana principal de SWMM

La interfaz gráfica de SWMM 5.0 está constituida por los siguientes elementos: un menú principal (Main Menu), diferentes barras de herramientas (Toolbars), una barra de estado (Status Bar), un panel de navegación (Browser Panel), una ventana del mapa del área de estudio (Study Area Map), y ventanas de edición de propiedades (Property Editor). La siguiente figura 2.5 muestra una vista de la pantalla principal de trabajo de EPA SWMM 5.0, en donde se destacan los elementos antes mencionados (Concha, 2007).

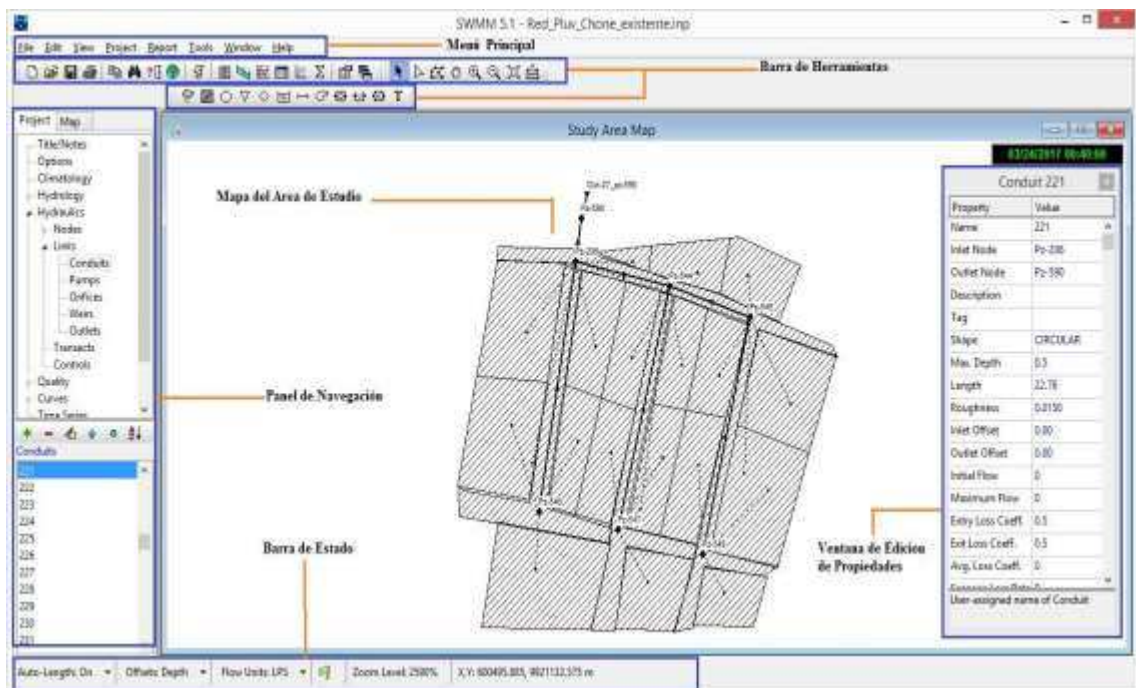


Figura 2.2. Ventana principal de SWMM 5.1.

Fuente: Elaboración propia.

Lo que más llama la atención de este programa para modelar es su interfaz gráfica, que permite al usuario crear una representación esquemática del sistema de drenaje usando los objetos visuales. También permite la edición de las propiedades de dichos objetos usando nuevas ventanas. En fin, la nueva interfaz gráfica de EPA SWMM 5.1 tiene muchas de las funciones que posee cualquier software que trabaja bajo ambiente Windows, pero además tiene algunas características especiales que son necesarias reconocer para un correcto trabajo con ella.

- **Menú Principal**

El menú principal contiene una serie de opciones para controlar el programa. Dentro de estas opciones destacan View, Project, Tools y Report. En la primera se encuentran comandos para el manejo de fondos (Backdrops) tipo mapas, dibujos de CAD o imágenes de SIG, que pueden ser colocados detrás de los objetos visuales de SWMM 5.1 con el objetivo de referenciar visualmente los objetos a la imagen. En la opción Project se encuentran los comandos relacionados con el proyecto que se está analizando, tales como Details el cual muestra una lista de todos los datos que el código de cálculo de SWMM 5.0 utiliza, o Calibration Data que registra archivos conteniendo datos medidos de algún parámetro para usar en un proceso de calibración. La opción Tools contiene comandos usados para ajustar preferencias generales de SWMM 5.0, tales como número de decimales mostrados en pantalla, entre otros. Uno de estos comandos es Configure Tools el que permite al usuario agregar o modificar complementos (add-in tools) que pueden trabajar con SWMM 5.0. Finalmente, la opción Report del menú principal presenta una serie de posibilidades para representar los resultados de las simulaciones: Graph, muestra los resultados en forma de gráficos; Table, muestra los resultados en tablas; y Status, muestra un informe del estado de la más reciente simulación realizada (Concha, 2007).

- **Barra de Herramientas (Toolbars).**

Contiene un conjunto de diferentes botones de acceso rápido para ser usados en operaciones de creación de un proyecto SWMM 5.0. Estos botones pueden ser agrupados en tres categorías de barras de herramientas: estándar (Standar Toolbar), de mapa (Map Toolbar), y de objetos (Object Toolbar). Entre estas tres categorías de barras de herramientas destaca aquella de objetos (Object Toolbar) pues en ella aparecen los botones con los cuales se construye el esquema de la red de drenaje que se ha de representar en SWMM 5.0 (Concha, 2007).

- **Barra de estado (Status bar),**

Indica algunas propiedades del programa tales como el tipo de unidades de medición que se está utilizando, el nivel actual de zoom sobre el mapa, y la situación del último intento de simulación efectuado: simulación realizada, simulación no disponible, o simulación invalidada. (Concha, 2007)

- **Mapa del área de estudio**

Es la mayor ventana dentro de la interfaz gráfica. En esta ventana es donde se construye el esquema del sistema de drenaje que va a ser estudiado y donde se puede colocar una imagen de fondo (Backdrop) a modo de referencia (Concha, 2007).

- **Panel de navegación**

Se ubica al costado izquierdo dentro de la pantalla principal, contiene dos fichas que pueden ser activadas por separado. Una de ella es la ficha Data, bajo la cual se despliegan las diversas categorías de objetos disponibles en un proyecto de SWMM 5.1, y los nombres de los objetos individuales pertenecientes a la categoría actualmente seleccionada. Bajo la otra ficha, llamada Map, se encuentran propiedades que pueden ser activadas en el mapa del área de estudio cuando se ha realizado una simulación. Estas propiedades permiten destacar variables de algunos objetos en periodos de tiempo elegidos por el usuario (Concha, 2007).

- **Ventanas de edición de propiedades**

Se activan cuando el usuario desea ingresar o editar algunos valores de los parámetros que posee cada objeto. El contenido de cada ventana de edición depende del tipo de objeto que se desee editar (Concha, 2007).

2.3. Método de cálculo de SWMM

SWMM 5.1 es un programa hidrológico- hidráulico cuyas rutinas de cálculo se desarrollan sobre los principios de Conservación de la Masa y Conservación de la Cantidad de Movimiento para calcular caudales, niveles, velocidades, concentraciones, y otras variables de interés, sobre intervalos de tiempo discretos. Procesos tales como la escorrentía superficial, infiltración, propagación del flujo en la red, y el transporte de contaminantes, son simulados usando estos principios (Rodríguez, 2013).

2.3.1. Modelo hidrológico de SWMM. Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial.

La escorrentía superficial que se produce en cada Subcatchment es calculada por SWMM 5.0 asumiendo que cada subcuenca se comporta como un depósito no lineal. El modelo

de depósito no lineal es un modelo “agregado” que aplica la ecuación de Conservación de la Masa y una ecuación tipo Onda Cinemática para calcular el caudal de escorrentía superficial a la salida de cada subcuenca. En este modelo de depósito se requieren diferentes datos dentro de los que destacan: el área en planta de la subcuenca, su ancho característico y la rugosidad superficial.

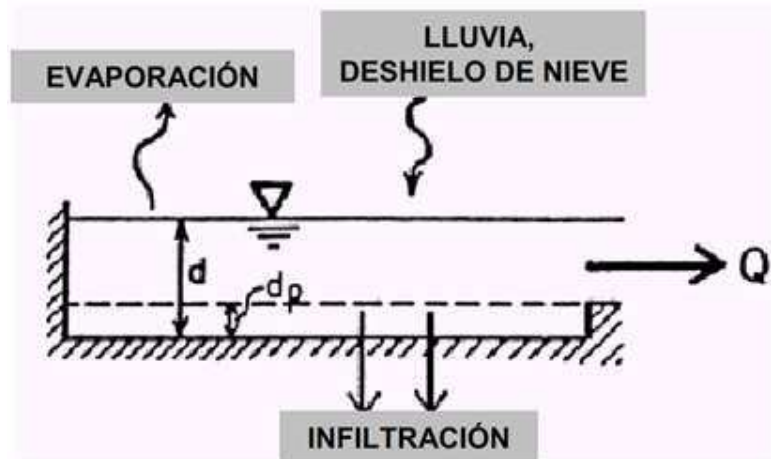


Figura 2.3. Esquema conceptual del fenómeno de escorrentía en SWMM 5.1

Fuente: (Granda, 2013)

2.3.1.1. Cálculo de la infiltración, (método del Número de la Curva o CN del NRCS).

La infiltración que se produce en cada subcuenca puede ser calculada usando uno de los tres métodos con que cuenta SWMM 5.0: 1- Método de Horton, 2- Método de Green-Ampt, y 3- Método del Número de Curva del NRCS (Rodríguez, 2013).

En esta investigación se emplea el Método del Número de Curva o CN del NRCS, por lo cual se asume que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una tabla de Números de Curva tabulados. Los parámetros de entrada para este método son el número de la curva, y el tiempo (en días) que tarda el suelo en secarse completamente partiendo de su estado de total saturación.

Los lectores interesados en el método del Número de la Curva pueden consultar USDA (1986), este es un método que está ampliamente difundido en gran parte de la literatura técnica especializada en temas de hidrología, por lo tanto no será difícil de encontrar para los lectores interesados.

En el anexo A4 se muestra la tabla A4.1 a partir de la cual se pueden seleccionar los valores de CN para cada subcuenca o área de drenaje de zonas urbanas.

2.3.2. Modelos hidráulicos de transporte

EPA SWMM 5.0 permite elegir entre tres diferentes metodologías de cálculo del flujo en la red de drenaje. La primera, denominada Steady Flow Routing, consiste en asumir que en cada intervalo de tiempo de cálculo las condiciones del flujo no cambian; es decir, se tiene flujo permanente. La segunda metodología es denominada Kinematic Wave (onda cinemática), y en esta se considera la variabilidad temporal del flujo. Este método resuelve la ecuación de Conservación de la Masa y una aproximación de la ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento. El tercero de estos métodos consiste en la resolución de las ecuaciones completas de Saint Venant (Conservación de la Masa y Cantidad de Movimiento), denominado como método de la Onda Dinámica (Dynamic Wave). Este método es el físicamente más correcto, aunque demanda un mayor tiempo de proceso computacional (Rodríguez, 2013).

2.3.2.1. Modelo de Flujo Uniforme (Steady State Routing)

El modelo de flujo uniforme representa la forma más simple de representar el comportamiento del agua en el interior de los conductos. Para ello se asume que en cada uno de los incrementos de tiempo de cálculo considerados el flujo es uniforme. De esta forma el modelo simplemente traslada los hidrogramas de entrada en el nudo aguas arriba del conducto hacia el nudo final del mismo, con un cierto retardo y cambio en el aspecto del mismo. Para relacionar el caudal con el área y el nivel del agua en el conducto se emplea la ecuación de Manning (GMMF, 2005).

Este tipo de modelo hidráulico no puede tener en cuenta el almacenamiento de agua que se produce en los conductos, los fenómenos de resalto hidráulico, las pérdidas a la entrada y salida de los pozos de registro, el flujo inverso o los fenómenos de flujo presurizado. Solo puede utilizarse en sistemas ramificados, donde cada uno de los nudos tiene únicamente una línea hacia la que vierte sus aguas (a menos que el nudo sea un divisor en cuyo caso requiere de dos tuberías de salida). Este modelo de análisis es insensible al incremento de tiempo seleccionado y únicamente es apropiado para realizar análisis preliminares utilizando simulaciones continuas de escalas de tiempo grandes (GMMF, 2005).

2.3.2.2. Modelo de la Onda Cinemática (Kinematic Wave)

Este modelo hidráulico de transporte resuelve la ecuación de continuidad junto con una forma simplificada de la ecuación de cantidad de movimiento en cada una de las conducciones. Esta última requiere que la pendiente de la superficie libre del agua sea igual a la pendiente de fondo del conducto (GMMF, 2005).

El modelo de la onda cinemática permite que tanto el caudal como el área varíen tanto espacial como temporalmente en el interior del conducto. Esto origina una cierta atenuación y retraso en los hidrogramas de salida respecto de los caudales de entrada en los conductos. No obstante, este modelo de transporte no puede considerar efectos como el resalto hidráulico, las pérdidas en las entradas o salidas de los pozos de registro, el flujo inverso o el flujo presurizado, así como su aplicación está restringida únicamente a redes ramificadas (GMMF, 2005).

El modelo aplica dos tipos de simplificaciones: geométrica y de procesos. La primera consiste en aproximar la complejidad geométrica del flujo de agua superficial sobre una cuenca por medio de una cascada de segmentos simples, tales como planos de escurrimiento (flujo superficial) y segmentos de canal (flujo en canal), que en conjunto describen las características del drenaje. La segunda, consiste en despreciar los términos de inercia y de presión (Amancio, 2007).

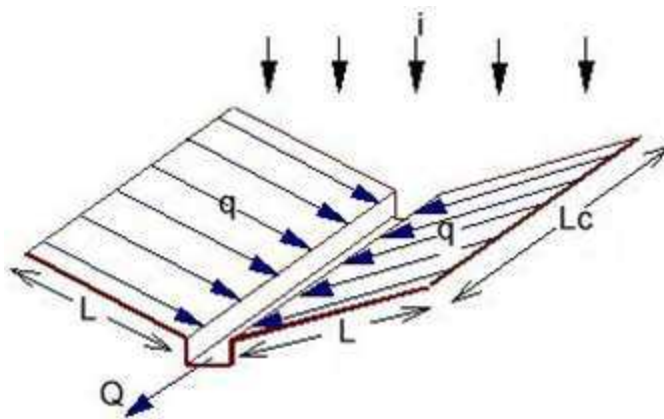


Figura 2.4. Esquema de una cuenca simple.

Fuente: (Amancio, 2007)

I: intensidad de lluvia en exceso.

L: longitud del flujo sobre el plano.

Lc: longitud del canal receptor.

q: caudal lateral específico (para un ancho unitario del plano).

Q: caudal a la salida de la cuenca.

2.3.3.3. Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave)

El modelo de transporte de la Onda Dinámica (Dynamic Wave Routing) resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nudos (GMMF, 2005).

Con este tipo de modelo de transporte es posible representar el flujo presurizado cuando una conducción cerrada se encuentra completamente llena, de forma que el caudal que circula por la misma puede exceder del valor de caudal a tubería completamente llena obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad (nivel o tirante) del agua en los nudos excede el valor máximo disponible en los mismos. Este exceso de caudal bien puede perderse o bien puede generar un estancamiento en la parte superior del nudo y volver a entrar al sistema de saneamiento posteriormente (GMMF, 2005).

El modelo de transporte de la Onda Dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, el flujo inverso y el flujo presurizado (GMMF, 2005).

La ecuación dinámica de Saint Venant se puede escribir como: (Herrero, s.f)

$$S = -\frac{\partial}{\partial x} \left(z + y + \frac{v^2}{2g} \right) - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.13)$$

Siendo:

S: la pendiente motriz,

x: la abscisa en la dirección del movimiento,

z: la cota del fondo,

y : el tirante,

v : la velocidad,

g : la aceleración de la gravedad,

t : el tiempo.

La ecuación de continuidad escrita por unidad de ancho sería: (Herrero, s.f)

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2.14)$$

En donde “ q ” representa el caudal específico o caudal por unidad de ancho.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal (Q) que circula por el encauzamiento, la sección del mismo (A), el radio hidráulico (R_h) y la pendiente (S). La ecuación en unidades del Sistema Internacional se expresa como:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (2.15)$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

En el caso del modelo de la onda dinámica la pendiente S se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo, pendiente motriz o pérdida de energía por unidad de longitud (Herrero, s.f).

Como se ha comentado, el transporte de agua a través de los conductos y cauces representados en SWMM está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio, y que son las ecuaciones de Saint Venant. En este caso se ha decidido resolver las ecuaciones con el modelo hidráulico de transporte de la onda dinámica (Herrero, s.f).

En la tabla A5.1 del anexo A5 se muestran las ecuaciones de momentum de la conservación de la masa que se utiliza en SWMM.

CAPÍTULO 3

MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO- HIDRÁULICO DE LA RED DE ALCANTARILLADO PLUVIAL ACTUAL DE LA CIUDAD DE CHONE.

CAPÍTULO 3. MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO DE LA RED DE ALCANTARILLADO PLUVIAL ACTUAL DE LA CIUDAD DE CHONE.

3.1. Caso de estudio. Descripción y características generales.

Dentro de la división geográfica-política de la provincia de Manabí, la ciudad de Chone resulta ser la cabecera cantonal del Cantón Chone, localizándose la ciudad en las coordenadas geográficas UTM N 9'923.000 Y E 601.000, al occidente de la República del Ecuador y hacia el norte de la capital provincial, Portoviejo.

La ciudad de Chone se ubica aguas abajo de la confluencia de los Ríos Garrapata, Grande y Mosquito, lo que da origen a que en temporada de invierno por la intensidad de las precipitaciones, la morfología de la zona y de la red hidrográfica, incrementado todo esto con el alarmante proceso de deforestación que se tiene en las cabeceras de las cuencas vertientes de los Ríos antes mencionados, establecen un alto grado de riesgo de la ciudad ante el embate de las inundaciones (ACOLIT Cía. Ltda., 2008).

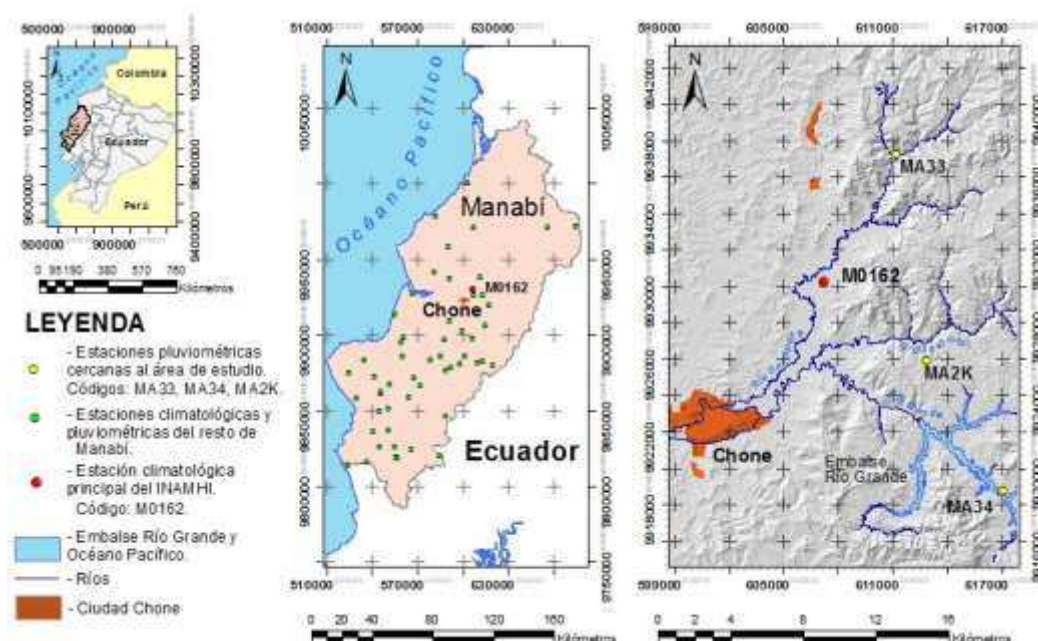


Figura 3.1. Ubicación de la ciudad de Chone (área de estudio). Estación climatológica principal del INAMHI, código M0162.

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

Los aportes que en temporada invernal llevan los ríos a los que se hizo referencia anteriormente, considerando que las cuencas de aportación de los mismos son vecinas e influenciadas por el mismo tipo de precipitación, lo que da origen a que los caudales puntas de los hidrogramas de avenidas de cada uno de los ríos antes mencionados coincidan justo antes de su cruce por la ciudad, a más de que estos ríos fluyen sobre una llanura aluvial formando una serie de meandros con sus bordes superiores más elevados que los terrenos adyacentes y con pendientes que disminuyen progresivamente hacia aguas abajo, vaya disminuyendo su capacidad de transporte, produciendo los desbordamientos hacia las llanuras, inundando zonas pobladas y extensas áreas agrícolas.

Chone se ubica dentro de una zona con condiciones climáticas extremas, especialmente en la temporada invernal, llegando a tener en ocasiones precipitaciones que superan los 3500 mm cuando se presenta la corriente de “El Niño”, y menores a los 500 mm cuando se presentan características de años secos, conocido también como fenómeno de “La Niña”, teniéndose temperaturas medias en la zona de 25°C. Como consecuencia de esto la ciudad se ha visto afectada por innumerables inundaciones durante, prácticamente, toda su historia (ACOLIT Cía. Ltda., 2008).

Como se ha venido mencionando, la ciudadanía chonense se ha visto afectada por inundaciones considerables con reiterada frecuencia, dichas inundaciones limitan o condicionan el desarrollo y las actividades dentro de la ciudad.

De acuerdo con los datos históricos, la ciudad de Chone ha soportado más de 200 inundaciones en un período de 35 años, hasta 1998. En términos generales, las inundaciones que soporta la ciudad son de recurrencia anual, aún en períodos invernales de baja intensidad, todo lo cual ha traído como consecuencia la afectación directa a las actividades humanas que se desarrollan en la zona de influencia, dando origen a la reducción de la tasa de crecimiento demográfico de la ciudad, intensificación del trabajo informal e incremento de la desocupación.

La ciudad de Chone está emplazada cerca de la confluencia de los tres principales tributarios del Río Chone: ríos Grande, Mosquito y Garrapata (figura 3.2). En esta zona, los ríos fluyen sobre una extensa llanura aluvial formando una serie de meandros con los bordes de los cauces más elevados que los terrenos adyacentes y con pendientes que disminuyen progresivamente aguas abajo. A esto se suma el promedio de precipitación

anual de 1.260 mm concentrada en unos pocos meses, provocando que la ciudad de Chone se encuentre expuesta a frecuentes desbordamientos de los ríos, llegando a registrarse cerca de 200 inundaciones en los últimos 35 años (Gil, Varela , & Mardones, Gestión integral del riego por inundaciones: Caso de estudio Ciudad de Chone., 2005).

3.2. Procesamiento de los datos de precipitaciones máximas para la ciudad de Chone.

3.2.1. Procesamiento inicial de datos, serie de trabajo.

En la figura 3.1 se muestra la red de estaciones meteorológicas con que cuenta Manabí, y que son administradas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI del Ecuador. Esta institución publica en su página web (de uso público) los llamados Anuarios meteorológicos en los que aparece información de cada una de las estaciones desde el año 1990 hasta el 2012.

Después de analizar los datos de los registros del INAMHI se pudo concluir que la mayoría de los equipos cercanos al área de estudio presentaban una gran cantidad de años con déficit de datos, este es el caso de las estaciones MA33, MA2K y MA34, ver figura 3.1. Afortunadamente la estación climática M0126 cuenta con registros pluviométricos que acopian más de 20 años de mediciones y con estos datos se comenzó el trabajo.

En la tabla 3.1 se colocan los valores de lluvia del día que más llovió en cada uno de los meses desde el año 1990 hasta el 2012. Los valores subrayados no existían en los registros y fueron rellenados para lo cual se aplicó un promedio entre sus similares de todos los años con datos. En la última columna aparece la serie de trabajo que está conformada por los valores más grandes de cada año.

Tabla 3.1: Serie de valores de lluvia máxima mensual de la estación climatológica M0126, período 1990- 2012, 23 años.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Serie
1990	<u>46.4</u>	<u>71.3</u>	<u>62.1</u>	<u>45.0</u>	<u>23.6</u>	<u>12.0</u>	25.0	0.0	0.5	1.9	1.0	18.0	71.3
1991	27.1	73.6	40.1	22.1	4.4	5.8	0.4	3.3	0.3	0.3	11.1	12.9	73.6
1992	26.3	39.8	45.5	80.4	43.5	5.1	9.1	0.7	0.9	1.2	0.2	14.9	80.4
1993	27.4	80.6	131.7	50.3	5.4	46.3	3.8	1.2	0.9	9.4	<u>13.0</u>	9.1	131.7
1994	28.1	113.8	49.1	66.3	59.3	8.2	0.3	0.6	0.2	8.6	3.6	47.6	113.8
1995	36.8	132.5	27.2	16.7	18.5	8.5	5.8	4.3	0.7	1.5	0.9	15.9	132.5

1996	45.9	34.8	52.8	51.1	2.2	0.7	1.1	0.8	0.4	0.8	0.3	2.4	52.8
1997	31.4	90.1	69.8	52.3	10.5	33.6	13.9	60.7	24.9	23.1	130.0	133.2	133.2
1998	70.7	143.9	101.4	66.9	80.0	74.0	56.0	7.3	13.9	0.4	5.5	0.6	143.9
1999	79.9	100.1	42.3	51.5	9.1	1.5	1.4	1.2	4.5	11.5	8.1	10.8	100.1
2000	18.1	53.8	58.0	36.6	45.9	5.9	0.8	0.3	1.7	0.9	0.3	8.4	58
2001	133.6	84.6	140.6	34.6	5.7	0.7	1.5	0.6	0.5	0.5	1.1	7.4	140.6
2002	54.9	48.7	70.8	73.9	18.9	13.5	2.7	4.7	3.5	15.9	3.3	37.3	73.9
2003	37.5	53.5	23.9	10.9	27.3	4.8	1.6	1.0	0.2	2.0	9.8	58.1	58.1
2004	32.0	91.8	99.4	7.6	14.2	9.5	0.8	0.5	3.9	5.7	0.4	30.0	99.4
2005	34.2	43.5	25.2	77.3	1.9	0.3	0.3	0.2	0.6	1.0	0.7	41.3	77.3
2006	100.5	47.0	112.3	6.6	13.7	9.4	0.6	9.1	17.8	0.8	40.5	2.1	112.3
2007	30.5	58.0	66.4	81.4	14.4	5.5	6.7	1.4	0.2	3.8	3.9	9.2	81.4
2008	44.2	55.4	32.7	33.5	9.2	2.5	18.6	5.1	2.7	4.7	<u>13.0</u>	<u>25.5</u>	55.4
2009	53.9	29.0	41.5	35.4	19.2	5.8	0.5	23.1	29.1	<u>4.9</u>	0.0	11.9	53.9
2010	27.6	52.0	56.8	<u>45.0</u>	58.4	2.5	9.5	2.2	1.0	0.5	2.5	51.9	58.4
2011	33.2	<u>71.3</u>	21.6	60.1	2.9	8.6	24.2	2.3	0.3	<u>4.9</u>	<u>13.0</u>	<u>26.2</u>	71.325
2012	<u>46.4</u>	<u>71.3</u>	56.3	20.2	54.9	10.6	1.8	1.9	0.2	0.9	7.3	<u>26.2</u>	71.325

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

3.2.2. Análisis de homogeneidad de la serie de trabajo.

En la figura 3.2 se nota que la gráfica de simple masa tiene un comportamiento uniforme por lo que en principio la serie es homogénea, ver epígrafe 2.1.3.1.

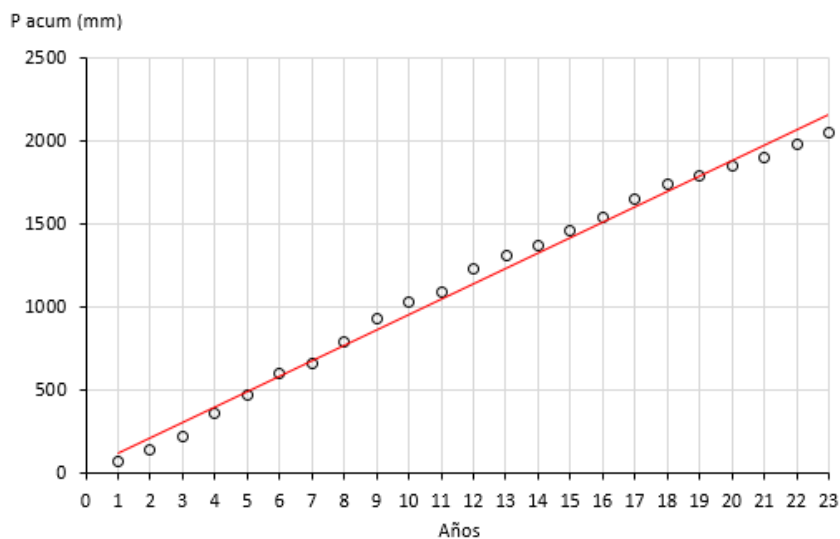


Figura 3.2. Curva de simple masa de la serie de trabajo.

Fuente: (Cabrera, et al., 2016).

Posteriormente se le aplica el Test de Student a la serie para cumplir con la fase confirmatoria y poder garantizar la homogeneidad.

Tabla 3.2: Tabla de aplicación del test de Student.

Nro	Años	Serie	Nombres	Subseries	Media	V
1	1990	71.3		71.3		
2	1991	73.6		73.6		
3	1992	80.4		80.4		
4	1993	131.7		131.7		
5	1994	113.8	Subserie A	113.8	99.21	1116.94
6	1995	132.5		132.5		
7	1996	52.8		52.8		
8	1997	133.2		133.2		
9	1998	143.9		143.9		
10	1999	100.1		100.1		
11	2000	58		58		
12	2001	140.6		140.6		
13	2002	73.9		73.9		
14	2003	58.1		58.1		
15	2004	99.4		99.4		
16	2005	77.3		77.3		
17	2006	112.3		112.3		
18	2007	81.4	Subserie B	81.4	79.446	683.44
19	2008	55.4		55.4		
20	2009	53.9		53.9		
21	2010	58.4		58.4		
21	2011	71.325		71.325		
23	2012	71.325		71.325		

Fuente: Elaboración propia

Considerando estos valores y teniendo en cuenta lo expresado en el anexo A1, se pueden obtener los siguientes valores de la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Resultados finales del test de Student.

V_p	T	γ	$T_{crítico}$
889.87	1.58	20	1.725

Fuente: Elaboración propia

Con lo que se puede concluir que acorde con este test también la serie es homogénea ya que $T \leq T_{crítico}$.

3.2.3. Comprobación del ajuste de la serie de trabajo a la función teórica de probabilidad Gumbel.

Para verificar si es correcto ajustar la serie de trabajo a la función Gumbel se emplea la prueba de bondad de Smirnov Kolmogorov, discutida en la sección 2.1.3.2.

Tabla 3.4: Tabla de cálculo de la prueba de Smirnov Kolmogorov.

Nro	Año	Serie original	Prob empírica	Serie ordenada	$F(x_T)$	$1 - F(x_T)$	$\Delta calc$
1	1990	71.3	0.042	143.9	0.9446	0.0554	0.014
2	1991	73.6	0.083	140.6	0.9367	0.0633	0.020

3	1992	80.4	0.125	133.2	0.9149	0.0851	0.040
4	1993	131.7	0.167	132.5	0.9125	0.0875	0.079
5	1994	113.8	0.208	131.7	0.9096	0.0904	0.118
6	1995	132.5	0.250	113.8	0.8193	0.1807	0.069
7	1996	52.8	0.292	112.3	0.8088	0.1912	0.100
8	1997	133.2	0.333	100.1	0.7030	0.2970	0.036
9	1998	143.9	0.375	99.4	0.6957	0.3043	0.071
10	1999	100.1	0.417	81.4	0.4644	0.5356	0.119
11	2000	58	0.458	80.4	0.4496	0.5504	0.092
12	2001	140.6	0.500	77.3	0.4027	0.5973	0.097
13	2002	73.9	0.542	73.9	0.3508	0.6492	0.108
14	2003	58.1	0.583	73.6	0.3462	0.6538	0.070
15	2004	99.4	0.625	71.325	0.3116	0.6884	0.063
16	2005	77.3	0.667	71.325	0.3116	0.6884	0.022
17	2006	112.3	0.708	71.325	0.3116	0.6884	0.020
18	2007	81.4	0.750	58.4	0.1359	0.8641	0.114
19	2008	55.4	0.792	58.1	0.1326	0.8674	0.076
20	2009	53.9	0.833	58	0.1314	0.8686	0.035
21	2010	58.4	0.875	55.4	0.1043	0.8957	0.021
21	2011	71.325	0.917	53.9	0.0901	0.9099	0.007
23	2012	71.325	0.958	52.8	0.0805	0.9195	0.039

Fuente: Elaboración propia

En la columna 4 de la tabla 3.4 se ubican los valores de probabilidad empírica siguiendo la expresión de Weibull, ver el anexo A2. En la columna 5 se ordena la serie de forma descendente. En la columna 6 se calcula la probabilidad $F(x_T)$ que responde a la ecuación 2.4 y en la séptima se transforma la probabilidad a sobrepaso. Restando ambas probabilidades se obtienen los valores de $\Delta calc$, el mayor de estos valores es 0.12.

De la tabla de Kolmogorov, anexo A2, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y grado de libertad $\gamma = 20$ se obtiene $\Delta_{K_Crítico} = 0.28$, luego la serie se ajusta a la función teórica de probabilidades Gumbell.

3.2.4. Obtención de las curvas de intensidad – frecuencia y duración IFD para la estación M0162 y de hietogramas de trabajo.

En esta sección se presentan los pasos más importantes para la creación de las curvas IFD para la estación M0162.

3.2.4.1. Cálculo de las Precipitaciones Máximas Probables para diferentes frecuencias y evento de 24 horas de duración.

La media y desviación estándar de la serie de trabajo son $\bar{x} = 88.90$ y $S = 30.844$, respectivamente; con estos valores y evaluando en las ecuaciones 2.5 y 2.6 se obtienen $\alpha = 24.049$ y $u = 75.018$. Con estos valores se elabora la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Tabla de cálculos para la obtención de las Precipitaciones Máximas Probables para distintas frecuencias y evento de 24 horas de duración.

Período de retorno	Variable reducida	Precipitación (mm)	Probabilidad de ocurrencia	Corrección intervalo
T (años)	y_T	x_T	$F(x_T)$	x_T
2	0.367	83.830	0.500	94.730
5	1.500	111.090	0.800	125.530
10	2.250	129.135	0.900	145.920
25	3.199	151.940	0.960	171.690
50	3.902	168.850	0.980	190.810
100	4.600	185.640	0.990	209.780
500	6.214	224.447	0.998	253.630

Fuente: Elaboración propia

En la primera columna se colocan los períodos de retorno más empleados en estudios hidrológicos máximos. En la segunda columna se evalúa la ecuación 2.11, mientras que en la columna 3 se aplica la expresión 2.12. En la columna 4 se calcula la probabilidad de ocurrencia de esta lluvia con esa recurrencia y para eso se aplica la expresión 2.10. Finalmente se realiza una corrección a los valores de x_T calculados para lo cual se multiplican estos valores por 1.13, ver HidrojING (2013).

Una vez obtenidos estos resultados se aplican los coeficientes de las tablas 2.1 y 2.2 a los valores de x_T obtenidos para 24 horas con el objetivo de obtener estas lluvias probables pero para duraciones diferentes a las 24 horas, ver tabla 3.6.

Tabla 3.6: Tabla de cálculos para la obtención de las Precipitaciones Máximas Probables para eventos lluviosos de distintas frecuencias y duraciones.

Duración de la lluvia			Coefic	Valores de Precipitación máxima probable P (mm) en función de T y de la duración de los aguaceros.						
(min)	(hr)	(días)		2	5	10	25	50	100	500
60	1	0.04	0.3	28.42	37.66	43.78	51.51	57.24	62.93	76.09
120	2	0.08	0.39	36.94	48.96	56.91	66.96	74.41	81.81	98.91
180	3	0.13	0.46	43.58	57.74	67.13	78.98	87.77	96.50	116.67
240	4	0.17	0.52	49.26	65.28	75.88	89.28	99.22	109.09	131.89
300	5	0.21	0.57	54.00	71.55	83.18	97.86	108.76	119.57	144.57
360	6	0.25	0.61	57.79	76.57	89.01	104.73	116.39	127.97	154.71
480	8	0.33	0.68	64.42	85.36	99.23	116.75	129.75	142.65	172.47
720	12	0.50	0.8	75.78	100.43	116.74	137.35	152.64	167.82	202.90
1080	18	0.75	0.91	86.20	114.23	132.79	156.24	173.63	190.90	230.80
1440	24	1	1	94.73	125.53	145.92	171.69	190.81	209.78	253.63
2880	48	2	1.32	125.04	165.70	192.62	226.63	251.86	276.91	334.79
4320	72	3	1.63	154.41	204.62	237.86	279.86	311.01	341.94	413.41
5760	96	4	1.85	175.25	232.23	269.96	317.63	352.99	388.09	469.21
7200	120	5	2.05	194.20	257.34	299.14	351.97	391.15	430.05	519.93
8640	144	6	2.22	210.30	278.68	323.95	381.15	423.59	465.71	563.05
10080	168	7	2.38	225.46	298.76	347.30	408.62	454.12	499.28	603.63

Fuente: Elaboración propia

Obsérvese en la tabla 3.6 que los valores de la fila con letras cursivas corresponden a la tabla 3.5 en donde la duración del aguacero es 24 horas.

3.2.4.2. Obtención de las curvas de intensidad – frecuencia y duración IFD para la estación M0162.

Como se dijo en la sección 2.1.4, si se dividen los valores de lluvia probable anteriores por su duración se obtienen las intensidades y graficando estos valores se obtienen las curvas IFD. Esto se realiza en la tabla A6.1 del anexo 6 donde aparecen los valores que le dan sustento a las curvas IFD de la figura 3.3.

Estas curvas fueron ajustadas siguiendo varios de los modelos expresados en la tabla 2.3 decidiéndose finalmente por la expresión de Bernard la que aparece en la figura 3.3 así como los valores que toman cada uno de los parámetros K , m , n para cada período de retorno.

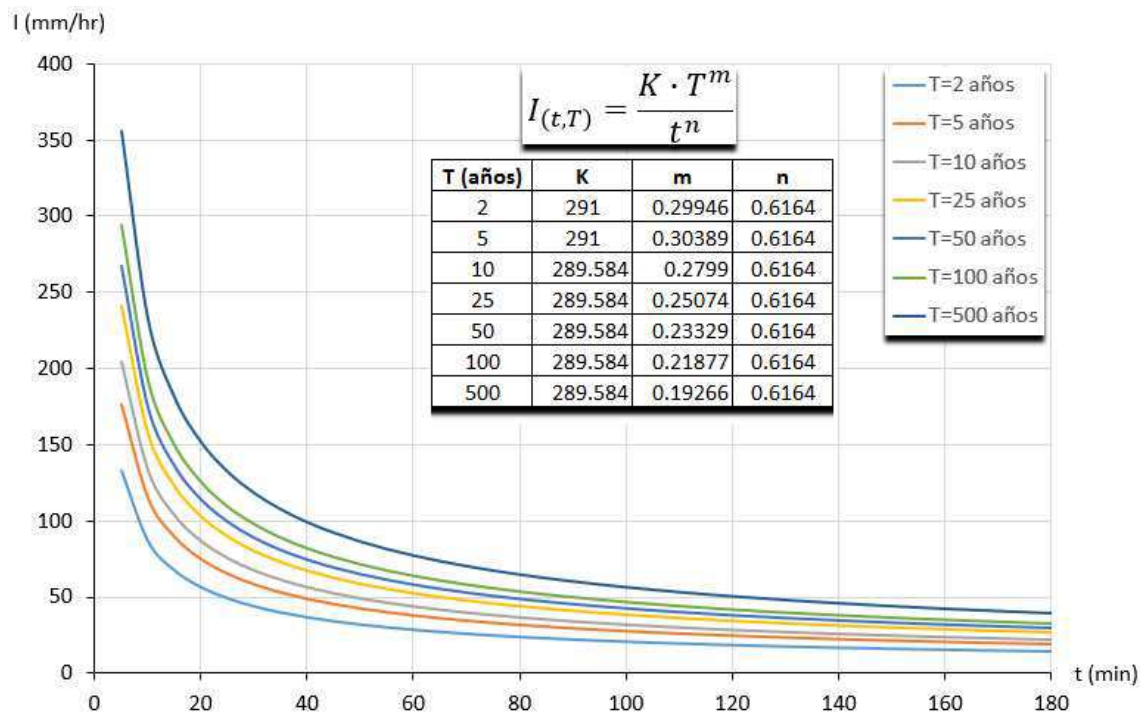


Figura 3.3. Curvas de Intensidad-frecuencia-duración IFD para la estación climatológica M0162.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.3. Obtención de hietogramas de trabajo.

Los hietogramas que se emplearán en este trabajo serán los correspondientes a aguaceros de una hora de duración y períodos de retorno de 10, 25 y 100 años. Estos fueron

obtenidos por medio de la metodología expuesta en el epígrafe 3.1.5.1, en el anexo A7 se presentan las tablas A7.1, A7.2 y A7.3, con todos los cálculos y explicaciones. En la figura 3.4 se presentan los hietogramas de forma gráfica.

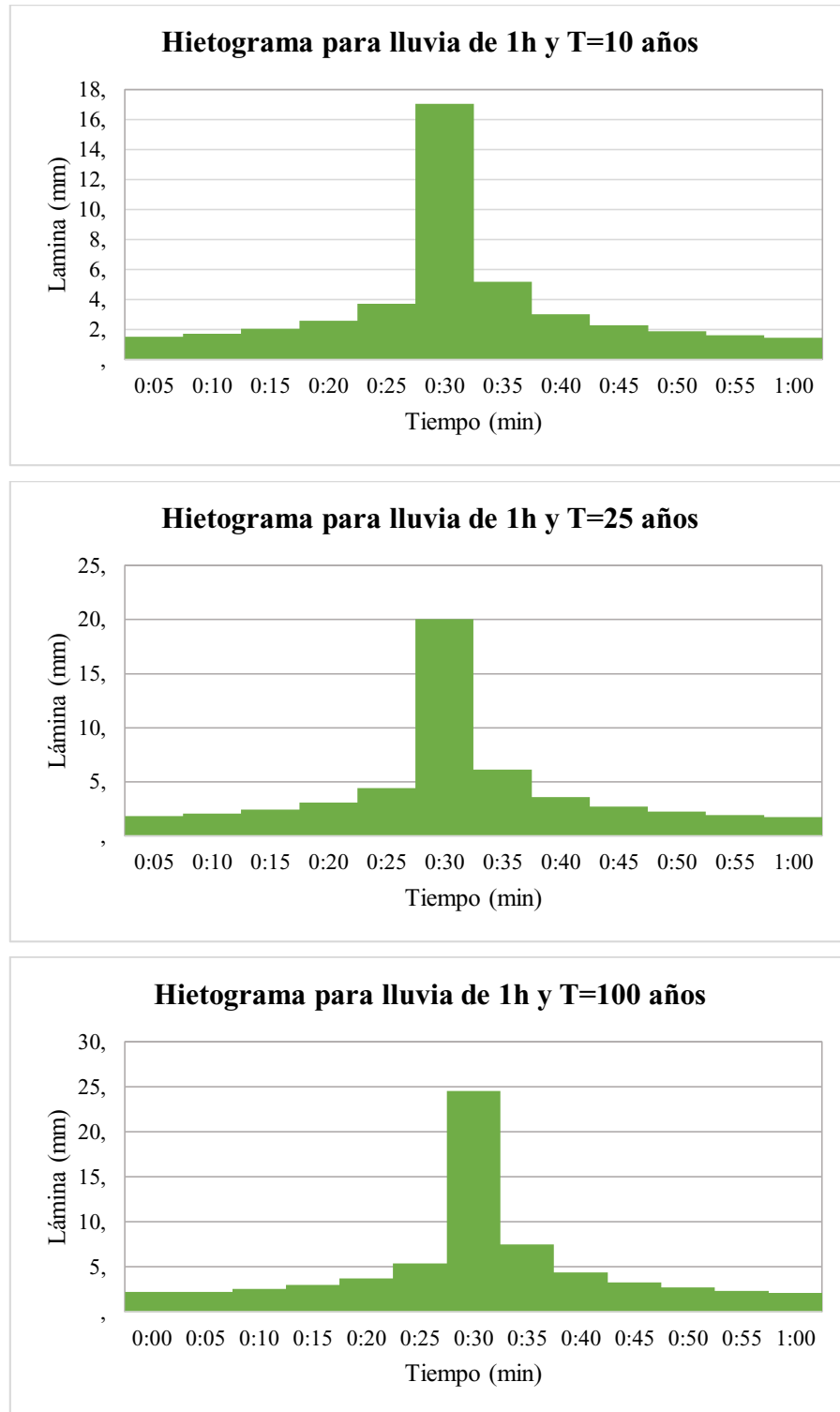


Figura 3.4. Hietogramas de lluvias de una hora y períodos de retorno T=10, 25 y 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Creación del modelo de simulación del sistema futuro de drenaje pluvial de Chone.

Seguidamente se detallan cada uno los pasos seguidos para construir el modelo general de la red de drenaje pluvial actual de la ciudad de Chone.

3.3.1. Procedimiento para la elaboración del modelo general de la red de drenaje pluvial actual de la ciudad de Chone en el software SWMM 5.1.

1. Recopilación, procesamiento y análisis de todos los datos e información del proyecto de la red de drenaje pluvial de Chone.
2. Delimitación de las áreas de drenaje (por manzanas) y su correspondiente asociación a pozos de drenaje.
3. Establecimiento de parámetros: Cálculo de las áreas de aportación mediante la tabla de atributo de (ArcMap) y asignación del CN número de la curva a cada área, calles y de cuerdas.
4. Importación de archivos *.shp hacia el programa (Autodesk Storm and Sanitary Analysis ASSA), y exportación desde este hacia el programa definitivo SWMM 5.0.
5. Creación de las series temporales mediante datos del hietograma de diseño y posteriormente
6. Asociación de los datos de precipitación a las subcuencas y conexión de las mismas a pozos del sistema de drenaje.
7. Asignación de los métodos de cálculo, donde se utilizará el método de la onda dinámica para los cálculos hidráulicos y el número de la curva (SCS) para el cálculo hidrológico.

De esta manera se ha conseguido obtener el modelo de simulación de la red, en la figura 3.4 se presenta la red de alcantarillado de la ciudad de Chone con sus respectivos elementos hidrológicos e hidráulicos tales como: áreas de aportación, nodos (pozos y descarga) y conductos (tuberías).

3.3.2. Descripción de las actividades realizadas y productos obtenidos.

En el sub epígrafe anterior se presentó, de manera general, una serie de pasos para la elaboración del modelo de simulación de la red de drenaje pluvial actual de la ciudad de Chone, a continuación se detallan los procedimientos realizados en cada una de estas actividades.

De la **primera actividad**, (*Recopilación, procesamiento y análisis de toda la información del proyecto de la red de drenaje pluvial de Chone*), es importante señalar que una gran parte de la información espacial referente a la red del proyecto fue suministrada por el GAD Chone, toda en formato vectorial shape *.shp, con lo cual se pudo elaborar mapas en ArcGIS 10.3 (plataforma SIG fundamental empleada en la investigación).

En la figura 3.5 se muestra la planimetría, sistema fluvial y trazado de la red de drenaje pluvial futura de la ciudad de Chone. En el caso de la red de drenaje se destacan los puntos de vertido o de descarga al río, estos son 17 puntos de descarga directa al río (denominados con las letras DES y un consecutivo numérico) y 2 puntos de descarga a depósitos donde existen estaciones de bombeo (denominados con las letras EB y un consecutivo numérico) que evacúan el agua al río.

En las tablas 3.7 y 3.8 se muestran las longitudes de tuberías con sus respectivos diámetros, éstos son datos que corresponden a la red de alcantarillado actual de la ciudad, han sido facilitados por los técnicos del GADM de Chone y resumidos por los autores de este trabajo de investigación. Dentro del sistema de drenaje de la ciudad se encuentran básicamente dos tipos de tuberías, hormigón y PVC, según los datos recabados existen 16787,14 m de tubería de hormigón, mientras que de PVC existen 16968,28 m.

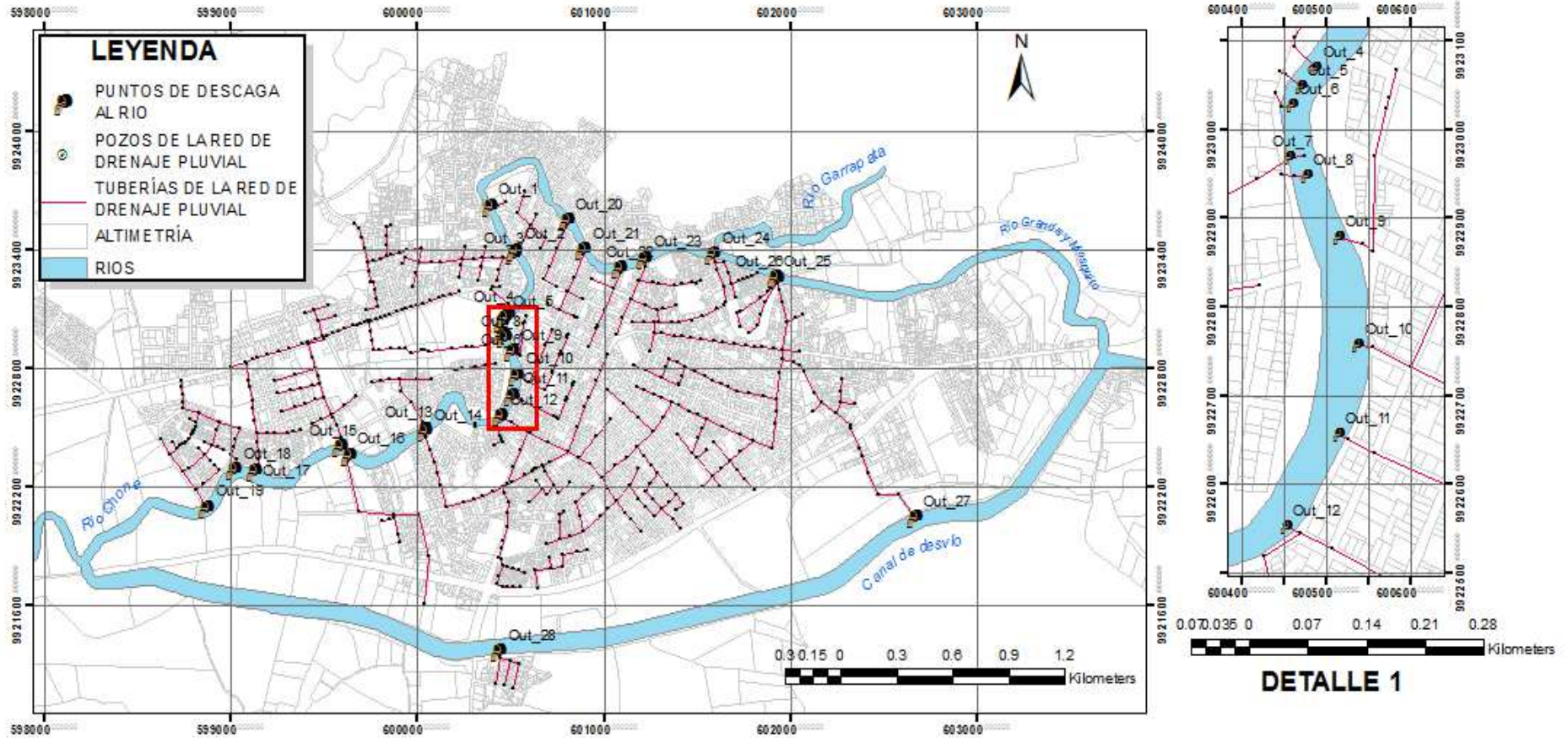


Figura 3.5. Red de drenaje pluvial futura de la ciudad de Chone.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7: Longitud de tuberías de hormigón de la red de drenaje actual de Chone con sus diámetros.

Diámetro de las tuberías (mm)									
150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Longitud (m)									
251,16	227,82	4624,73	2831,66	3132,00	3037,67	1161,35	564,48	150,30	805,97

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: Longitud de tuberías de PVC de la red de drenaje actual de Chone con sus diámetros.

Diámetro de las tuberías (mm)					
215	250	300	400	500	600
Longitud (m)					
47,35	1266,44	3951,51	5523,55	2612,69	3566,74

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que la mayoría de los tramos de tuberías de hormigón son las más antiguas en la ciudad, son parte del sistema desde el año 1976, aunque existen varios tramos más actuales integrados a la red en el 2011. Por otro lado, las tuberías de PCV empezaron a formar parte del sistema desde 1987 y los últimos tramos de este material fueron añadidos en el año 2013.

Por otra parte en el anexo A9 se pueden observar las subcuencas que definen o delimitan las áreas de drenaje en la ciudad.

Con relación a la **segunda actividad** del procedimiento, (*Delimitación de las áreas de drenaje (por manzanas) y su correspondiente asociación a pozos de drenaje*) es importante decir que esta es una tarea que se realizó en ArcGIS 10.3 con la ayuda de orto imágenes suministradas por el GAD Chone y teniendo en cuenta las ubicaciones de los pozos y pendientes de las calles, ver figura 3.6.

En la figura A10.1 del anexo A10 se puede observar un plano con las 2222 áreas de drenaje que serán introducidas en SWMM y de la cuales se generará el escurrimiento hacia el sistemas de alcantarillado.



Figura 3.6. Polígonos que representan áreas de drenaje hacia los pozos de la red.

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las áreas de aporte (incluidas las calles y avenidas) se pasa a la **tercera actividad** del procedimiento (*Establecimiento de parámetros*).

Básicamente son tres parámetros los que se introducen desde ArcGIS a cada polígono (área de drenaje), el primero es el área, que es obtenida por un procedimiento básico del SIG con la tabla de atributos del tema, el segundo es el % de área impermeable, este puede ser obtenido con la ayuda de las ortoimágenes, por ejemplo el valor de dicho parámetro para las áreas definidas en las avenidas es 100%, ya que prácticamente toda el agua que cae sobre los pavimentos se convierte en escurrimiento directo, al resto se les colocó el valor 25%.

El último es el valor de CN a cada polígono, para lo cual se empleó la tabla A1.4 del anexo 4 y también la tabla correspondiente que se publica en la ayuda del programa SWMM 5.1 que tiene la misma fuente (USDA, 1986). Para el uso de estas tablas se empleó el grupo hidrológico B, esta decisión se sustenta en la relación que presentan los grupos hidrológicos con la textura del suelo, en este caso Chone se encuentra en suelo clasificado como de textura media y por tal motivo el grupo hidrológico que le corresponde es el B, ver (Clavijo, Peñaherrera & Andrade, 2013).

En el mapa de la figura A10.1 del anexo A10 se puede ver la distribución espacial de los valores de CN (por rangos). Véase que en las avenidas y calles pavimentadas el valor de CN se encuentra en el rango 91-100 mientras que dentro de las manzanas del centro el rango predominante es 71-80, la otra zona que destaca es la de las manzanas de áreas más rurales que se encuentran en un rango de 61-70. Este mapa nos brinda una clara idea del

aporte de escorrentía superficial de las zonas, toda vez que los valores más altos del parámetro CN indican mayor generación de escorrentía directa.

En la **cuarta actividad** del procedimiento se utiliza el programa Autodesk Storm and Sanitary Analysis ASSA para transformar la información espacial que se necesita para el modelo en el programa SWMM 5.1. Estos datos son: Tuberías, Pozos y subcuencas (áreas de drenaje). Primeramente se cargan los ficheros *.shp provenientes de ArcGIS de la información anterior, esto se hace con la opción **File/Import/GIS import...** En el anexo A.11 se puede consultar el proceso de cargado de esta información y de posterior exportado de la red en formato *.inp para ser interpretado por SWMM 5.1.

Luego se procede a exportar la red hacia el programa SWMM 5.1 por medio de **File/Export/EPA SWMM v5.x File... en formato *.inp.**

Dentro de la **quinta actividad** (*Creación de las series temporales mediante datos de los hietogramas y su asociación a pluviómetros*), se deben crear series temporales de los hietogramas como se ilustra en la figura 3.7 y después se le asocian a los objetos pluviómetros que deben ser creados, en este punto ya se tiene el modelo de la red en SWMM 5.1.

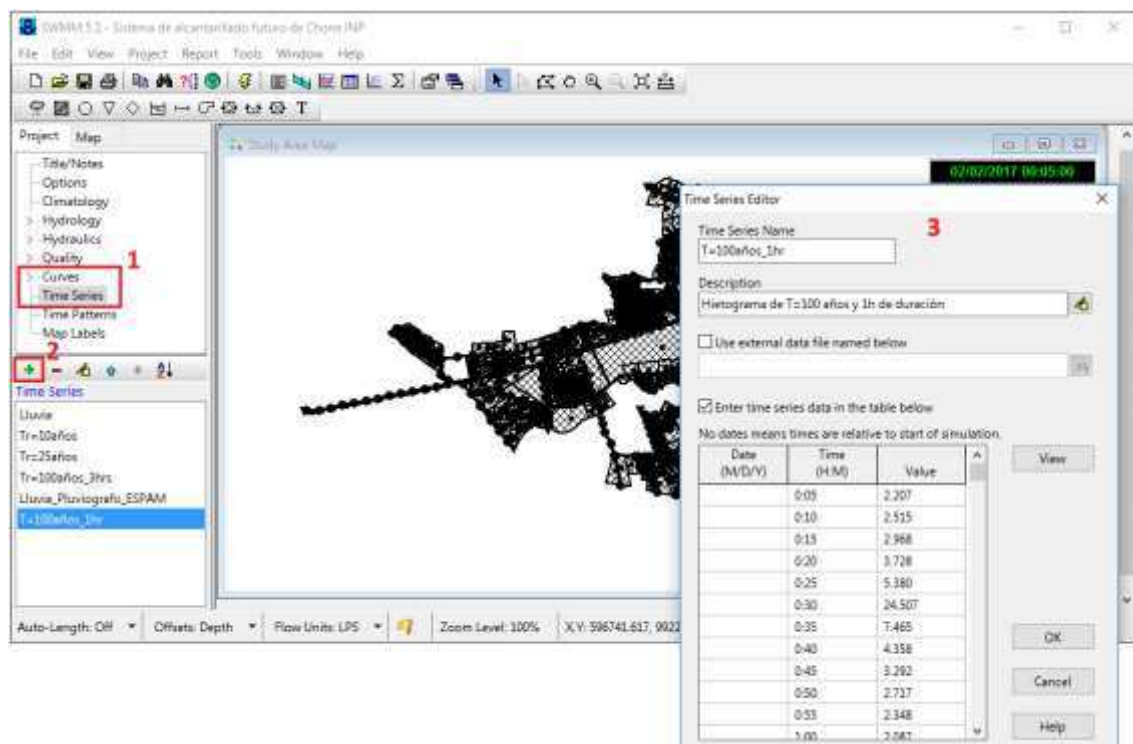


Figura 3.7. Definición de serie temporal de hietogramas en SWMM 5.1.

Fuente: Elaboración propia

Primero se selecciona *Time Series* de la opción *Curves* en la pestaña *Project*. Posteriormente se van agregando (una a la vez) las series temporales correspondientes a los hietogramas, en el botón marcado con 2 en la figura 3.7. Finalmente se introducen los datos de la curva en la ventana *Time Series Editor*, esta curva se puede introducir directamente (como el ejemplo mostrado) o puede ser entrada por medio de un fichero, ver la opción *help*.

Luego de tener definidas las series temporales se introduce un objeto Pluviómetro en una parte del mapa del área de estudio, esto se hace por medio del botón *Add a rain gage* de la barra de herramientas *Object*. Automáticamente se crea el Objeto *Rain Gage-1* que puede observarse seleccionando la opción *Rain Gages* de *Hydrology* de la pestaña *Project*, ver figura 3.8.

Obsérvese que el formato de lluvia que se define es “*Intensity*”, intervalo de tiempo de 5 minutos, se debe definir el nombre de la serie, en este caso “T=100años_1hr”, y las unidades de la lluvia son milímetros, ver figura 3.8.

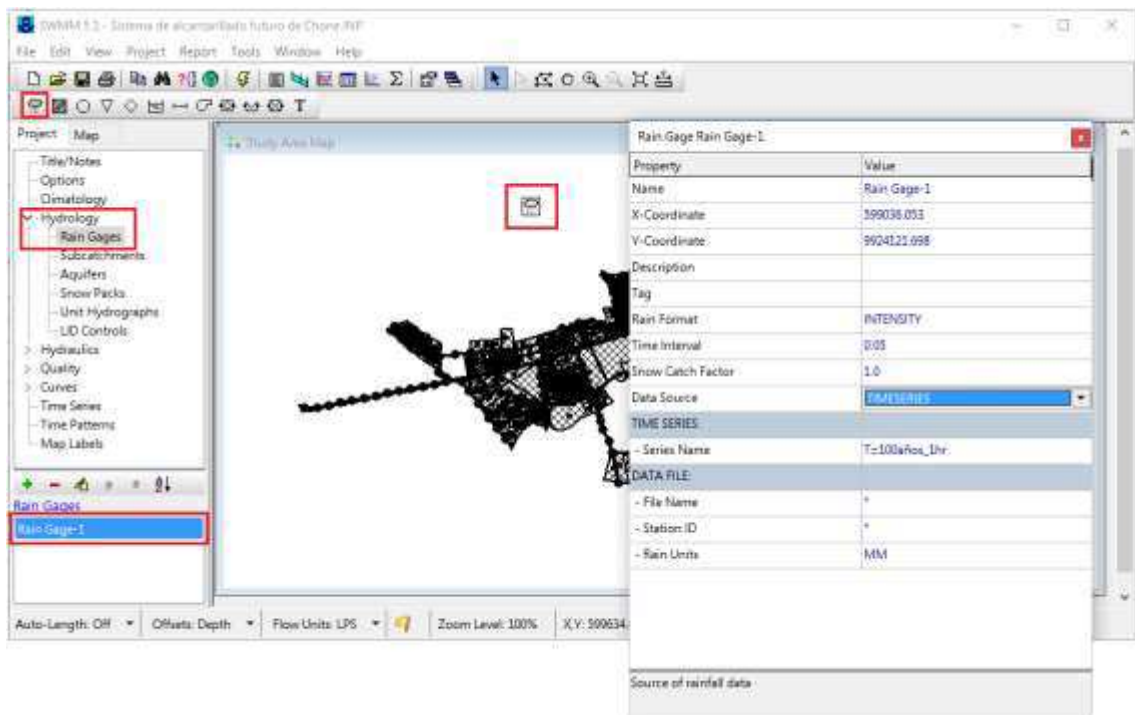


Figura 3.8. Definición del objeto pluviómetro y entrada de sus datos.

Fuente: Elaboración propia

En la **sexta actividad** (*Asociación de los datos de precipitación a las subcuencas y conexión de las mismas a pozos del sistema de drenaje*), se debe realizar la interconexión de las subcuencas a los pozos así como la asociación del pluviómetro a las subcuencas.

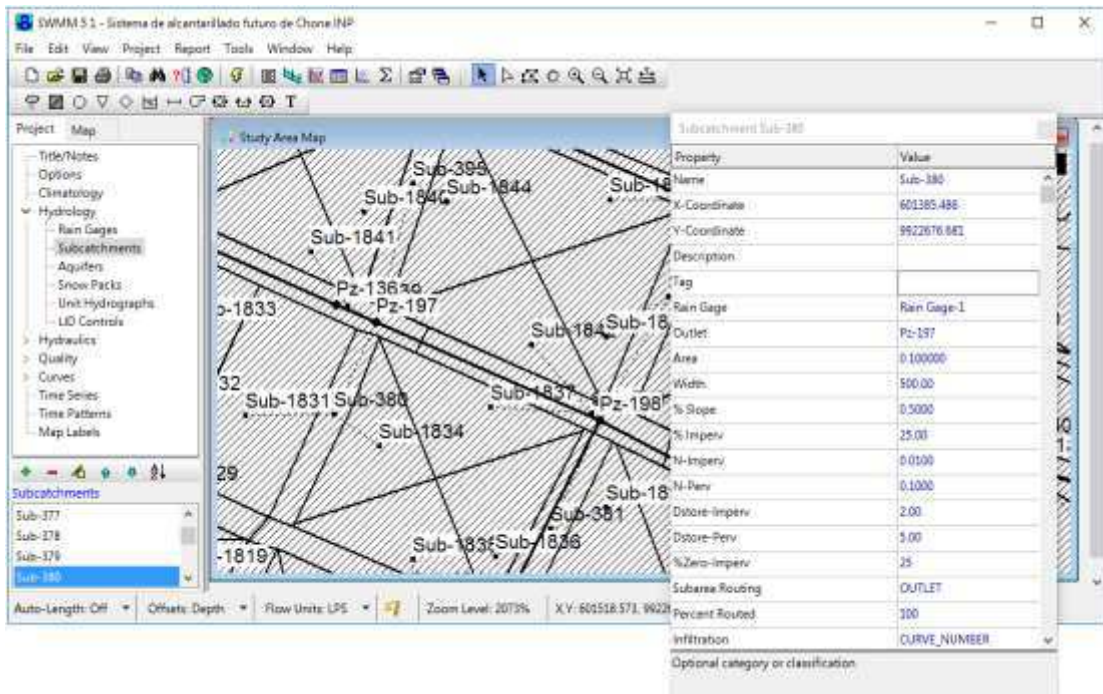


Figura 3.9. Definición del objeto pluviómetro y entrada de sus datos.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.9 se tiene una porción del área de estudio (apenas una dos manzanas), obsérvese que se encuentra seleccionada la subcuenca “**Sub-380**”. En este modelo a todas las subcuencas se les asoció el pluviómetro **Rain Gage-1**, el valor **Outlet** significa el objeto hacia donde irá todo el flujo que se produzca en esa subcuenca, en ese caso hacia el pozo **Pz-197** que se puede observar en la figura 3.9. En la opción **Outlet** también se puede seleccionar otra subcuenca, eso significaría que el escurrimiento de una subcuenca pasa a otra, lo cual es muy lógico en algunos casos, por ejemplo, las subcuencas **Sub-1831** y **Sub-1834** (que representan zonas internas dentro de una manzana) tienen como valor **Outlet** a la subcuenca **Sub-380** que representa una avenida y como se dijo anteriormente esta es la que transmite el caudal al pozo.

Se define un promedio de pendiente superficial % Slope = 0.5%, también valores del coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0.01$ y $n = 0.1$ para las zonas impermeables y permeables de las subcuencas, ver las variables N-Imperv y N-Perv respectivamente.

Se asume que la profundidad de los almacenamientos en depresiones para áreas impermeables y permeables son: $D_{store-imperv} = 2 \text{ mm}$, $D_{store-perv} = 5 \text{ mm}$. El porcentaje de área impermeable sin almacenamientos en depresiones es $\%Zero-imperv = 25\%$.

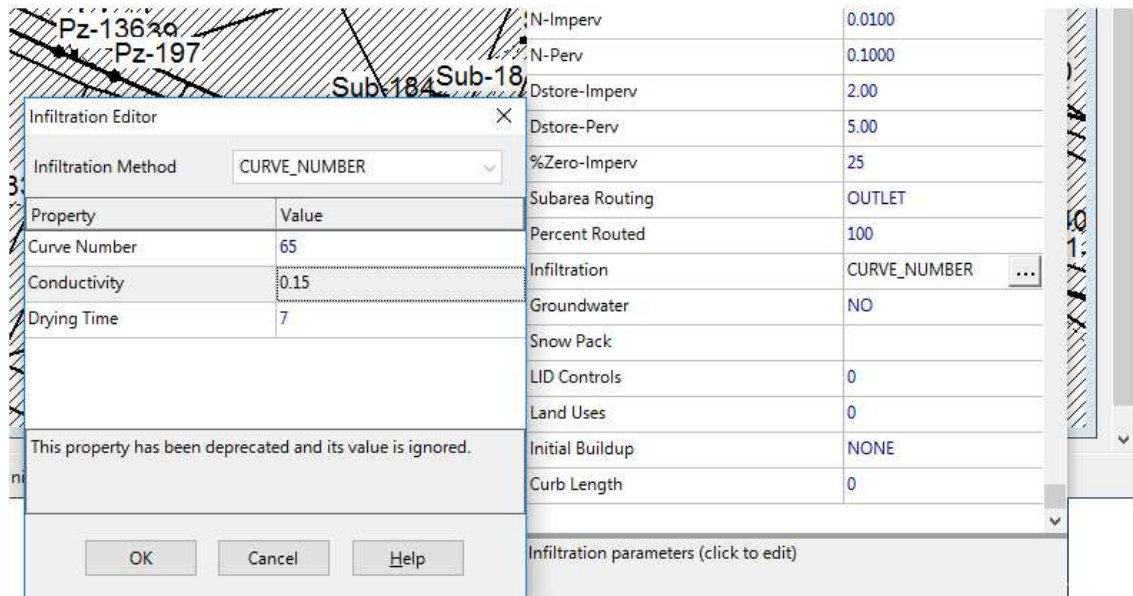


Figura 3.10. Continuación de la ventana Subcatchment Sub-380 de la figura anterior.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.10 se muestra la parte final de la ventana Subcatchment Sub-380 de la figura 3.9, obsérvese que los valores de CN ya venían desde el SIG, por lo tanto no hubo la necesidad de definirlo, el dato de conductividad ya no se tiene en cuenta en esta versión 5.1 de SWMM y se definen 7 días como el tiempo en el que el suelo completamente saturado llega a estar totalmente seco, variable *Drying Time*.

Posteriormente en la **séptima actividad** (*Asignación de los métodos de cálculo, donde se utilizará el método de la onda dinámica para los cálculos hidráulicos y el número de la curva (SCS) para el cálculo hidrológico*), se seleccionan los métodos de cálculo: Onda dinámica, y Número de la curva en la opción de valores por defecto del proyecto, ver el anexo A12.1.

Con el modelo general de la red de drenaje pluvial de la ciudad creado se pueden obtener los hidrogramas de salida en los puntos de vertimiento al río Chone, así como los niveles en las conducciones, zonas de la red donde ocurren fallas del sistema, etc.

3.4. Componentes definidos en el modelo de la red de alcantarillado pluvial de proyecto de Chone.

- **Pozos (Nodos)**

Es necesario darle características a cada tipo de nodos de tipo pozo, ya que existen dentro del modelo nodos de tipo, divisorio, vertido y depósitos, dentro de las características más importantes de un nodo tipo pozo, están la cota de fondo, la altura de pozo y el caudal que entra en ello.

Dentro del entorno de trabajo del SWMM el diseñador de la red es responsable de acercarlo lo más posible a la realidad el modelo de simulación con las diferentes tipos de nodo que posee el software, ya sea que exista por ejemplo una estación de bombeo funcionando con la red, no obstante no es el caso de la investigación realizada ya que en esta se contó solo con conexiones de tipo pozo y vertido.

La lluvia que cae sobre las áreas de aportación se escurre directamente al nodo que se le es asignado a cada área, y así se obtienen los aportes de cada área.

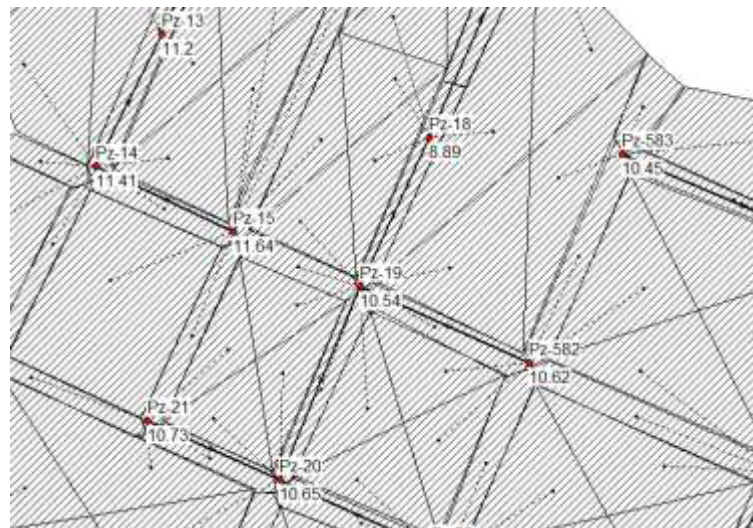


Figura 3.11. Representación de pozos con sus respectivas alturas (cotas de fondo)

Fuente: Elaboración propia

- **Conductos o tuberías.**

Comúnmente la sección más usada en los alcantarillados de drenaje urbano es la sección circular por su gran resistencia a cargas axiales, dicha resistencia es importante al momento de construir el alcantarillado porque por encima de la red estaría sometida a

cargas axiales producidas por el transporte de los vehículo sobre la vía, es recomendable diseñar los conductos con tirantes iguales al diámetro para evitar presiones internas.

En la tabla 3.1, se muestran el número de conductos con el mismo diámetro y su coeficiente de rugosidad de Manning con un valor constante 0.015.

Tabla 3.9: Cantidad de tuberías de PVC de la red de drenaje actual de Chone correspondientes a los mismos diámetros.

Tuberías		
Diámetro (mm)	Unidades	Rugosidad
215	1	0,015
250	24	0,015
300	64	0,015
400	97	0,015
500	41	0,015
600	65	0,015

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10: Cantidad de tuberías de hormigón de la red de drenaje actual de Chone correspondientes a los mismos diámetros.

Tuberías		
Diámetro (mm)	Unidades	Rugosidad
150	7	0,015
200	6	0,015
300	81	0,015
400	63	0,015
500	50	0,015
600	36	0,015
700	20	0,015
800	9	0,015
900	3	0,015
1000	12	0,015

Fuente: Elaboración propia

- **Subcuencas**

Como se mencionó en el capítulo 1, mediante el apoyo de un software SIG (ArcMap), se delimitaron las áreas que aportan a la red de drenaje. El cálculo de áreas se realizó con la marcación de puntos en todo el perímetro de cada área. En el anexo A9.1 se puede observar la delimitación de cada una de las subcuencas.

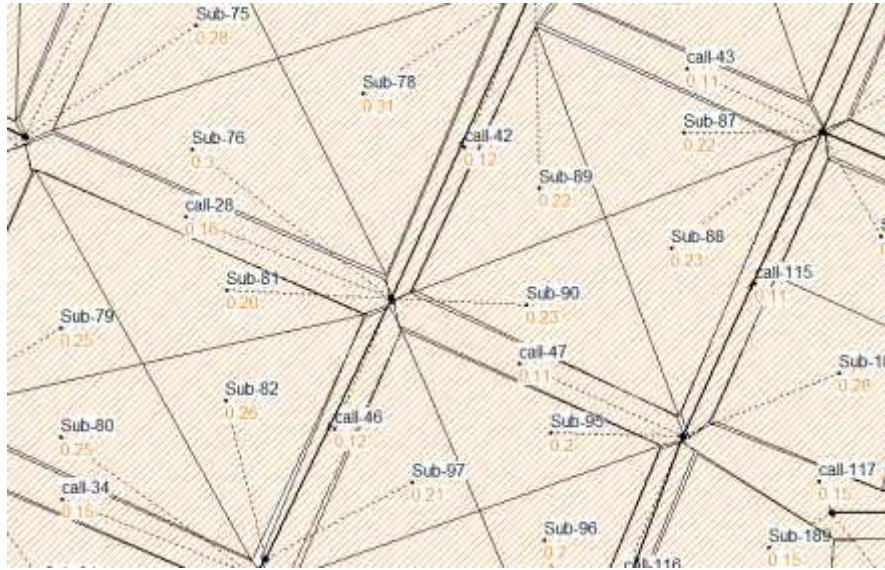


Figura 3.12. Representación de las subcuencas en SWMM 5.1

Fuente: Elaboración propia

- **Datos de precipitaciones**

Cabe resaltar que Chone no cuenta con los equipos necesarios que registren de una manera más exacta los eventos de lluvia que ocurre en la ciudad.

Para la obtención de las intensidades de lluvias sintéticas se realizó por medio de las curvas IDF, las cuales se utilizan como método alternativo en la toma de decisiones al momento de diseñar un sistema de alcantarillado urbano.

Chone cuenta con solo una estación pluviométrica con registros superiores a los 20 años. Por lo que se ha sido necesaria esa información para determinar la precipitación máxima diaria para la frecuencia de 10, 25 y 100 años mediante un análisis estadístico.

Para la obtención de las precipitaciones fueron necesarios los datos proporcionados por la estación pluviométrica M0162 del INAMHI.

3.5. Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.

Según los datos facilitados por el GADM de Chone y que fueron analizados para la elaboración de este trabajo de investigación, la red de alcantarillado actual de la ciudad presenta gran cantidad de inconvenientes a nivel de diseño, existen conductos en los que no se definen de manera correcta los valores de las pendientes, así como la altura de los

pozos, por este motivo y para facilitar los cálculos se realizaron modificaciones en las cota de los pozos y se recalcularon en ciertos casos las pendientes.

Se presenta un análisis estadístico de la serie de lluvias máximas mensuales de 23 años de la estación climática M0126 de Chone. De este análisis se obtuvo como resultados, la curva de intensidad-frecuencia-duración de esta estación y los hietogramas para aguaceros de duración 1 hora y períodos de retorno 10, 25 y 100 años.

Se pudo constatar que ciertos tramos de las conducciones de hormigón, exactamente 59, que representan 4104.36 m de tuberías, están habilitados desde 1976 es decir que cumplen con sus funciones desde hace 41 años por lo que se puede decir que estarían excediendo la vida útil, aunque según las tablas e información del GADM se encuentran en buen estado.

Se crea un modelo de flujo unidimensional de toda la red de drenaje pluvial futura de la ciudad de Chone, siguiendo los pasos de un procedimiento elaborado para la ocasión. Este modelo ha sido desarrollado en el programa SWMM 5.1.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO ANTE DIFERENTES ESCENARIOS HIDROMETEOROLÓGICOS.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO PROPUESTO ANTE DIFERENTES ESCENARIOS HIDROMETEOROLÓGICOS.

En el presente capítulo se aplica el modelo propuesto para la simulación de la red de alcantarillado pluvial actual de la ciudad de Chone ante diferentes escenarios hidrometeorológicos.

4.1. Simulación de la red de drenaje pluvial actual de Chone para un evento de lluvia de una hora de duración y 100 años de período de retorno, Escenario 1.

Este escenario es de gran importancia, ya que uno de los resultados más importantes de este trabajo es la obtención de los hidrogramas de salida en los puntos de descarga de la red, ante un evento de precipitación de una gran magnitud como el que se muestra en la figura 3.4 (hietograma de aguacero de una hora de duración y período de retorno $T=100$ años, estos hidrogramas podrán ser introducidos en un modelo fluvial para analizar los niveles de agua en el río (objetivo de otro trabajo de investigación).

En la figura 4.1 se muestra la ventana principal de la simulación del escenario 1. Esta simulación se realizó por 6 horas con intervalos de 5 minutos a partir de las 12:00 am que comienza el aguacero de duración 1 hora. Obsérvese que la imagen corresponde para el tiempo de 35 minutos de haber iniciado la lluvia, este es el instante en que el punto de descarga al río Out_11 descarga unos 334 l/s, esta es la mayor descarga que ocurre en la red y precisamente es el punto que recoge los aportes que van al colector principal de la calle Mercedes. Los colores asociados a los nodos tienen que ver con el caudal que les entra en ese instante, de igual forma ocurre con las tuberías, donde se visualiza la variable caudal y en las subcuencas, la intensidad de la precipitación. En el caso de los nodos, el tamaño es proporcional al valor de la variable, es por eso que los nodos con color azul tienen un mayor tamaño ya que en consecuencia tienen asociado un mayor valor de caudal.

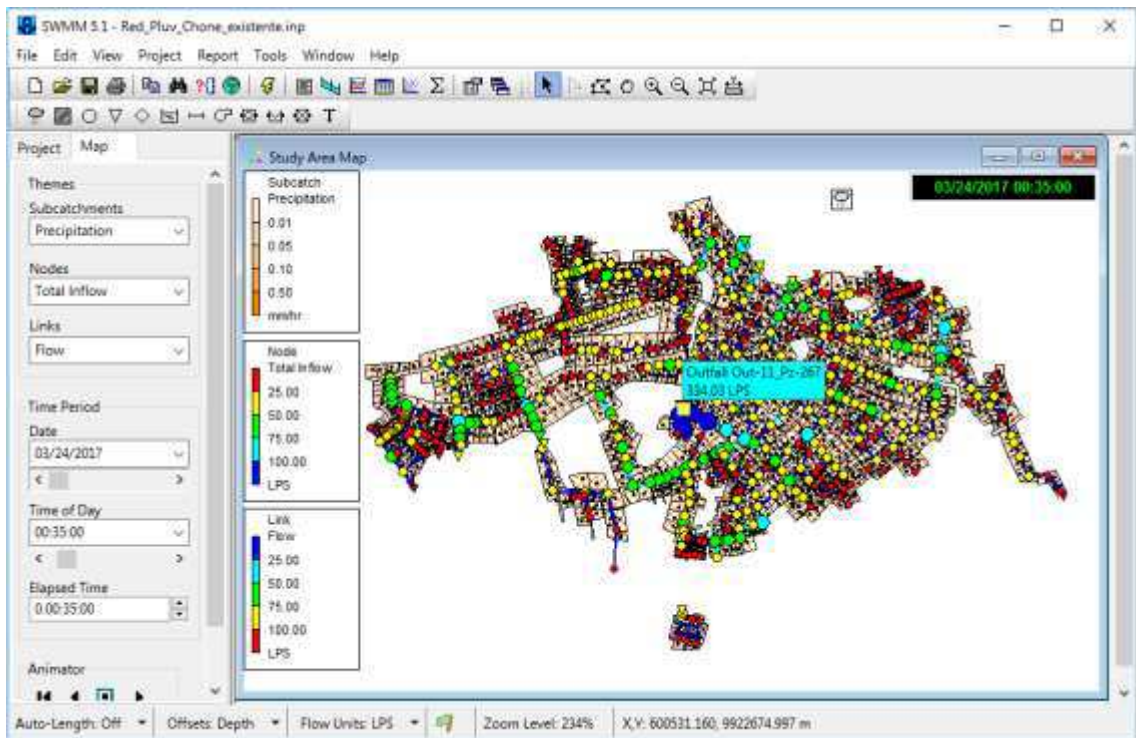
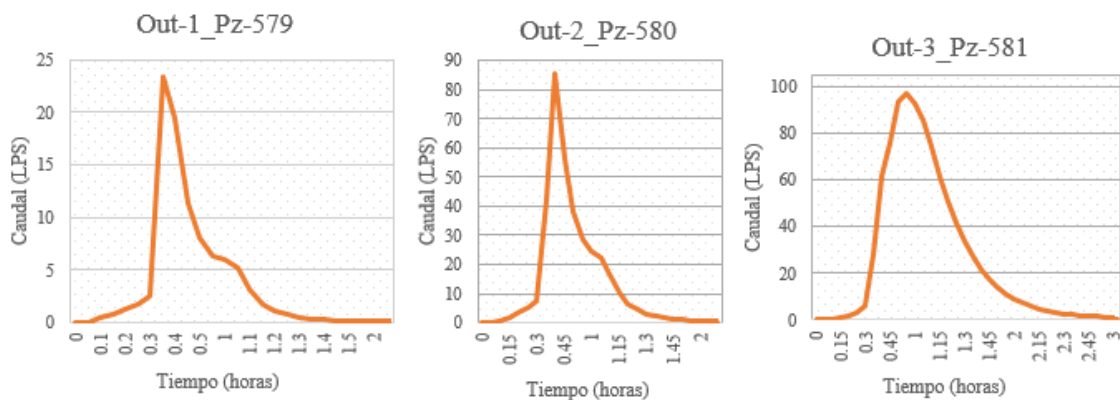
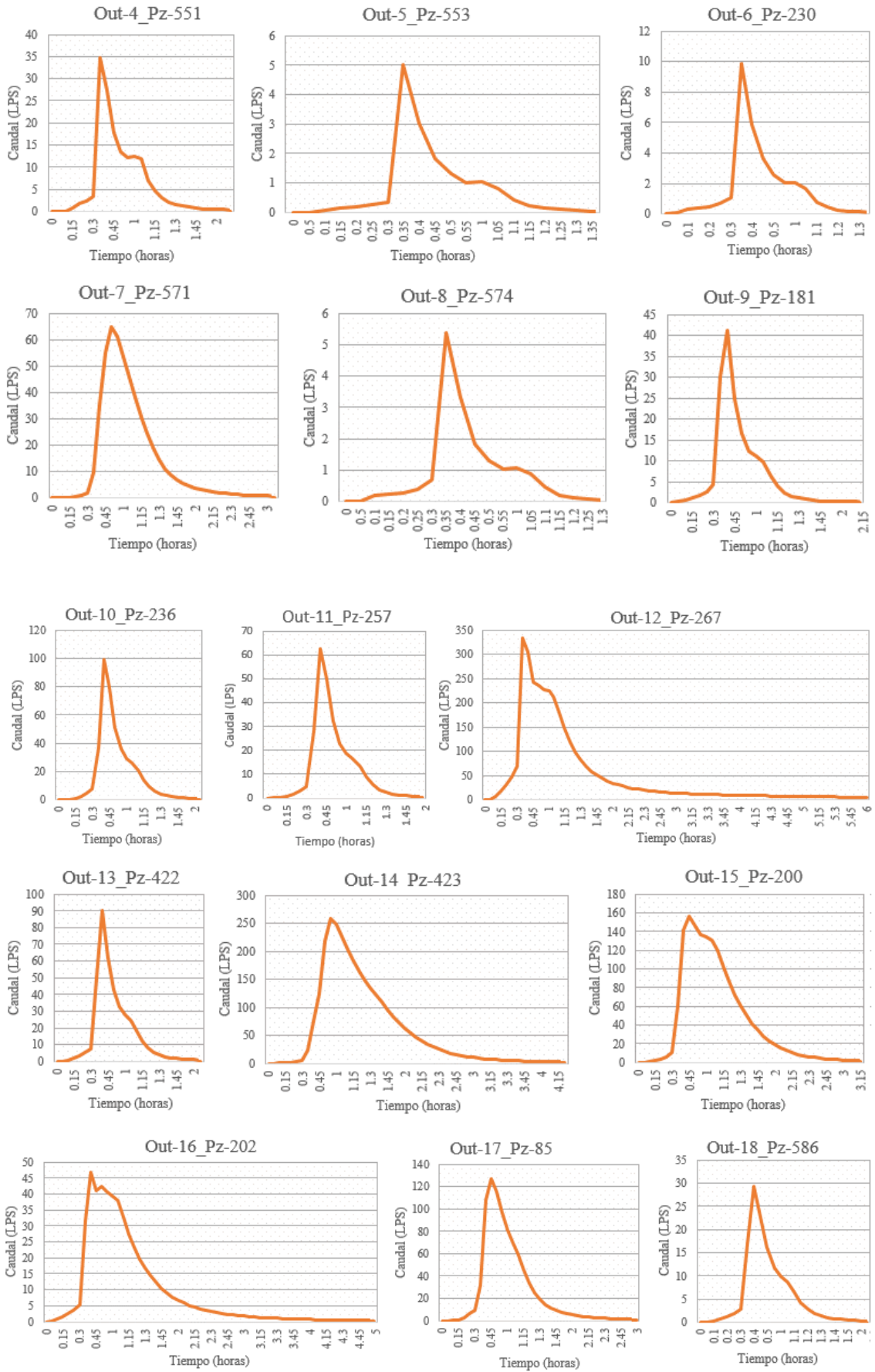


Figura 4.1. Ventana principal de la simulación de la red de drenaje pluvial para lluvia de 1 hora y T=100 años.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.2 se muestran los hidrogramas de salida de los 28 puntos de descarga al río, ver estas imágenes con el plano de la figura 3.5 para poder ubicar la posición de las descargas.





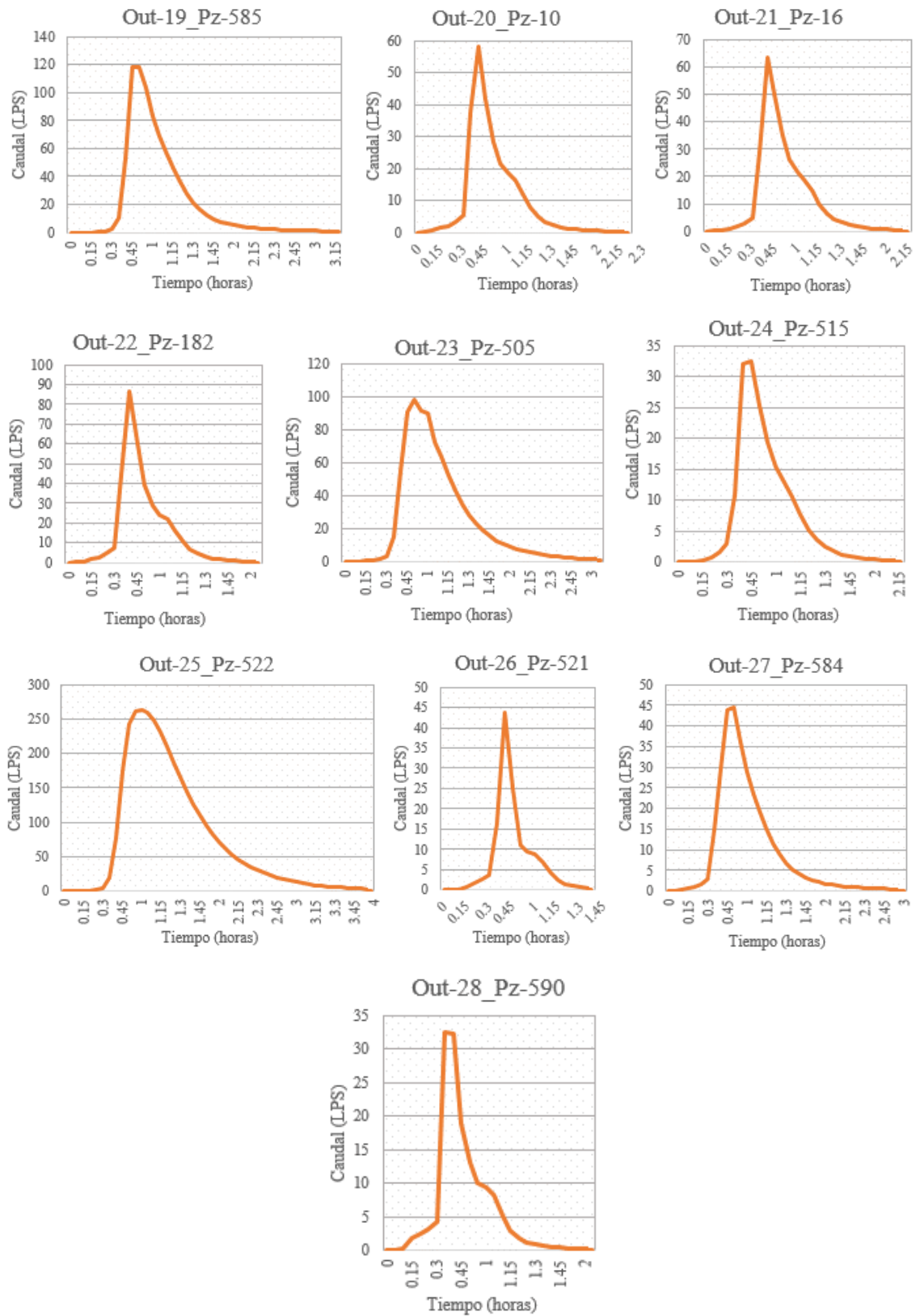


Figura 4.2. Hidrogramas de salida en los puntos de descarga, escenario 1.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que en la descarga Out_5_Pz-553 es donde menor flujo circula, siendo éste de 5.01 l/s, por el contrario el punto de descarga que mayor caudal aporta al río es el Out_12_Pz-267 con 333.62 l/s. En la tabla 4.1 se pueden observar todos los valores de caudal máximo obtenidos en las descargas y representadas en los hidrogramas de la figura 4.2.

Tabla 4.1: Caudales máximos en cada uno de los puntos de descarga.

Caudales		
Descarga	Nombre del punto	Caudal (LPS)
1	Out-1_Pz-579	23.42
2	Out-2_Pz-580	85.82
3	Out-3_Pz-581	96.71
4	Out-3_Pz-551	34.61
5	Out-4_Pz-553	5.01
6	Out-5_Pz-230	9.88
7	Out-6_Pz-571	64.80
8	Out-7_Pz-574	5.38
9	Out-8_Pz-181	41.15
10	Out-9_Pz-236	98.99
11	Out-10_Pz-257	62.81
12	Out-11_Pz-267	333.62
13	Out-12_Pz-422	90.44
14	Out-13_Pz-423	259.40
15	Out-14_Pz-200	156.64
16	Out-15_Pz-202	46.80
17	Out-16_Pz-85	127.33
18	Out-17_Pz-586	29.25
19	Out-18_Pz-585	118.41
20	Out-19_Pz-10	58.27
21	Out-20_Pz-16	63.32
22	Out-21_Pz-182	86.48
23	Out-22_Pz-505	98.35
24	Out-23_Pz-515	32.43
25	Out-24_Pz-522	263.28
26	Out-25_Pz-521	43.71
27	Out-26_Pz-584	44.45
28	Out-27_Pz-590	32.23

Fuente: Elaboración propia

Cabe indicar que en todos los cálculos realizados para la obtención de los hidrogramas, se asume que las tuberías se encuentran libres de sedimentos o cualquier objeto que pudiera dificultar el flujo libre de los caudales dentro de los conductos.

Otro de los resultados interesantes que se pueden obtener son los perfiles longitudinales en tramos de la red. En este tipo de gráficas se visualiza el nivel de agua en las conducciones (para cada tiempo). En la figura 4.3 se puede observar la posición (en planta) del tramo de red que une los pozos Pz14 con Out-19_Pz-10 y la ventana **Profile plot selection** donde se eligen los nodos de inicio y final del tramo.

Una vez realizado el perfil, (ver figura 4.4) se puede variar el tiempo hasta lograr la visualización de niveles en la tubería que se desea, se puede simular continuamente el sistema para notar la subida de niveles y la posterior bajada (tránsito del hidrograma). En la figura 4.2 se plasma el estado de las tuberías del perfil en el tiempo 40 min, justo el momento donde se tiene el mayor caudal, compruébese con el hidrograma del punto de descarga Out-19_Pz-10 que se muestra en la figura 4.2.

En la figura 4.4 y el resto de perfiles de este tipo, la línea verde que se encuentra uniendo los extremos superiores de los pozos, representan la cota del terreno.

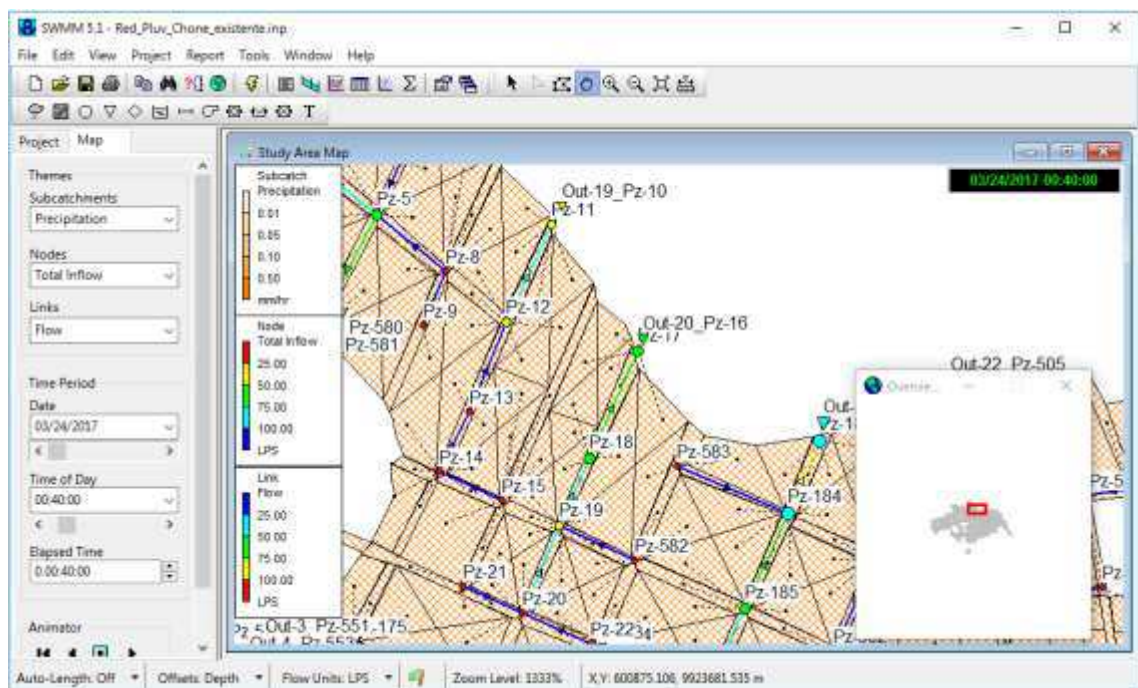


Figura 4.3. Creación de un perfil longitudinal de la red, desde el pozo Pz-14 hasta el nodo de descarga Out-19_Pz-10.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.4. Perfil de elevación desde el pozo Pz_14 hasta la descarga Out-19_Pz-10, tiempo 40 min.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Tramos con problemas evidentes en la red, caso del tramo pozo Pz-298 hasta el Pz-292.

En la red se han localizado tramos que presentan serios problemas como el que parte del pozo Pz-298 hasta el Pz-292, ver figura 4.5.

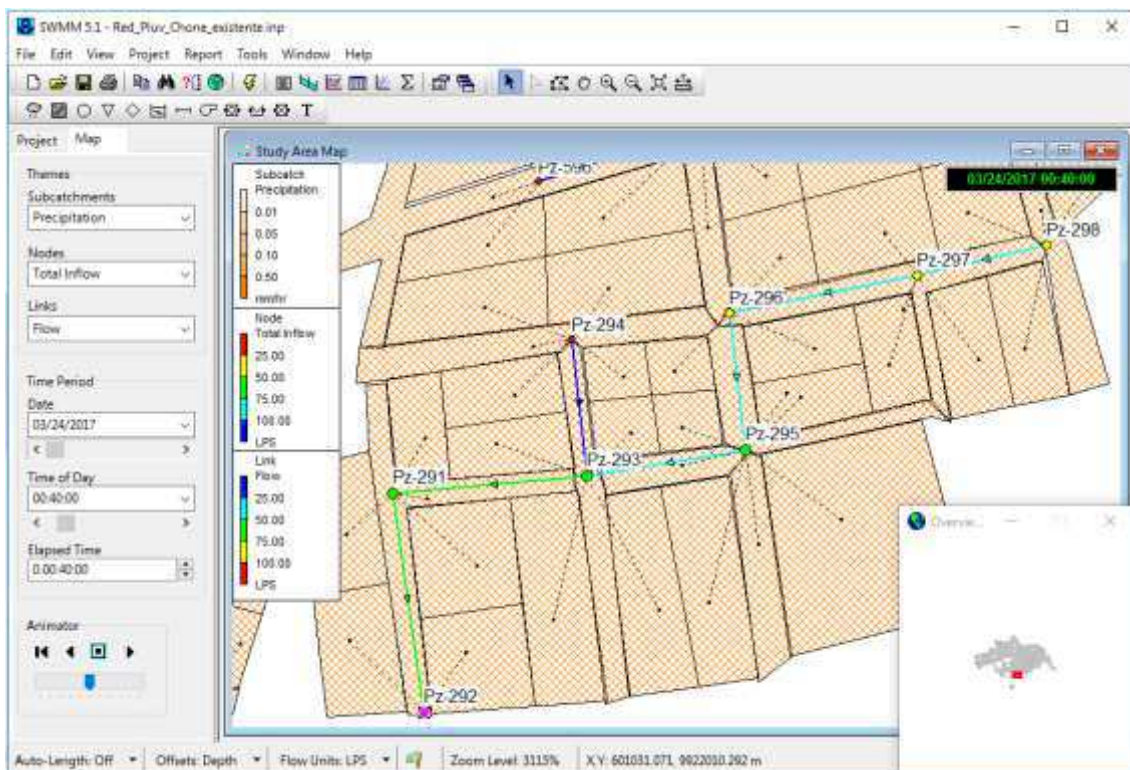


Figura 4.5. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292.
Fuente: Elaboración propia.

En este caso no existe un punto de descarga a una vaguada o sistema fluvial, por lo tanto cuando ocurre una tormenta como la que se está tratando en este escenario 1, el tramo en análisis comienza a trabajar a presión y sale el flujo a la superficie generando inundación, esto se puede ver analizando las figuras 4.6 a la 4.9.

En las 4 imágenes siguientes de perfiles de las secciones Pz-298 hasta Pz-292, para los tiempos 15, 25, 30 y 35 minutos se puede ver como los conductos se van llenando, hasta el último momento (tiempo 35 min) en que se llenan completamente las tuberías y los pozos, rebosándose varios de estos y por supuesto drenando todo este caudal superficialmente a las calles. El flujo se establece desde el pozo Pz-298 hasta el Pz-292, ver figura 4.5, es decir que en las 4 siguientes figuras sería de derecha a izquierda.

Con esta simulación se puede comprender la imagen que se encuentra en el anexo A12 donde se muestra un pozo que se está desbordando producto del mal funcionamiento del sistema de drenaje o debido a una tormenta mucho más intensa a la empleada para el diseño de la red.

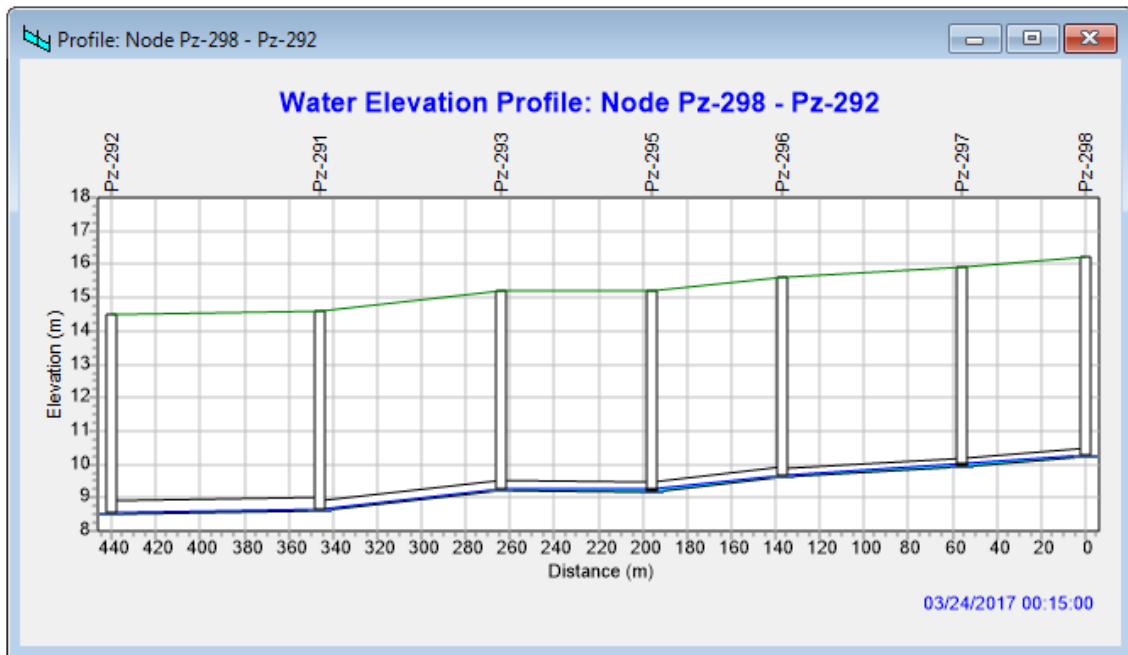


Figura 4.6. Perfil de elevación desde el pozo Pz-298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 15 min

Fuente: Elaboración propia.

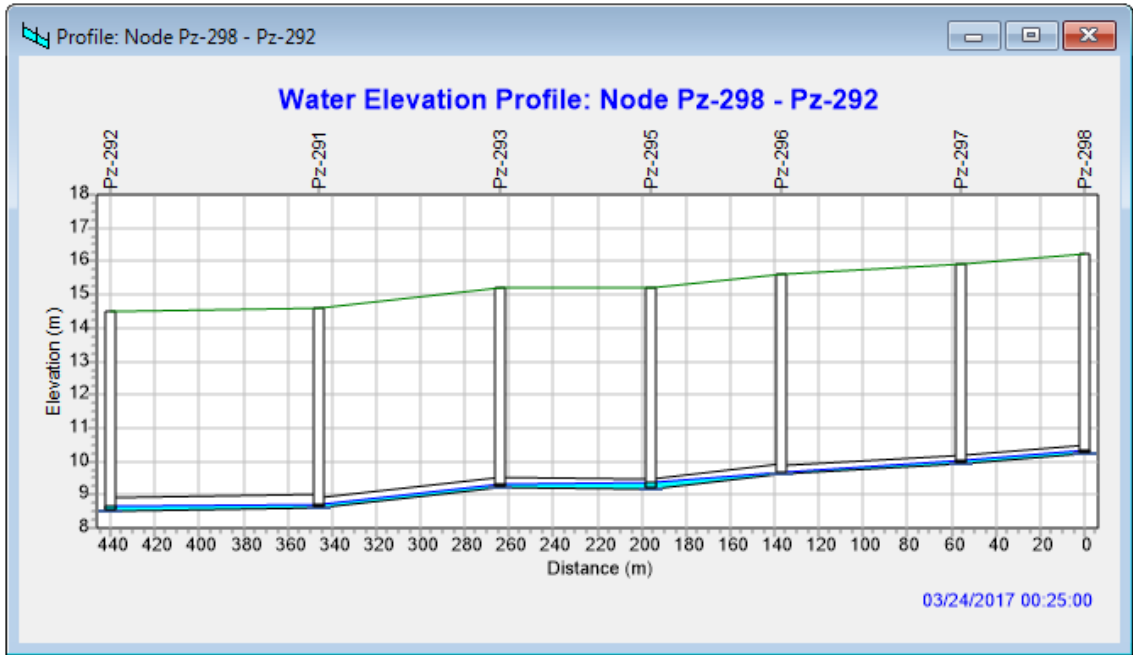


Figura 4.7. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 25 min
Fuente: Elaboración propia.

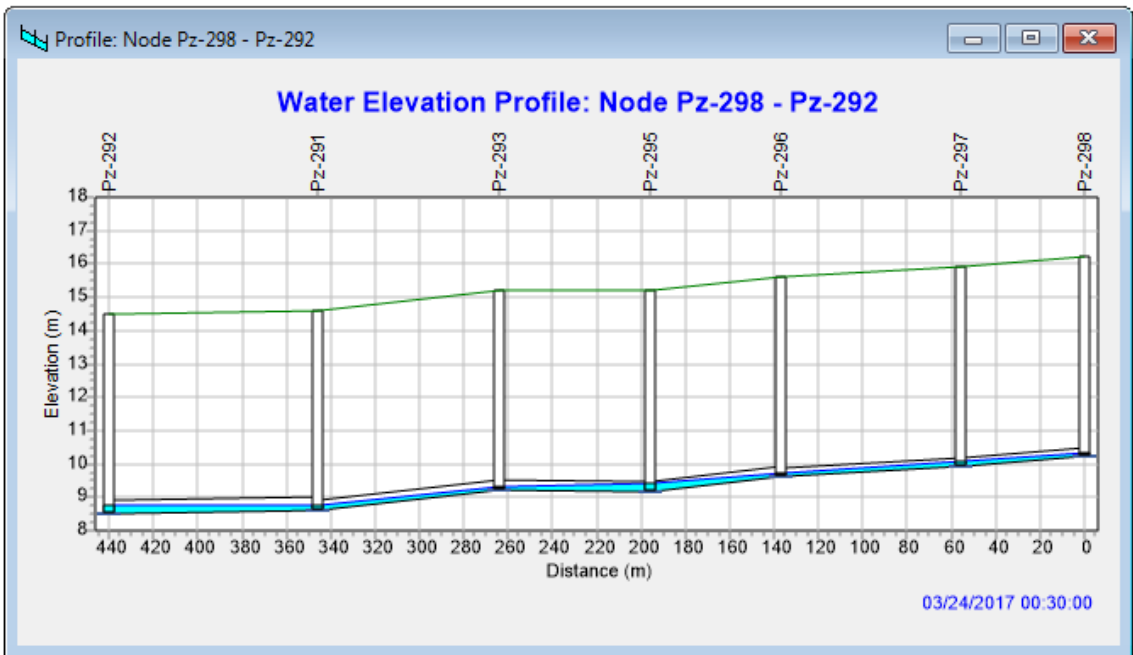


Figura 4.8. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 30 min
Fuente: Elaboración propia.

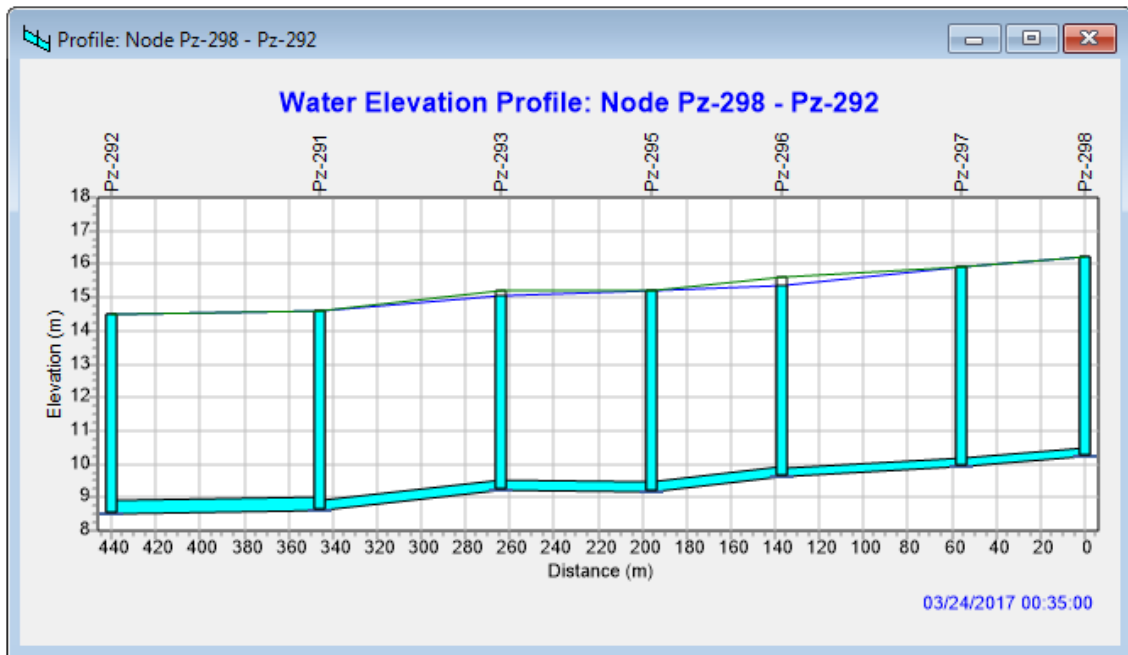


Figura 4.9. Perfil de elevación desde el pozo Pz_298 hasta la pozo Pz-292, tiempo 35 min
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Análisis de variación de parámetros hidráulicos por considerar tuberías con presencia de sedimentos que reduce su sección transversal.

Esta es una situación muy común fundamentalmente en la red de Chone, y es interesante mostrar cómo este fenómeno se puede tener en cuenta en el modelo creado y como varían los parámetros hidráulicos de la red.

En la figura 4.4 se presenta el tramo seleccionado (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10) y también se muestran las subcuencas o áreas de drenaje que aportan a cada uno de los pozos del tramo.

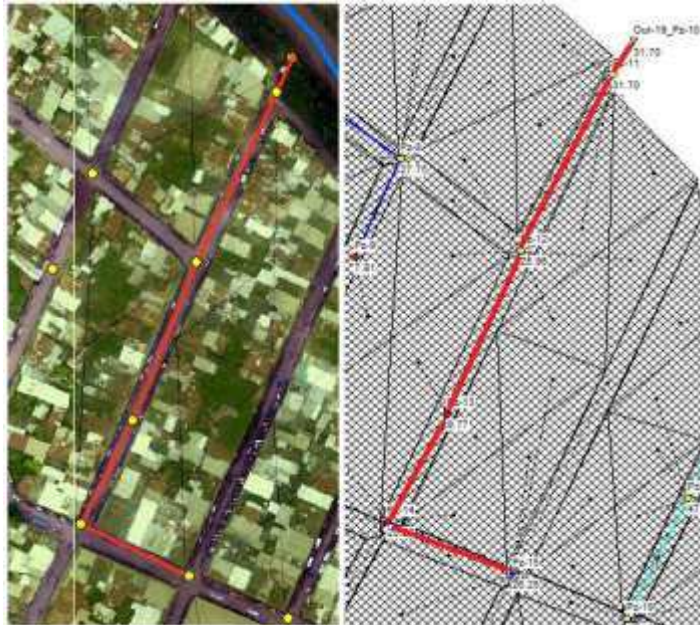


Figura 4.10. Tramo de estudio (desde el pozos Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10) y sus área de aporte.

Fuente: Elaboración propia.

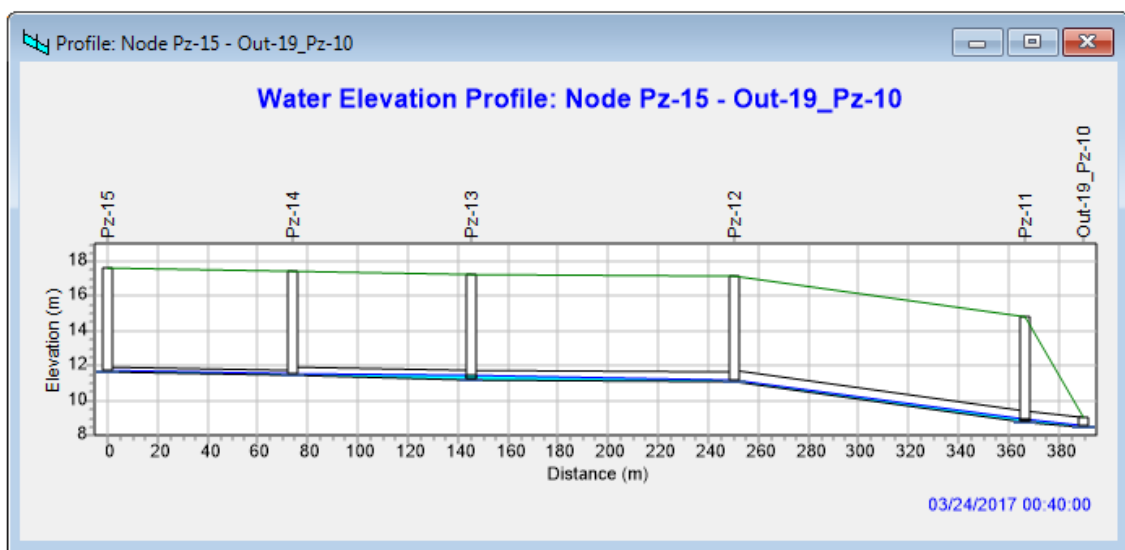


Figura 4.11. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), sin variación de la sección transversal de las tuberías.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.11 se muestra el perfil de este tramo suponiendo que no existe sedimento y por lo tanto la sección transversal de la tubería es completamente circular. El tramo (Pz-15 – Pz-14) tiene un diámetro de 300 mm, mientras que el tramo (Pz-14 – Pz-12) el diámetro es 500 mm, y finalmente los últimos dos tramos tienen diámetro 600 mm.

A continuación se realizar cuatro simulaciones teniendo en cuenta que las tuberías del tramo se han sedimentado una cantidad porcentual a todas por igual, en la primera

simulación, figura 4.12 se asume un tercio del diámetro, en la segunda se asume que se pierde la mitad de la sección transversal, ver figura 4.13, seguidamente se concibe la inutilización del 75% de la sección transversal, ver figuras 4.14 y 4.15, finalmente un 90% de la sección, ver figuras 4.16 y 4.17.

Para realizar esto se debe acceder a la ventana de propiedades de las tuberías y seleccionar la opción Profundidad rellena (*Filled Depth*) y colocar el valor correspondiente, en la figura 4.11 se coloca 0.1 m en la opción (*Filled Depth*) para la tubería contenida entre los pozos Pz-15 y Pz-14, que como se había dicho tiene un diámetro de 0.3 m.

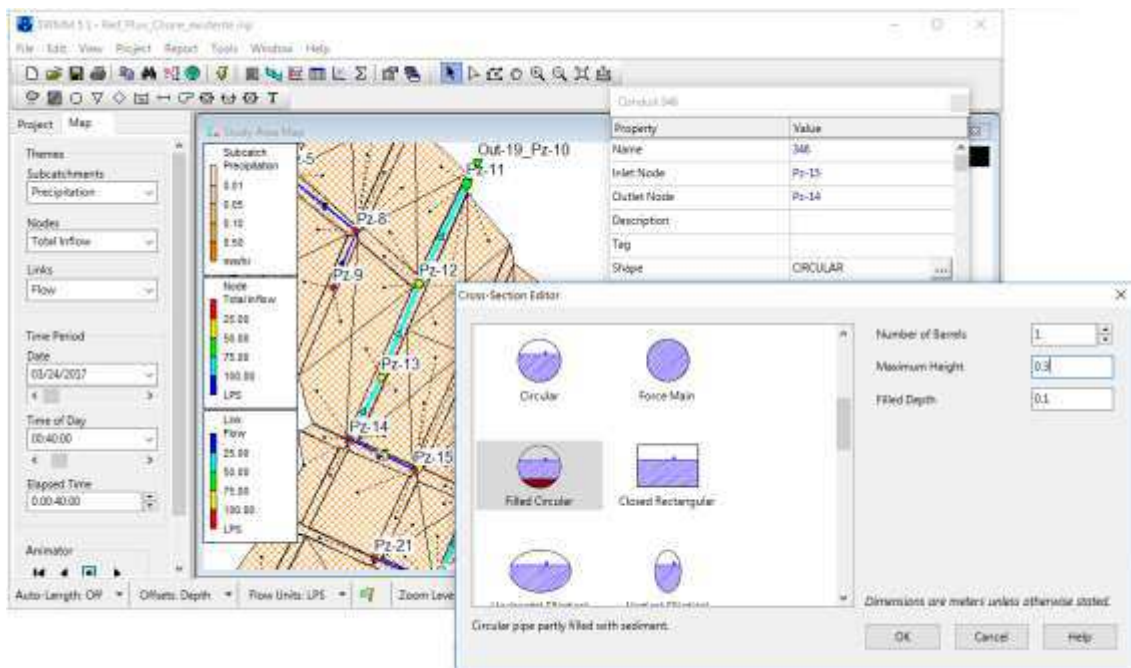


Figura 4.12. Opción para concebir la variación de la sección transversal de la tubería.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.13 se muestra el perfil de la sección de trabajo en la que se han reducido los diámetros en una tercera parte. Como resultado fundamental se puede decir que a pesar de que existe una reducción de la sección vertedora, el sistema sigue pudiendo evacuar el caudal, incluso el máximo que se obtiene a los 40 minutos, ver figura 4.13.

Cuando se reduce a la mitad el diámetro, figura 4.14 no se nota gran diferencia con la anterior en el perfil.

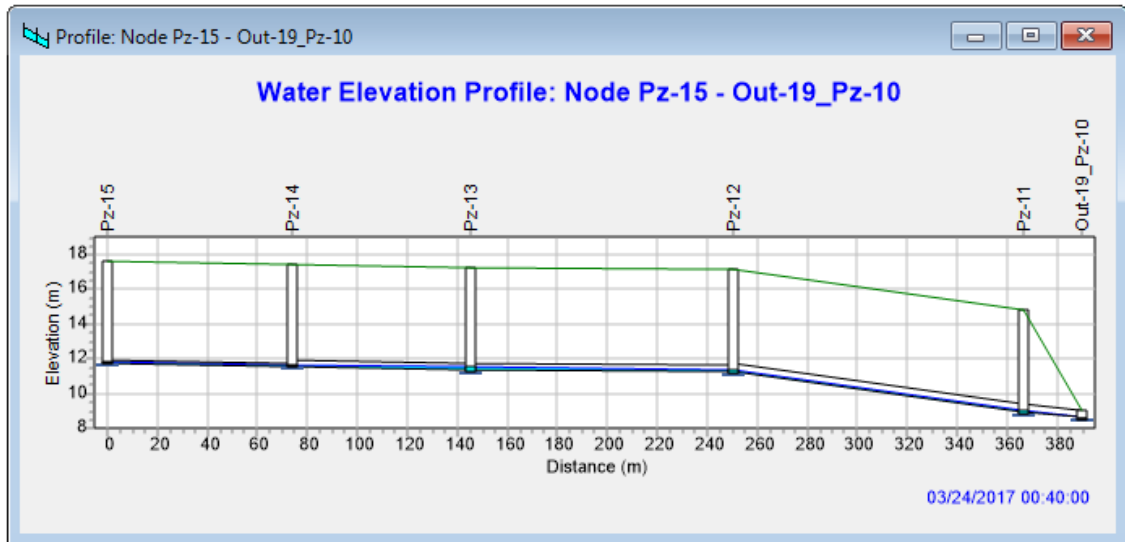


Figura 4.13. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías en un tercio de su diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

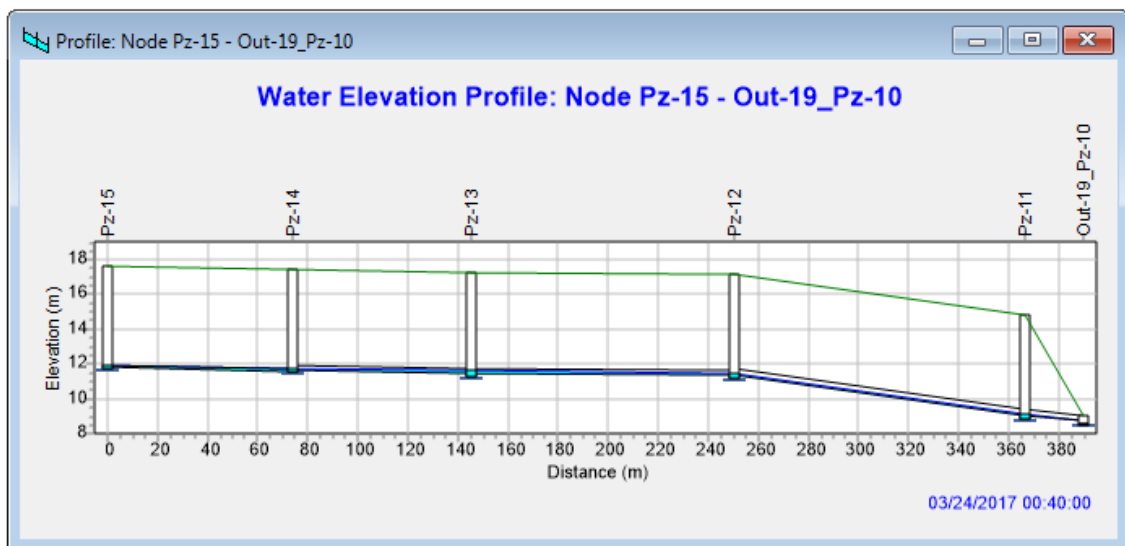


Figura 4.14. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías en la mitad de su diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo cuando la reducción es de un 75% de la sección, comienzan a trabajar a presión varias de las tuberías y comienzan a llenarse algunos de los pozos, es por eso que en esas tuberías aparece la llamada rasante piezométrica (línea azul) ver figura 4.15. Es interesante hacer notar que para esas condiciones minuto 35 el pozo Pz-15 se rebosa saliendo una parte del caudal hacia la calle. Si se quiere obtener el hidrograma del flujo de agua que sale a la calle en ese pozo, se puede graficar la variable *Flooding* tal como se muestra en la figura 4.16.

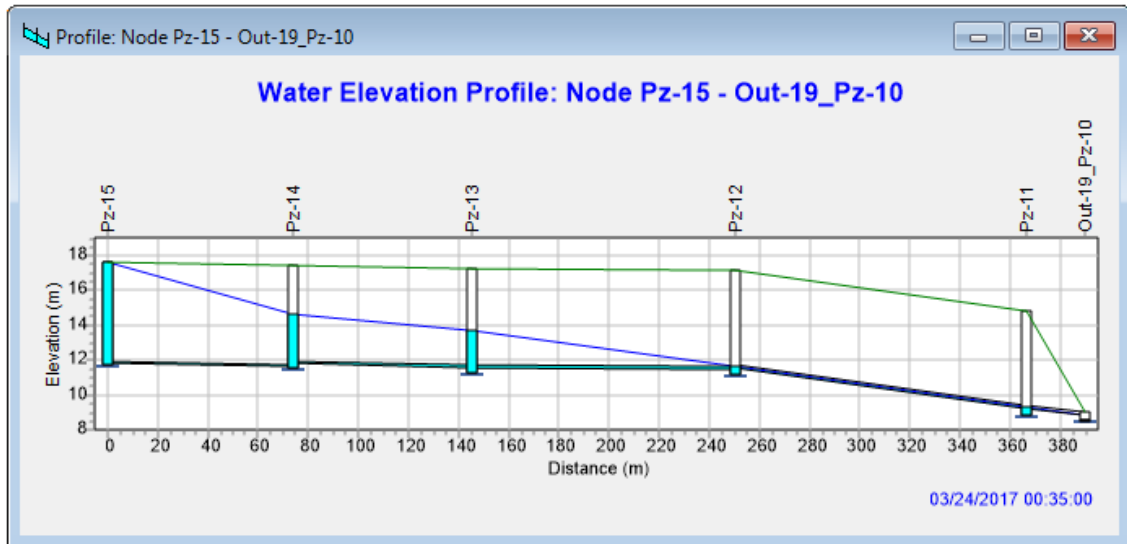


Figura 4.15. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías un 75% de su diámetro.

Fuente: Elaboración propia.

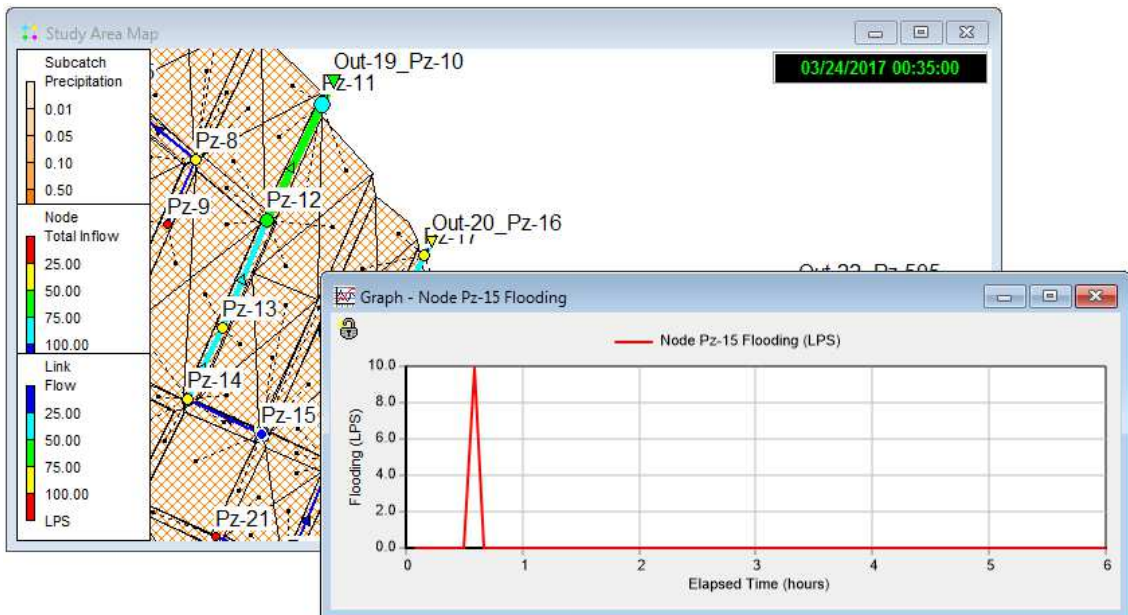


Figura 4.16. Hidrograma de salida de agua del pozo Pz-15 hacia la calle.

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese en la figura anterior que el flujo de salida es de unos 10 l/s y ocurre alrededor de los 35 minutos de haber comenzado el aguacero.

Finalmente se realiza una última simulación para evaluar el impacto de la reducción de la sección transversal de la tubería. En este caso se supone una reducción de un 90% de la sección transversal. Uno de los resultados se muestra en la figura 4.17 donde se puede observar que todas las tuberías están trabajando a presión.

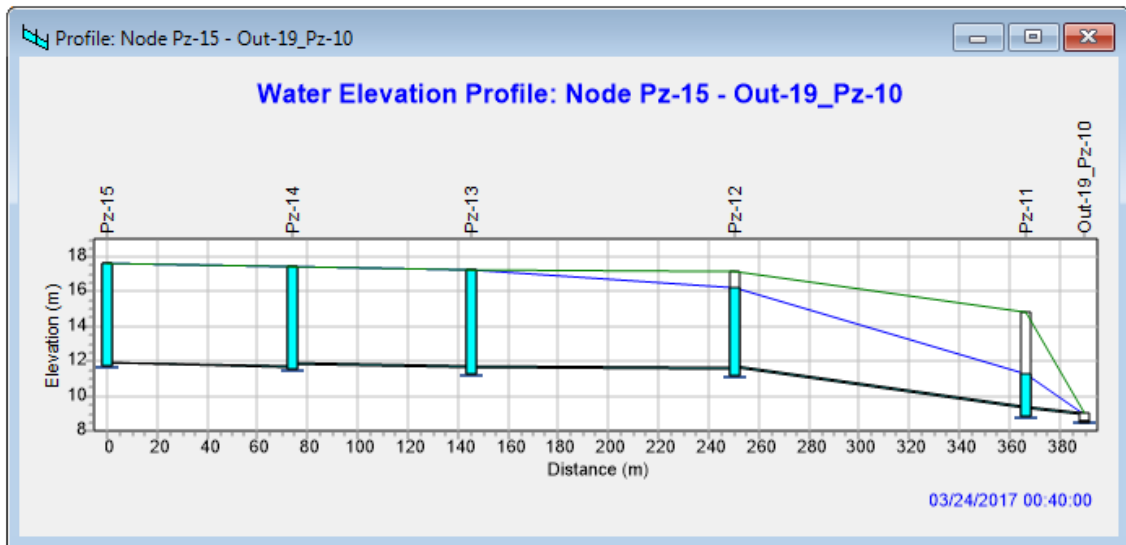


Figura 4.17. Perfil del tramo de estudio (desde el pozo Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), con variación de la sección transversal de las tuberías un 90% de su diámetro.

Fuente: Elaboración propia.

Se pudiera aplicar la misma estrategia que en el caso anterior y determinar los hidrogramas del flujo que se vierte a las calles (en los pozos donde esto ocurre). Sin embargo a continuación se presenta la figura 4.18 donde se grafican los dos hidrogramas de salida hacia el río, el mayor, sin variación de la sección de los diámetros (el mismo que se publica en la figura 4.2, ver Pz-10) y el más pequeño el que se obtiene con la reducción del 90% de la sección.

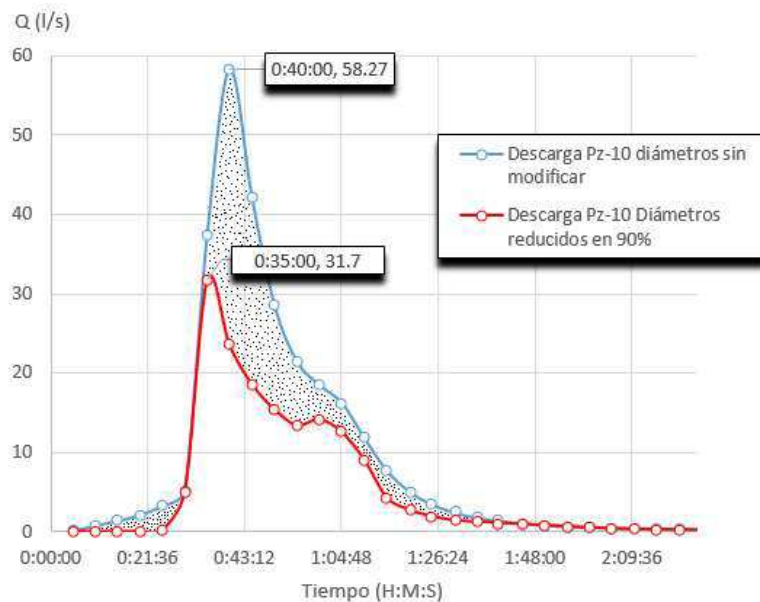


Figura 4.18. Hidrogramas de salida en el punto de descarga Out-19_Pz-10.

Fuente: Elaboración propia.

El área marcada entre los dos hidrogramas es el volumen de agua que de forma general va a la calle en este tramo.

4.2. Simulación de la red de drenaje pluvial actual de Chone para eventos de lluvia de una hora de duración y 10 y 25 años de período de retorno, Escenarios 2 y 3.

Se decide aplicar el modelo a estos aguaceros que evidentemente son de menor cuantía e intensidad ya que 10 y 25 años son periodos de retorno empleados para diseñar este tipo de redes, sin embargo los resultados más importantes fueron obtenidos la sección 4.1.

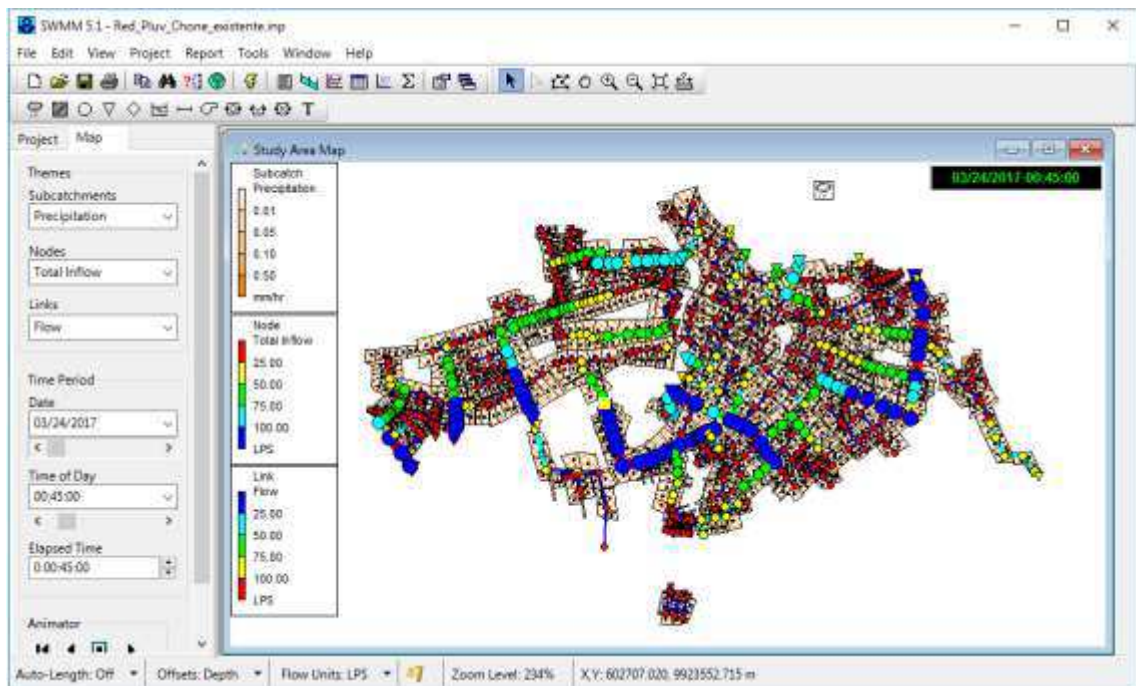


Figura 4.19. Simulación del escenario 2, lluvia de duración 1h y T=10 años.
Fuente: Elaboración propia.

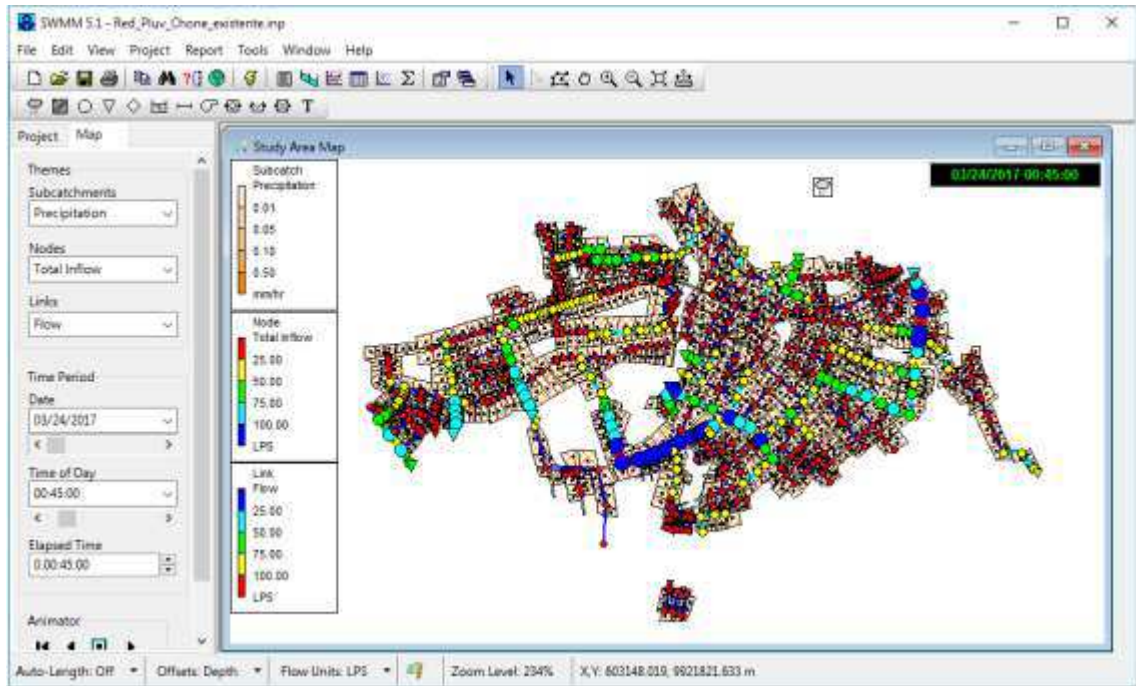


Figura 4.20. Simulación del escenario 3, lluvia de duración 1h y T=25 años.
Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo

En este capítulo se aplica el modelo creado en tres escenarios que varían en el hietograma de lluvias que se usa. El escenario más importante es sin lugar a dudas el primero donde se aplica la tormenta de duración 1h y período de retorno T=100 años. La simulación se realizó con éxito obteniéndose un grupo de resultados importantes, por ejemplo:

- 1- Se obtienen los hidrogramas de salida en todos los puntos de descarga al río, este es un resultado muy importante para un posterior análisis de la hidrodinámica fluvial del río Chone.
- 2- Se pudieron localizar tramos como el Pz_298 hasta el pozo Pz-292 donde no existe una solución clara de descarga del flujo pluvial y por tal motivo bajo una precipitación intensa las tuberías trabajan a presión, se llenan los pozos y ocurre escurrimiento hacia las calles.
- 3- Se modela, en el sector de la red (Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), los efectos hidráulicos de la reducción de la sección transversal en 1/3, 1/2, 75% y 90% del diámetro, dicha reducción responde al efecto físico de taponamiento de la red producto de la acumulación de sedimentos. Se demuestra que para las dos primeras reducciones el sector funciona correctamente, sin embargo en los casos de reducciones de 75% y 90% ocurre el llenado de algunos pozos y la salida de flujo a la superficie (calles) pudiéndose

determinar estos hidrogramas que provocan inundación en los sectores donde ocurren. Esto puede servir para la aplicación de un modelo de flujo bidimensional que modele las inundaciones en las calles.

CONCLUSIONES

- Con la investigación bibliográfica realizada se comprueba que los modelos matemáticos para la simulación de redes de drenaje pluvial, son en la actualidad la tecnología más utilizada para la comprensión y evaluación de los fenómenos que ocurren dentro de estos sistemas, constituyendo excelentes herramientas para el proceso de toma de decisiones que ayuden a mitigar los efectos perjudiciales de las inundaciones urbanas.
- Se crea un modelo de simulación de la red actual de drenaje pluvial de la ciudad de Chone, basado en el programa SWMM 5.1 y el apoyo de sistemas de información geográfica. Queda detallado el proceso realizado para la creación de dicho modelo.
- Se aplica el modelo obteniéndose los hidrogramas de salida de la red en los 28 puntos de descarga considerando una tormenta de una hora de duración y 100 años de período de retorno. También se localizan tramos con problemas como el (Pz_298 hasta el pozo Pz-292) donde no existe una solución clara de descarga del flujo pluvial y por tal motivo bajo una precipitación intensa las tuberías trabajan a presión, se llenan los pozos y ocurre escurrimiento hacia las calles.
- Se evalúa el efecto de disminución de la sección transversal de las tuberías provocado por el asentamiento de sedimentos, en el tramo (Pz-15 hasta el punto de descarga Out-19_Pz-10), los resultados son los siguientes:
 - Para una reducción de la sección de $1/3$ y $1/2$ del diámetro las tuberías son capaces de evacuar el flujo sin comenzar a trabajar a presión.
 - Para el caso de una reducción del 75% del diámetro, los pozos Pz-15, Pz-14 y Pz-13 entran en carga en el momento de máximo flujo (minuto 35 de haber comenzado la lluvia), demostrándose que solo en el caso del pozo Pz-15 ocurre vertimiento de flujo a la calle, para lo que se pudo obtener el hidrograma correspondiente.
 - Finalmente se redujo la sección en un 90% del diámetro de la tubería, debido a esto, todos los pozos entran en carga y ocurre vertimiento superficial en los pozos Pz-15, Pz-14 y Pz-13, lográndose determinar el volumen total vertido en el tramo.

RECOMENDACIONES

- Durante el trabajo de investigación se detectó inconsistencia en la información de pozos y tuberías, por ejemplo problemas con la ubicación de pozos, descargas, pendientes de las tuberías, así como del estado de las mismas, en ese último aspecto en los datos revisados indican que toda la red de drenaje de la ciudad se encuentra en “buen” estado, hecho con el que los autores de este proyecto discrepan teniendo en cuenta que hay conductos que llevan más de 40 años funcionando. Es vital que la dirección técnica del GAD Chone revise detalladamente este aspecto y que se realice una actualización y ampliación del modelo.
- Se recomienda a la dirección del GAD y/o Empresa Pública “Aguas del Chuno” acoger este modelo, invertir en la capacitación de su personal técnico (departamentos de Plan estratégico y proyectos y Unidad técnica de gestión de riesgos) y establecerlo como una herramienta indispensable para la toma de decisiones, lo que implica seguir una estricta disciplina de mantenimiento que significa (actualización y mejora), para eso se cuenta con el apoyo de la Universidad.
- Una vez que se haya actualizado la información básica de la red (pozos y tuberías), realizar un proceso de calibrado de los parámetros del sistema, fundamentalmente de los que tienen que ver con el modelo de infiltración.
- Se recomienda levantar e insertar en el modelo la información de los puntos de descarga que no lo hacen de forma libre sino que tienen un depósito compensador y una estación de bombeo.
- Se recomienda implementar el estudio de estas tecnologías dentro del pensum académico para las carreras relacionadas al campo de la hidráulica y al manejo de recursos hídricos; esto permitirá a la comunidad de futuros profesionales realizar pronósticos, evaluar sistemas, analizar diferentes escenarios y sobre todo basar sus decisiones en conceptos bien estructurados en lo que al tema respecta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Herrero, R. (s.f). ¿Es necesario proteger este encauzamiento? Retrieved from Obtenido de: <http://eselagua.com/2015/09/30/es-necesario-proteger-este-encauzamiento/>
- ACOLIT Cía. Ltda. (2008, Julio). Actualización Múltiple Chone. Chone, Manabí, Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Manabí.
- Acosta, & Sierra. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *22(35)*, 31.
- Amancio. (2007, Abril). Efectos de escala sobre la simulación del flujo de agua superficial en áreas urbanas usando modelos basados en la onda cinemática. 5.4.
- Aragón-Hernández, J. L. (2013, Mayo 2). Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano. Barcelona, Cataluña, España: Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona. Retrieved from <http://www.tesisenred.net/handle/10803/129077>
- AUTODESK Knowledge Network. (2016). Suplemento de Instalación de AutoCAD Civil 3D. *¿Qué otras aplicaciones y utilidades están disponibles para la instalación con AutoCAD Civil 3D?* U.S.A: AUTODESK.
- Berroeta, C., Santiabañez, S., Clarys, P., & Diericks, M. (2000). Modelación hidrodinámica de redes de alcantarillado. Experiencia piloto en EMOS S.A. Porto Alegre, Río Grande del Sur, Brasil: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Sánchez, H., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009, Diciembre). Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS. *1*. Barcelona, Cataluña, España: Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Burgos, V. H. (2007, Mayo 19). XXIº Congreso Nacional del Agua 2007. *DESARROLLO URBANO DE BAJO IMPACTO HIDROLÓGICO (DUBI): Una alternativa para una adecuada hidrología urbana del Gran Mendoza*. Tucumán, Tucumán, Argentina: Instituto Nacional del Agua - Instituto Provincial de la Vivienda.
- Caballero, M., Lozano, Z., & Ortega, B. (2008). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 5.
- Cabrera, E. (2009). Sistema para la administración de la Explotación de Agua Subterránea. *Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas*. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". Facultad de Ingeniería Civil. Centro de Investigaciones Hidráulicas .
- Cabrera, E., Minaya, F., Santisteban, L., Barreiro, D., Moreira, D., Giler, P., & Alcivar, F. (2016). *Procesamiento estadístico de la lluvia, obtención de las curvas IFD y aguaceros sintéticos para la estación M0162 del INAMHI en Chone*. Informe técnico parcial del proyecto de investigación: "Evaluación del funcionamiento integrado del sistema de alcantarillado pluvial de Chone", Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí ULEAM, extensión Chone., Chone.
- Cabrera-Puga, M. G. (2016, Marzo). Simulaciones hidrológicas hidráulicas en el sistema del río Chone, hasta la ciudad del mismo nombre, considerando la presencia de las obras ya construidas del proyecto de propósito múltiple Chone. 19. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Centro del Agua y Desarrollo Sustentable- ESPOL. (2012, Diciembre). Perfil Territorial con Enfoque en Gestión de Riesgos del Cantón Chone. *Proyecto: Análisis de Vulnerabilidad a Nivel Municipal*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Alcantarillado Pluvial*. México DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . Retrieved Abril 11, 2016, from

<ftp://ftp.cna.gob.mx/Mapas/libros%20pdf%202007/Alcantarillado%20Pluvial.pdf>

Concha. (2007, Noviembre). *Hidrología Urbana*. 295. Barcelona.

Da Silva, D. D., Martínez, Y., & Jiménez, G. C. (2016, Septiembre-Diciembre). Modelación matemática como estrategia para el diseño de redes de drenaje pluvial urbano. *SCielo*, 1-10. Retrieved Febrero 16, 2017, from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000300001

Da Silva, D., Martínez, Y., & Jiménez, G. (2014). Estimación de caudales máximos en una cuenca urbana de Luanda. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

Del Bosque, I., Fernández, C., Martín-Forero, L., & Pérez, E. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica y la Investigación en Ciencias Humanas y Sociales*. Madrid: Confederación Española de Centros de Estudios Locales (CSIC). Retrieved Febrero 20, 2016, from <http://digital.csic.es/bitstream/10261/64940/1/Los%20SIG%20y%20la%20Investigacion%20en%20Ciencias%20Humanas%20y%20Sociales.pdf>

Díaz, A., Ward, P., P, S., Aerts, J., Iceland, C., Tianyi, L., . . . De Moel, H. (2016, Septiembre 28). Cuantificación del riesgo de inundaciones a escala global: Aqüeduct y Flopros research projects. Lima, Arequipa, Perú: XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica .

Dolz, J., & Gómez, M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. *I*. Barcelona, Cataluña, España: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved Diciembre 19, 2016, from <http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/99/101/6353.pdf>

Domenech, A. (2014, Febrero 17). *Alcantarillado Pluvial*. Retrieved from http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_3._alcantarillado_pluvial.pdf

- Dominguez, B. J. (2000). *Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: CIEMAT. Retrieved Marzo 28, 2016, from http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/115/38115075.pdf
- ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc). (1990).
- Flumen. (2007, Enero). Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0. *Análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0*. Barcelona, Cataluña, España: Universitat Politècnica de Catalunya-E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental.
- GAD Chone. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Cantón Chone 2014-2019*. Chone.
- GADM Chone. (2017). *Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Chone*. Retrieved from Chone, Capital Mundial del Cacao Fino de Aroma: <http://www.chone.gob.ec/>
- García. (2006, Noviembre). Hietogramas de diseño en zonas urbanas. 6.
- Gil, V., Varela , C., & Mardones, G. (2005). Gestión integral del riego por inundaciones: Caso de estudio Ciudad de Chone. 93-94. Retrieved from Obtenido de: <http://docplayer.es/17260923-Gestion-integral-del-riesgo-por-inundaciones-caso-de-estudio-ciudad-de-chone.html>
- Gil, V., Varela, C., & Mardones, G. (2005). *Gestión Integral del Riesgo por Inundaciones: Caso de estudio Ciudad de Chone*. Retrieved Abril 10, 2016, from CEPEIGE: <http://www.cepeige.org/Documentos/2005%2891-109%29.pdf>
- GMMF. (2005). Manual del usuario. 1-2.
- GMMF. (2005). Manual del usuario. SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales). (GMMF, Trans.) Washington D.C., Estados Unidos: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

- Gómez, & Aristizabal. (2002). Obtención de curvas de intensidad - frecuencia - duración para el departamento de Caldas. 1. Colombia.
- Gómez, H. (2006). *Sistemas de Información Geográfica, uso, técnicas y múltiples aplicaciones*. San Cristóbal, Venezuela: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Retrieved Marzo 1, 2016, from <http://www.redalyc.org/pdf/360/36012424001.pdf>
- González, C. G. (2013, Marzo). Simulación Hidráulica de rejilla de boca tormentas de la calle Vicente Guerrero esquina con California en Cd. Obregón, Sonora para la determinación de su capacidad de captación. *Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*. Obregón, Sonora, México: Instituto Tecnológico de Sonora.
- Granda. (2013, Agosto). Análisis numérico de la red de drenaje pluvial de la urb. Angamos. 1. Piura.
- Granda, R. R. (2013, Agosto). Análisis numérico de la red de drenaje pluvial de la urb. Angamos. *Tesis de pregrado en Ingeniería Civil*. Piura, Perú: Universidad de Piura.
- HidroJING. (2013). Obtener curvas IDF. Retrieved from Obtenido de: <http://www.hidrojing.com/obtener-curvas-idf-parte/>
- Lancaster, J., Preene, M., & Marshall, C. (2004). Development and flood risk-guidance for the construction industry. Londres, Inglaterra: CIRIA, Classic House.
- Llamas Siendones, J. (1993). Hidrología general: Principios y aplicaciones. 635. Lejona, España: Universidad del País Vasco.
- Macías, L. (2014, Junio). Informe del diagnóstico estratégico de la ciudad de Chone a intervenir. Resultados e informes de los estudios básicos complementarios al diagnóstico. 170. Chone, Manabí, Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Chone.
- Macías, L. (2015). Estudios definitivos del Plan maestro hidrosanitario y pluvial para la ciudad de Chone, Cantón Chone, provincia Manabí. Portoviejo, Ecuador.

- Miliarium Aureum, S.L. (2011). Software de Hidrología e Hidráulica . Madrid, España: Miliarium. Ingeniería Civil y de Medio Ambiente.
- Múrcia-Balaguer, A. (2011). Estudio de la cuenca de La Riereta en Sant Boi de Llobregat mediante un modelo de drenaje dual utilizando SWMM 5. *Tesis de Maestría*. Barcelona, Cataluña, España.
- PHI-UNESCO_DT29. (2013). Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y BíoBio. Intensidades desde 15 min hasta 24 horas. Retrieved from http://eias.atalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/IDF_15_24_horas.pdf
- Plan Nacional del Buen Vivir. (2013-2017). República del Ecuador. Consejo Nacional de Planificación. Quito, Pichincha, Ecuador: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo-Senplades. Retrieved Agosto 5, 2016, from <http://www.buenvivir.gob.ec/versiones-plan-nacional>
- Publica, M. d. (2010). *eird.org*. Retrieved from <http://www.eird.org/estrategias/pdf/spa/doc12863/doc12863-10.pdf>
- Rincón, J. C., & Muñoz, M. F. (2013, Marzo). Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM. Venezuela: CIH. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIV, No 2, May-Ago 2013, p. 103-117.
- Rincón, J. C., & Muñoz, M. F. (2013, Mayo). Hydraulic design of dual drainage systems using the SWMM model. La Habana , Cuba: SCielo.
- Robredo. (s.f). Cálculo de caudales de avenida. 8. Retrieved from <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2014/04/CALCULO-DE-CAUDALES-DE-AVENIDA.pdf>
- Rodríguez, J. (2013, Septiembre). Nuevas tendencias en la gestión de drenaje pluvial en una cuenca urbana. Logroño, La Rioja, España: Universidad de la Rioja. Campus Iberus.
- Rodríguez-Anzola, M. L., & Rodríguez-Duarte, J. F. (2014, Diciembre). Modelación y evaluación hidráulica del alcantarillado del Municipio de Chocontá-

- Cundinamarca, mediante el uso del software EPA SWMM. *Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- Rossmann, L. (2005). *SWMM. Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 vE. Manual del Usuario*. (G. M. Fluidos, Trans.) Estados Unidos.
- Russo, B., Gómez, M., & Martínez, P. (2006). A simple hydrological approach to design inlet systems in urban areas according to risk criteria. Cataluña, España: The 7th International Conference on HydroScience and Engineering. Philadelphia, USA (ICHE 2006).
- Sahuquillo, A. (2002). Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. *Desarrollos científicos y nuevas tendencias en Hidrogeología*. Madrid, España: Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.
- Sanchez R, L. A. (2008, Junio). Introducción a la hidrología urbana.
- Sánchez, L. A. (2010). Nueva herramienta para análisis de sistemas de drenaje pluvial urbano. *XXXI(1)*, 15-16. Coro, Falcón, Venezuela: Centro de Investigación en Recursos Hídricos. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
- Sánchez, L. A. (2012, Julio). Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas. *Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas*. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Civil. Centro de Investigaciones Hidráulicas.
- Sánchez, L. A. (2012, Julio). Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas. *Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas*. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Civil. Centro de Investigaciones Hidráulicas.

- Sánchez, L. A., & Strippoli, V. (2009). *Modelo hidrológico - hidráulico para evaluar un sistema de drenaje urbano en zonas planas*. Coro, Falcón, Venezuela: Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
- SIAPA. (2014, Febrero). *Criterios y Lineamientos técnicos para factibilidades. Alcantarillado Sanitario*. Retrieved Abril 11, 2016, from http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_3._alcantarillado_sanitario.pdf
- USDA. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release TR-55. Second Edition, United States Department of Agriculture. Retrieved from https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Vélez, J. J., & Botero, A. (2011, Febrero). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Wei, X., Peng, L., Shang-bing, C., Li-li, G., Feng-lin, L., & Jian-e, Z. (2016, Febrero 10). *Layout effects and optimization of runoff storage and filtration facilities based on SWMM simulation in a demonstration area*. Beijing, China: Water Science and Engineering.
- Wilmoth, J. (2014). *Perspectivas Mundiales de Urbanización*. Organización de Naciones Unidas (ONU), Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, New York. Retrieved Diciembre 17, 2016, from <http://www.un.org/es/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>

ANEXOS

Anexo A1. Prueba paramétrica T de Student y tabla asociada.

Esta prueba se basa en la diferencia entre los valores medios muestrales, por lo que resulta muy robusta para detectar la no homogeneidad de un registro debido a un cambio brusco en la media.

Procedimiento:

1- Se divide la serie de tamaño N en dos subseries A y B, de longitudes semejantes donde N_A y N_B serán respectivamente el Número de datos de ambas subseries.

2- A cada serie se le calcula la media \bar{x} y su varianza V .

3- Se calcula el estadígrafo “T” de diferencias de medias:

$$T = \frac{|\bar{x}_A - \bar{x}_B|}{\left(\frac{N \cdot V_p}{N_A \cdot N_B}\right)^{1/2}}$$

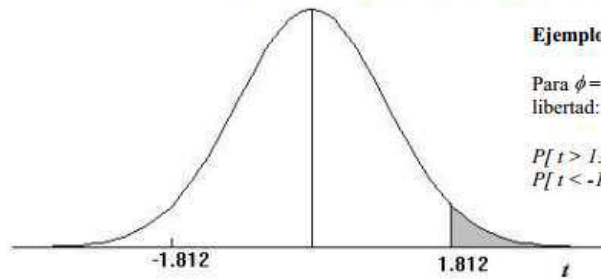
Donde el término V_p se calcula de la siguiente forma:

$$V_p = \frac{(N_A - 1)V_A + (N_B - 1)V_B}{(N_A + N_B) - 2}$$

4- Se estiman los grados de libertad γ por $\gamma = 2$.

5- Se busca el valor de “ $T_{critico}$ ” en la tabla T de student con un nivel de significación de 0.05 y con grado de libertad γ . Si $T \leq T_{critico}$ la serie es homogénea, caso contrario no sería homogénea.

Puntos de porcentaje de la distribución t



Ejemplo

Para $\phi = 10$ grados de libertad:

$$P[t > 1.812] = 0.05$$

$$P[t < -1.812] = 0.05$$

$\gamma \backslash \alpha$	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290

Anexo A2. Prueba y tabla de Smirnov – Kolmogorov.

El procedimiento básico para aplicar la prueba parte de ordenar en sentido decreciente los términos de la serie, calculando para cada uno de ellos un valor de probabilidad empírica de acuerdo con alguna de las ecuaciones que aparecen en la literatura para este efecto, ver (González et al., 2003).

Procedimiento:

1- Se ordena la serie decrecientemente.

2- Se calcula la probabilidad empírica para cada uno de los datos. En esta investigación se trabaja con la ecuación de Weibull que tiene la siguiente expresión:

$$\frac{m}{N+1}$$

Donde m significa el valor de la posición del elemento analizado en la serie ordenada de forma decreciente y N el tamaño de la serie

3- Se calcula la probabilidad teórica, por las fórmulas o procedimiento de cada una de las distribuciones.

4- Para cada término de la serie se calcula:

$$\Delta_{calculado} = |P_{empírica} - P_{teórica}|$$

5- Se selecciona el mayor $\Delta_{calculado}$

6- Para el nivel de significancia elegido se busca en la tabla de Kolmogorov el $\Delta_{K_Crítico}$.

7- Se comparan los valores de Δ . Si $\Delta_{calculado} \leq \Delta_{K_Crítico}$ se acepta la hipótesis de que el modelo probabilístico teórico es adecuado, de lo contrario se rechaza el ajuste.

Test de Kolmogorov-Smirnov

Nivel de significación α

n	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.90000	0.95000	0.97500	0.99000	0.99500	0.99750	0.99900	0.99950
2	0.68337	0.77639	0.84189	0.90000	0.92929	0.95000	0.96838	0.97764
3	0.56481	0.63604	0.70760	0.78456	0.82900	0.86428	0.90000	0.92065
4	0.49265	0.56522	0.62394	0.68887	0.73424	0.77639	0.82217	0.85047
5	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853	0.70543	0.75000	0.78137
6	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661	0.65287	0.69571	0.72479
7	0.38148	0.43607	0.48342	0.53844	0.57581	0.60975	0.65071	0.67930
8	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179	0.57429	0.61368	0.64098
9	0.33910	0.38746	0.43001	0.47960	0.51332	0.54443	0.58210	0.60846
10	0.32260	0.36866	0.40925	0.45562	0.48893	0.51872	0.55500	0.58042
11	0.30829	0.35242	0.39122	0.43670	0.46770	0.49539	0.53135	0.55588
12	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905	0.47672	0.51047	0.53422
13	0.28470	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247	0.45921	0.49189	0.51490
14	0.27481	0.31417	0.34890	0.38970	0.41762	0.44352	0.47520	0.49753
15	0.26589	0.30397	0.33750	0.37713	0.40420	0.42934	0.45611	0.48182
16	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201	0.41644	0.44637	0.46750
17	0.25039	0.28627	0.31796	0.35528	0.38086	0.40464	0.43380	0.45540
18	0.24360	0.27851	0.30936	0.34569	0.37062	0.39380	0.42224	0.44234
19	0.23735	0.27136	0.30143	0.33685	0.36117	0.38379	0.41156	0.43119
20	0.23156	0.26473	0.29408	0.32866	0.35241	0.37451	0.40165	0.42085
21	0.22517	0.25858	0.28724	0.32104	0.34426	0.36588	0.39243	0.41122
22	0.22115	0.25283	0.28087	0.31394	0.33666	0.35782	0.38382	0.40223
23	0.21646	0.24746	0.27491	0.30728	0.32954	0.35027	0.37575	0.39380
24	0.21205	0.24242	0.26931	0.30104	0.32286	0.34318	0.36787	0.38588
25	0.20790	0.23768	0.26404	0.29518	0.31657	0.33651	0.36104	0.37743
26	0.20399	0.23320	0.25908	0.28962	0.30963	0.33022	0.35431	0.37139
27	0.20030	0.22898	0.25438	0.28438	0.30502	0.32425	0.34794	0.36473
28	0.19680	0.22497	0.24993	0.27942	0.29971	0.31862	0.34190	0.35842
29	0.19348	0.22117	0.24571	0.27471	0.29466	0.31327	0.33617	0.35242
30	0.19032	0.21756	0.24170	0.27023	0.28986	0.30818	0.33072	0.34672
31	0.18732	0.21412	0.23788	0.26596	0.28529	0.30333	0.32553	0.34129
32	0.18445	0.21085	0.23424	0.26189	0.28094	0.29870	0.32058	0.33611
33	0.18171	0.20771	0.23076	0.25801	0.27577	0.29428	0.31584	0.33115
34	0.17909	0.21472	0.22743	0.25429	0.27271	0.29005	0.31131	0.32641
35	0.17659	0.20185	0.22425	0.25073	0.26897	0.28600	0.30597	0.32187
36	0.17418	0.19910	0.22119	0.24732	0.26532	0.28211	0.30281	0.31751
37	0.17188	0.19646	0.21826	0.24404	0.26180	0.27838	0.29882	0.31333
38	0.16966	0.19392	0.21544	0.24089	0.25843	0.27483	0.29498	0.30931
39	0.16753	0.19148	0.21273	0.23785	0.25518	0.27135	0.29125	0.30544
40	0.16547	0.18913	0.21012	0.23494	0.25205	0.26803	0.28772	0.30171

41	0.16349	0.18687	0.20760	0.23213	0.24904	0.26482	0.28429	0.29811
42	0.16158	0.18468	0.20517	0.22941	0.24613	0.26173	0.28097	0.29465
43	0.15974	0.18257	0.20283	0.22679	0.24332	0.25875	0.27778	0.29130
44	0.15795	0.18051	0.20056	0.22426	0.24060	0.25587	0.27468	0.28806
45	0.15623	0.17856	0.19837	0.22181	0.23798	0.25308	0.27169	0.28493
46	0.15457	0.17665	0.19625	0.21944	0.23544	0.25038	0.26880	0.28190
47	0.15295	0.17481	0.19420	0.21715	0.23298	0.24776	0.26600	0.27896
48	0.15139	0.17301	0.19221	0.21493	0.23059	0.24523	0.26328	0.27611
49	0.14987	0.17128	0.19028	0.21281	0.22832	0.24281	0.26069	0.27339
50	0.14840	0.16959	0.18841	0.21068	0.22604	0.24039	0.25809	0.27067
n>50	$\frac{1.07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.52}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.73}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.85}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.95}{\sqrt{n}}$

Anexo A3. Secciones transversales de conductos, disponibles en SWMM.

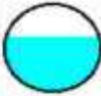
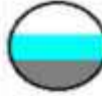
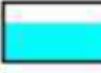

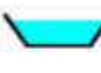







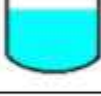
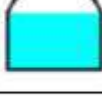







Nombre	Parámetros	Forma	Nombre	Parámetros	Forma
Circular	Profundidad		Circular Relleno	Profundidad, profundidad del relleno	
Rectangular Cerrado	Profundidad, ancho		Rectangular Abierto	Profundidad, ancho	
Trapezoidal	Profundidad, ancho en la parte superior, pendiente lateral		Triangular	Profundidad, ancho en la parte superior	
Elipse Horizontal	Profundidad		Elipse Vertical	Profundidad	
Arco	Profundidad		Parabólica	Profundidad, ancho en la parte superior	
Potencial	Profundidad, Ancho en la parte superior, exponente		Rectangular - Triangular	Profundidad, ancho	
Rectangular Redondeada	Profundidad, ancho		Cesta de mano modificada	Profundidad, ancho	
Huevo	Profundidad		Huella de caballo	Profundidad	
Gótico	Profundidad		Catenaria	Profundidad	
Semiéptica	Profundidad		Cesta de mano	Profundidad	
Semicircular	Profundidad				

Figura A3.1. Secciones transversales de conductos, disponibles en SWMM

Fuente: (GMMF, 2005)

Anexo A4. Tabla para determinar el número de la curva de subcuencas o áreas de drenaje urbanas.

Tabla A4.1. Número de la curva para determinar el escurrimiento superficial de cuencas urbanas.

Runoff curve numbers for urban areas ^{1/}					
Cover description Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area ^{2/}	Curve numbers for hydrologic soil group			
		A	B	C	D
<i>Fully developed urban areas (vegetation established)</i>					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) ^{3/} :					
Poor condition (grass cover < 50%).....		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%).....		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%).....		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way).....		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way).....		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way).....		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way).....		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way).....		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) ^{4/}		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders).....		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business.....	85	89	92	94	95
Industrial.....	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses).....	65	77	85	90	92
1/4 acre.....	38	61	75	83	87
1/3 acre.....	30	57	72	81	86
1/2 acre.....	25	54	70	80	85
1 acre.....	20	51	68	79	84
2 acres.....	12	46	65	77	82
<i>Developing urban areas</i>					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation) ^{4/}		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c).					

Fuente: (USDA, 1986)

Anexo A5. Ecuaciones de momentum de la conservación de la masa que se utiliza en SWMM.

Tabla A5.1. Ecuaciones de momentum

Conservation Form	$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g (S_o - S_f) = 0$	
Noconservation Form	$-g (S_o - S_f) = 0$	Onda cinemática <i>(Kinematic Wave)</i>
	$g \frac{\partial y}{\partial x} - g (S_o - S_f) = 0$	Onda difusiva <i>(Diffusion Wave)</i>
	$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g (S_o - S_f) = 0$	Onda dinámica <i>(Dynamic Wave)</i>

Fuente: (Sanchez R, 2008)

Anexo A6. Curvas IFD de la estación climatológica M0162 en forma de tabla.

Tabla A6.1. Curvas IFD de la estación climatológica M0162

Tiempo (min)	Tiempo (hrs)	Intensidad de precipitación máxima Pd (mm/hr)						
		2	5	10	25	50	100	500
5	0.083	132.798	175.978	204.566	240.687	267.475	294.084	355.558
10	0.167	86.624	114.790	133.438	156.999	174.473	191.830	231.929
15	0.250	67.467	89.405	103.929	122.280	135.889	149.408	180.639
20	0.333	56.504	74.877	87.041	102.410	113.808	125.130	151.287
25	0.417	49.243	65.255	75.856	89.250	99.183	109.050	131.845
30	0.500	44.009	58.319	67.793	79.763	88.640	97.458	117.830
35	0.583	40.019	53.032	61.648	72.533	80.605	88.624	107.150
40	0.667	36.857	48.842	56.777	66.802	74.237	81.622	98.684
45	0.750	34.276	45.422	52.801	62.124	69.038	75.906	91.773
50	0.833	32.121	42.566	49.480	58.217	64.697	71.133	86.002
55	0.917	30.289	40.137	46.657	54.896	61.005	67.074	81.095
60	1.000	28.707	38.041	44.221	52.029	57.820	63.572	76.860
65	1.083	27.325	36.209	42.092	49.524	55.036	60.511	73.160
70	1.167	26.105	34.593	40.212	47.313	52.579	57.809	69.893
75	1.250	25.018	33.153	38.538	45.343	50.390	55.402	66.983
80	1.333	24.042	31.859	37.035	43.575	48.424	53.242	64.371
85	1.417	23.160	30.691	35.677	41.976	46.648	51.289	62.010
90	1.500	22.359	29.628	34.442	40.523	45.033	49.513	59.863
95	1.583	21.626	28.657	33.313	39.195	43.557	47.890	57.901
100	1.667	20.953	27.766	32.276	37.975	42.202	46.400	56.099
105	1.750	20.332	26.943	31.319	36.850	40.951	45.025	54.437
110	1.833	19.757	26.181	30.434	35.808	39.794	43.752	52.898
115	1.917	19.223	25.474	29.612	34.840	38.718	42.570	51.468
120	2.000	18.725	24.814	28.845	33.938	37.716	41.468	50.136
125	2.083	18.260	24.197	28.128	33.095	36.778	40.437	48.890
130	2.167	17.824	23.619	27.456	32.305	35.900	39.471	47.722
135	2.250	17.414	23.076	26.825	31.562	35.074	38.564	46.625
140	2.333	17.028	22.565	26.230	30.862	34.297	37.709	45.591
145	2.417	16.664	22.082	25.669	30.202	33.563	36.902	44.616
150	2.500	16.319	21.625	25.138	29.577	32.869	36.139	43.693
155	2.583	15.993	21.193	24.635	28.985	32.211	35.416	42.819
160	2.667	15.683	20.782	24.157	28.424	31.587	34.729	41.989
165	2.750	15.388	20.391	23.704	27.890	30.994	34.077	41.200
170	2.833	15.107	20.019	23.272	27.381	30.428	33.456	40.449
175	2.917	14.839	19.665	22.859	26.896	29.890	32.863	39.733
180	3	14.584	19.327	22.466	26.433	29.375	32.297	39.049
240	4	12.214	16.186	18.816	22.138	24.602	27.049	32.703
300	5	10.645	14.106	16.398	19.293	21.440	23.573	28.501
360	6	9.5133	12.607	14.655	17.242	19.161	21.067	25.471
480	8	7.9675	10.558	12.273	14.440	16.048	17.644	21.332
720	12	6.2055	8.2233	9.559	11.247	12.499	13.742	16.615
1080	18	4.8332	6.4048	7.445	8.760	9.735	10.703	12.941
1440	24	4.0478	5.3640	6.235	7.336	8.153	8.964	10.838

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

Anexo A7. Hietogramas de trabajo

En las dos primeras columnas de las siguientes tablas aparecen el tiempo en minutos y la intensidad de la lluvia en mm/h, la tercera columna se calcula convirtiendo el tiempo en la columna 1 a horas y multiplicándolo por los valores de la columna 2. El primer valor de la columna 4 coincide con su homólogo de la columna 3 y en lo adelante se resta el valor de columna 3 y la fila actual con el anterior. En la columna 5 se ubican los intervalos de tiempo, en este caso 5 minutos, El primer valor de la última columna coincide con el penúltimo de la columna 5, en lo adelante se recorre la columna 5 hacia arriba y con valores alternos hasta llegar al inicio, seguidamente se van tomando los valores no elegidos, esta vez hacia abajo.

Tabla A7.1. Hietograma de evento de una hora de duración y período de retorno T=10 años

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Pacum (mm)	ΔP (mm)	Intervalos (min)	ΔP (mm)
5	204.566	17.047	17.047	0-5	1.535
10	133.438	22.240	5.192	5-10	1.749
15	103.929	25.982	3.743	10-15	2.065
20	87.041	29.014	3.031	15-20	2.593
25	75.856	31.607	2.593	20-25	3.743
30	67.793	33.896	2.290	25-30	17.047
35	61.648	35.961	2.065	30-35	5.192
40	56.777	37.851	1.890	35-40	3.031
45	52.801	39.600	1.749	40-45	2.290
50	49.481	41.234	1.633	45-50	1.890
55	46.657	42.769	1.535	50-55	1.633
60	44.221	44.221	1.452	55-60	1.452

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

Tabla A7.2. Hietograma de evento de una hora de duración y período de retorno T=25 años

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Pacum (mm)	ΔP (mm)	Intervalos (min)	ΔP (mm)
5	240.687	20.057	20.057	0-5	1.807
10	156.999	26.167	6.109	5-10	2.058
15	122.280	30.570	4.403	10-15	2.429
20	102.410	34.137	3.567	15-20	3.051
25	89.250	37.187	3.051	20-25	4.403
30	79.763	39.881	2.694	25-30	20.057
35	72.533	42.311	2.429	30-35	6.109
40	66.802	44.535	2.224	35-40	3.567
45	62.124	46.593	2.058	40-45	2.694
50	58.217	48.515	1.922	45-50	2.224
55	54.896	50.321	1.807	50-55	1.922
60	52.029	52.029	1.708	55-60	1.708

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

Tabla A7.3. Hietograma de evento de una hora de duración y período de retorno T=100 años

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Pacum (mm)	ΔP (mm)	Intervalos (min)	ΔP (mm)
5	294.084	24.507	24.507	0-5	2.207
10	191.830	31.972	7.465	5-10	2.515
15	149.408	37.352	5.380	10-15	2.968
20	125.130	41.710	4.358	15-20	3.728
25	109.050	45.438	3.728	20-25	5.380
30	97.458	48.729	3.292	25-30	24.507
35	88.624	51.698	2.968	30-35	7.465
40	81.622	54.415	2.717	35-40	4.358
45	75.906	56.930	2.515	40-45	3.292
50	71.133	59.278	2.348	45-50	2.717
55	67.074	61.485	2.207	50-55	2.348
60	63.572	63.572	2.087	55-60	2.087

Fuente: (Cabrera, y otros, 2016)

Anexo A8. Distribución de tuberías con sus diámetros en el proyecto de la red de drenaje pluvial futura de la ciudad de Chone

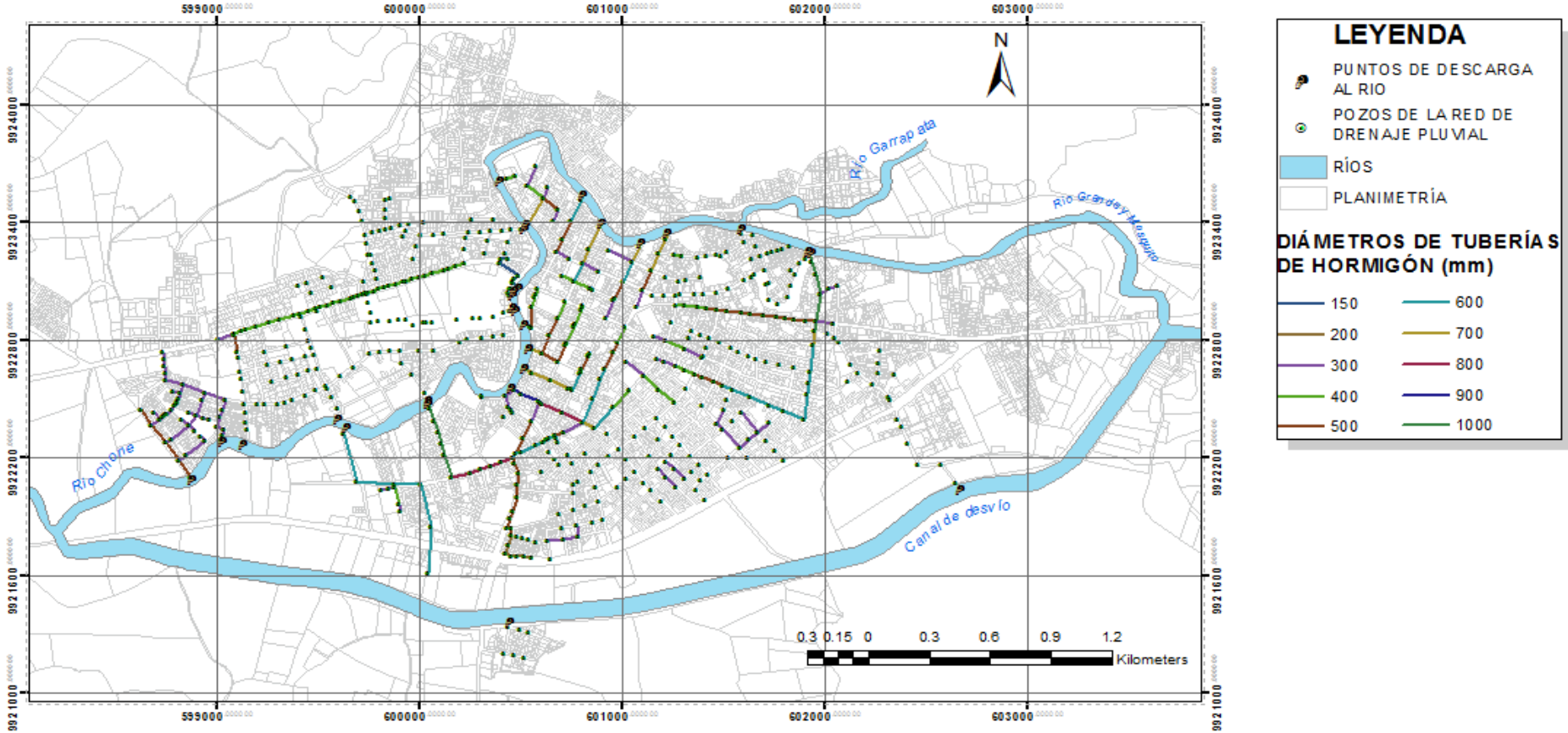


Figura A8.1. Distribución de tuberías de hormigón con sus diámetros en la red de drenaje pluvial actual de la ciudad de Chone.
 Fuente: Elaboración propia

Anexo A8. Distribución de tuberías con sus diámetros en el proyecto de la red de drenaje pluvial futura de la ciudad de Chone

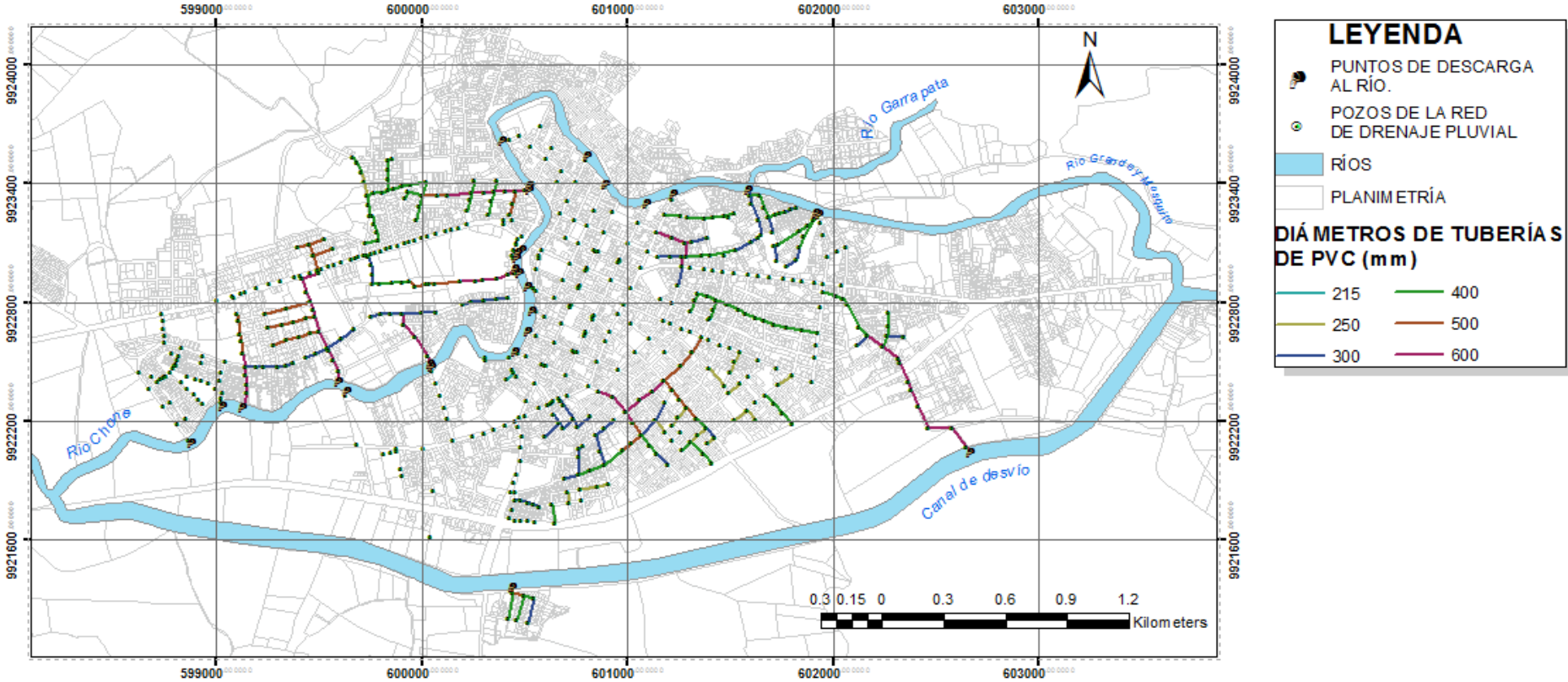


Figura A8.2. Distribución de tuberías de PVC con sus diámetros en la red de drenaje pluvial actual de la ciudad de Chone.
Fuente: Elaboración propia

Anexo A9. Subcuencas que definen la red de drenaje pluvial de la ciudad de Chone

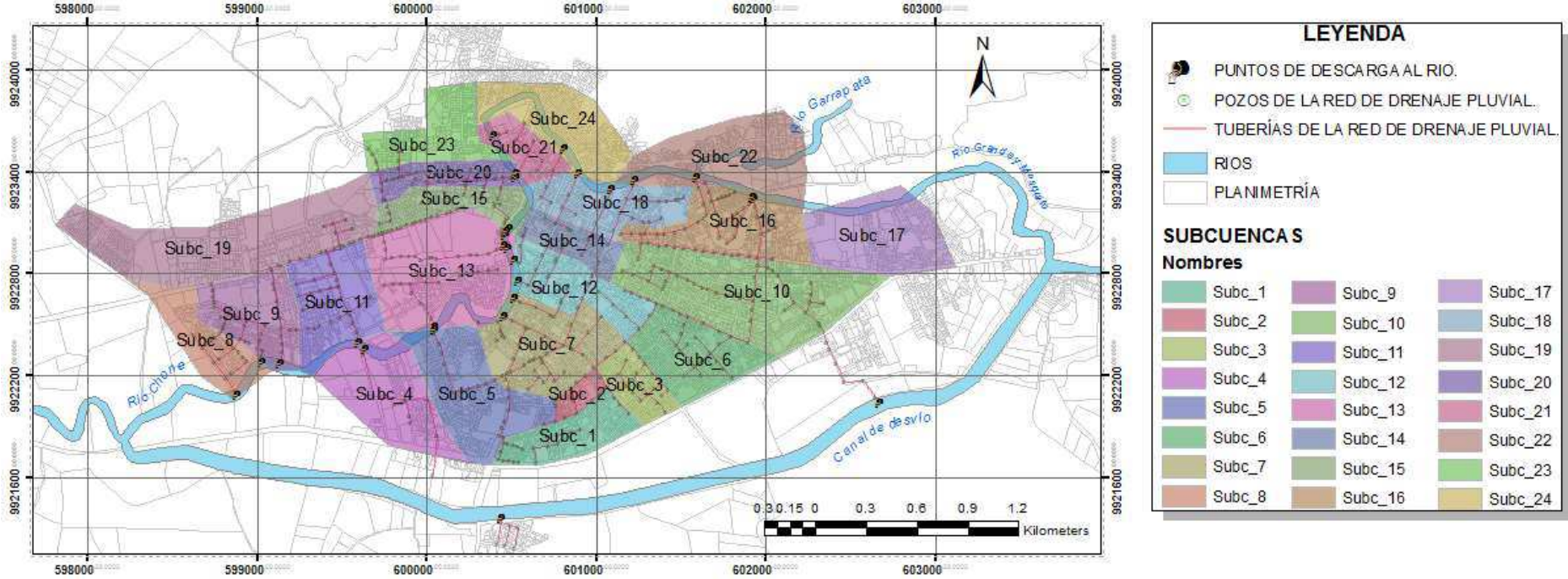


Figura A9.1. Subcuencas que definen la red de drenaje pluvial de Chone.
 Fuente: (Cabrera, et al., 2016)

Anexo A9. Subcuencas o áreas de drenaje que aportan escurrimiento a los pozos.

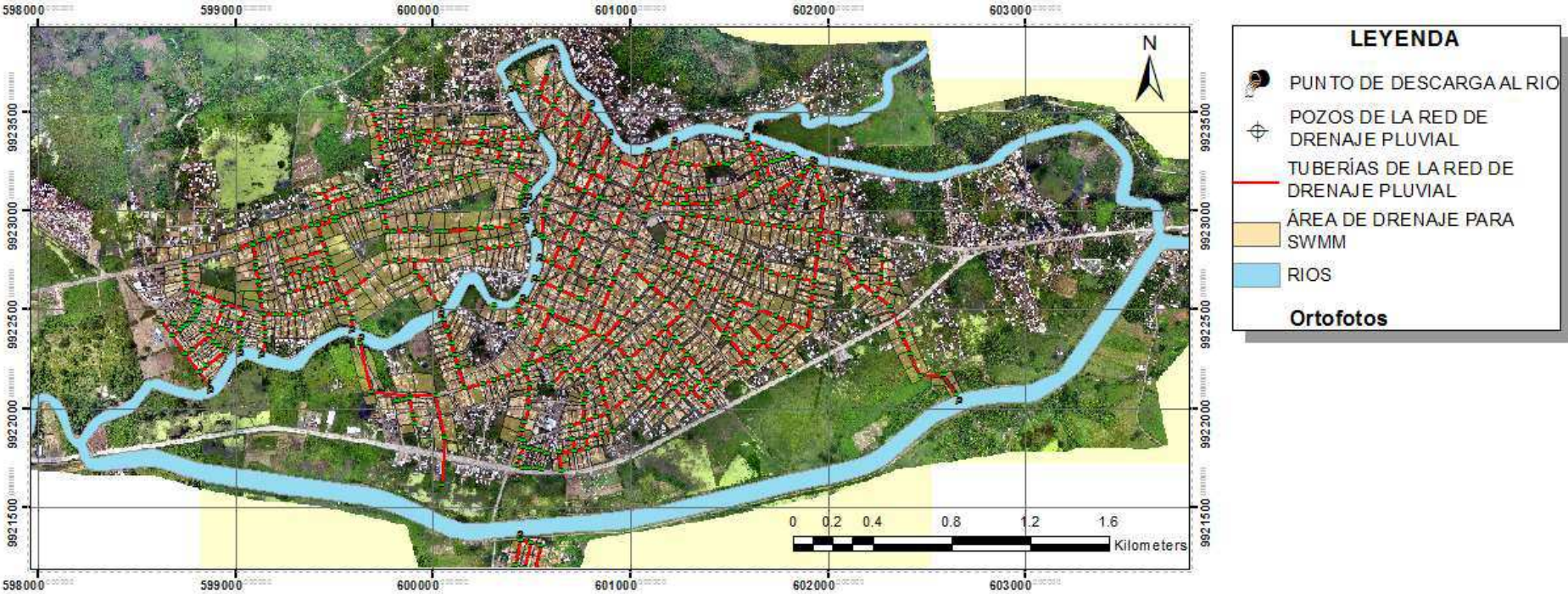


Figura A9.1. Subcuencas o área de drenaje que aportan escurrimiento a los pozos. Información para el modelo SWMM.
Fuente: Elaboración propia

Anexo A10. Mapa de valores de rangos de CN para cada área de drenaje.

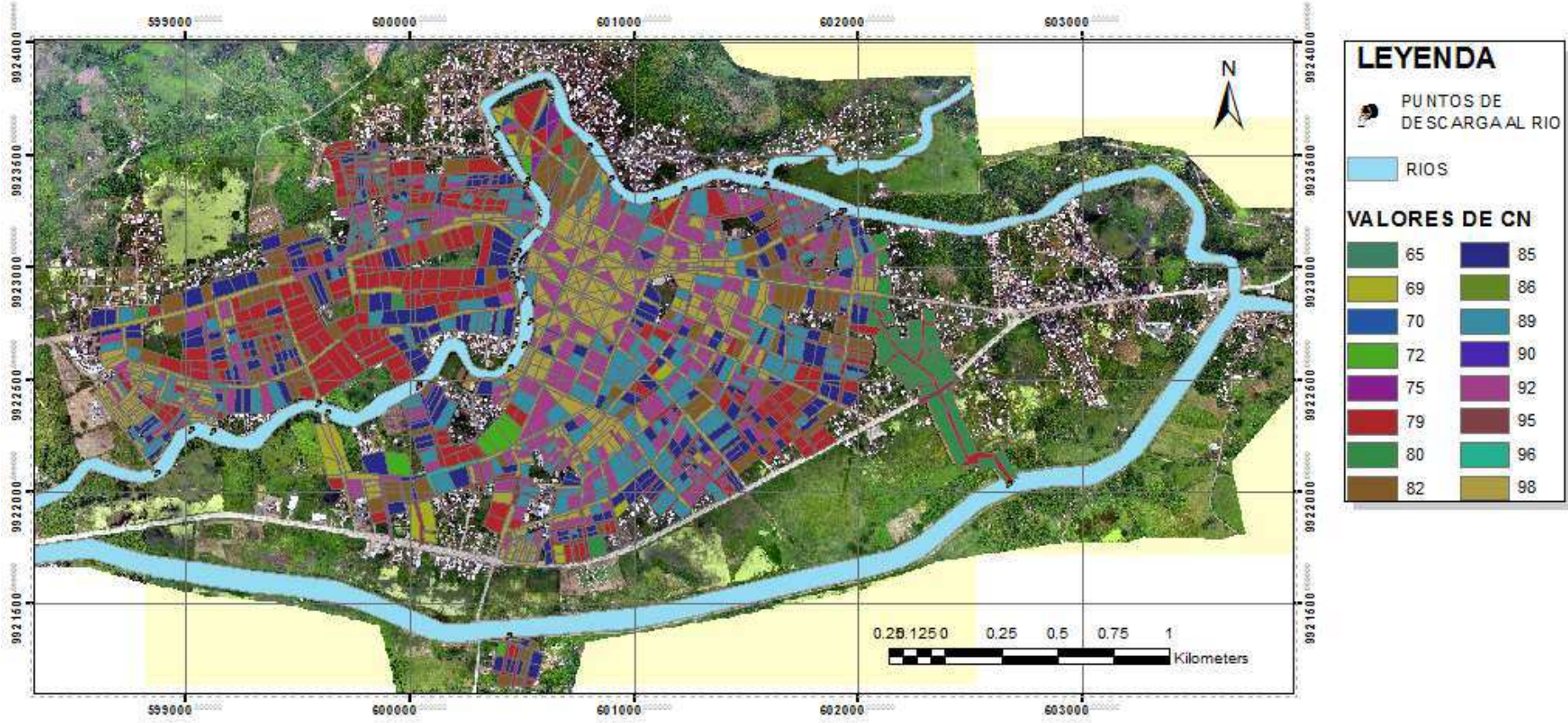


Figura A10.1. Mapa de valores de rangos de CN para cada área de drenaje.
Fuente: Elaboración propia

Anexo A11. Procedimiento para cargar en el programa Autodesk Storm and Sanitary Analysis ASSA, la información necesaria de la red para el modelo en SWMM, proveniente de ArcGIS.

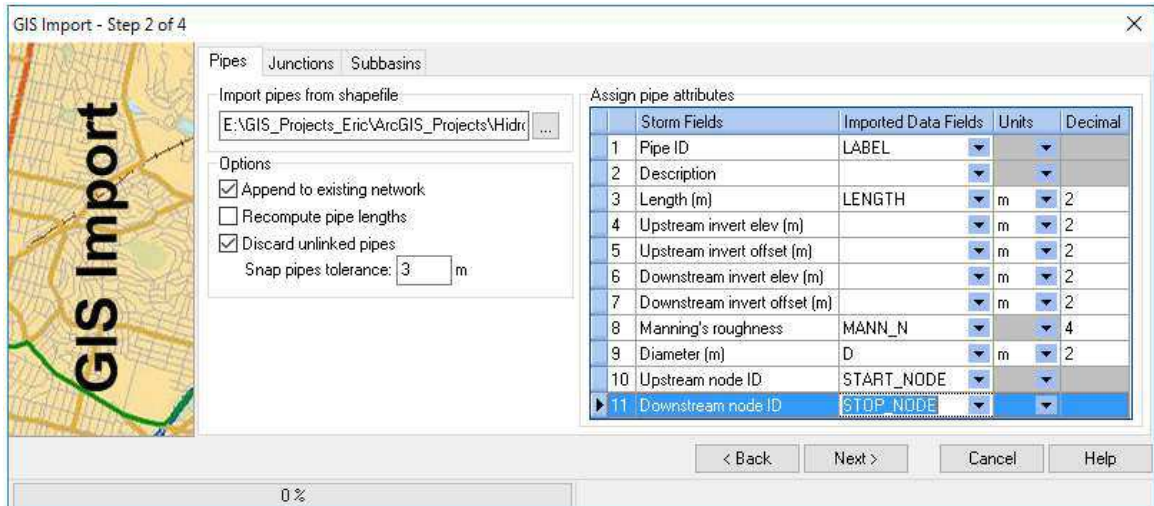


Figura A11.1. Ventana para la entrada de las tuberías al programa ASSA provenientes de ArcGIS.

Fuente: Elaboración propia

En este caso es importante plantear que debe existir una relación topológica coherente entre las tres informaciones básicas (tuberías, pozos y subcuencas), por ejemplo: obsérvese que para cada tubería se debe conocer cuáles son sus nodos (pozos) que la limitan, e incluso la dirección del flujo, ya que se definen los parámetros *Upstream node ID* y *Downstream node ID*.

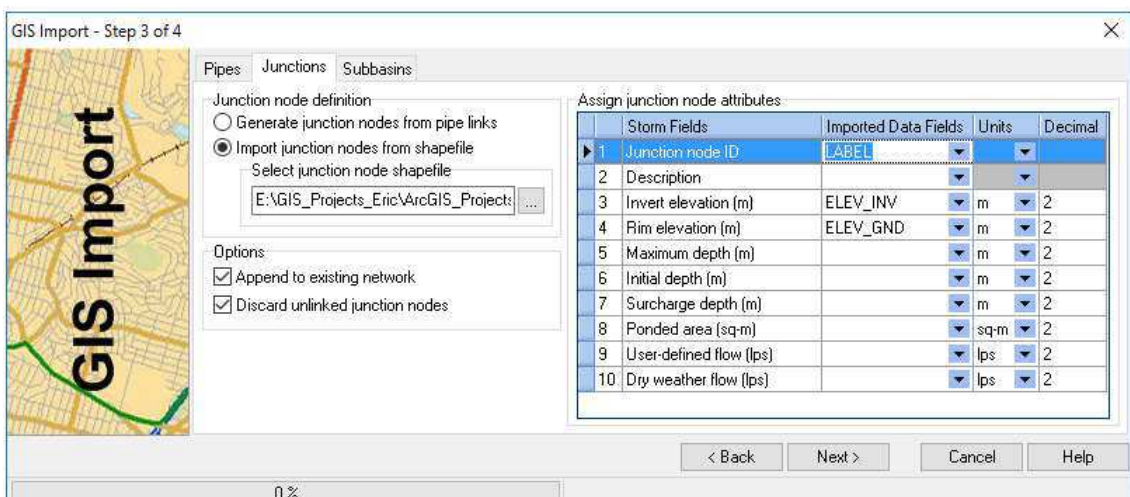


Figura A11.2. Ventana para la entrada de los pozos al programa ASSA provenientes de ArcGIS.

Fuente: Elaboración propia

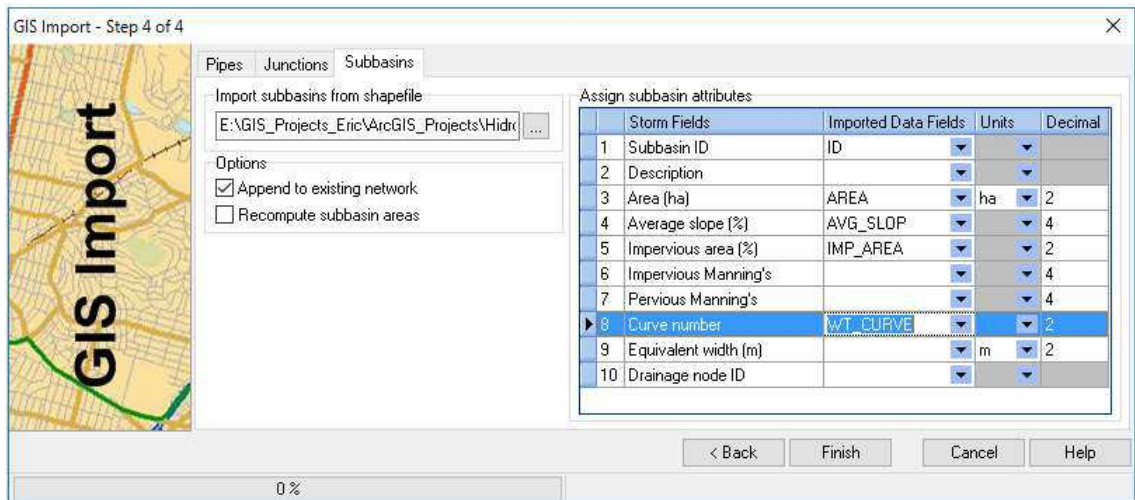


Figura A11.2. Ventana para la entrada de los pozos al programa ASSA provenientes de ArcGIS.

Fuente: Elaboración propia

Anexo A12. Imagen de pozo pluvial vertiendo agua hacia la calle.



Figura A12.1. Pozo pluvial vertiendo agua hacia la calle, debido a un mal funcionamiento del sistema o una tormenta muy superior a la usada para el diseño.

Fuente: Elaboración propia