

**MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE DRENAJE URBANO. APLICACIÓN SECTOR
NORORIENTAL DISTRITO SANTA INÉS TUNJA-BOYACÁ**

WILSON ENRIQUE AMAYA TEQUIA
Ingeniero Sanitario

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN HIDROAMBIENTAL
TUNJA
2019

**MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE DRENAJE URBANO. APLICACIÓN SECTOR
NORORIENTAL DISTRITO SANTA INÉS TUNJA-BOYACÁ**

WILSON ENRIQUE AMAYA TEQUIA

**SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN:
MANEJO SOSTENIBLE DE RECURSOS HIDROAMBIENTALES
MSRHA**

DIRECTOR: MELQUISEDEC CORTÉS ZAMBRANO
PhD (c) Ingeniería y Ciencia de los Materiales
Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Hidroinformática
Ingeniero Civil

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 01 de marzo del 2019

Dedicatoria

Alcanzar esta meta en mi vida ha sido un enorme reto que hoy he logrado, Padre celestial te agradezco por permitirme vivir cada día, por ser mi guía y protector, por ayudarme a cumplir un sueño más...

Agradecimientos

A mi padre, madre y hermana por ser un apoyo incondicional, a mi sobrina, Gabrielita, por ser el motor y la luz de mi vida, a mi novia, quien me impulsó a iniciar este proceso y me ha acompañado pese a las adversidades. A la universidad Santo Tomás por recibirme con los brazos abiertos y aportar en mi formación académica y profesional. Al ingeniero Melquisedec Cortés, por su asesoría, respaldo y esfuerzo en el desarrollo del estudio. A la empresa Veolia Aguas de Tunja, por su gran colaboración y acompañamiento durante el proceso investigativo.

CONTENIDO

RESUMEN	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE LA URBANIZACION	18
4. DESCRIPCION DE LA CUENCA.....	22
4.1 Descripción Zona de Estudio.....	22
4.1.1 Descripción local	23
4.2 Sector Nororiental.....	32
4.3 Delimitación Zona de Estudio	33
4.4 Base Catastral Red de Drenaje Distrito Santa Inés.....	35
4.4.1 Validación base catastral	35
4.4.2 Topología red de drenaje distrito Santa Inés	36
5. EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS	44
5.1 Medida de Precipitación	45
5.2 Medida de Caudal.....	46
5.2.1 Medida de velocidad por tecnología radar	47
5.2.2 Medida de nivel o calado.....	48
5.2.3 Medida de inundación	48
6. PRECIPITACIONES Y CAUDALES OBTENIDOS.....	50
6.1 Datos de Precipitación	50
6.2 Datos de Caudales	51
6.3 Evento de lluvia del 13-septiembre-2018.....	52
7. ANÁLISIS DE CALIDAD DE INFORMACION PLUVIOMETRICA	53
7.1 Graficas de Masa Simple	54
7.2 Graficas de Doble Masa	54
7.3 Graficas de Masa Residual	55
7.4 Graficas de Caja.....	56
7.5 Gráficas S-S.....	56
7.6 Análisis Aplicado	57
8. ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO	60
8.1 Modelación de Sistemas de Alcantarillado	62
8.2 Modelo Lluvia-Escorrentía.....	65
8.3 Parametrización SWMM	66

8.3.1	Área y pendiente subcuenca	67
8.3.2	Ancho de subcuenca	67
8.3.3	Porcentaje de impermeabilidad	69
8.3.4	Numero de curva	70
8.3.5	Área conectada directamente (%) zero-imperm	72
8.3.6	Pérdidas por evaporación.....	73
8.4	Criterios Estadísticos de Evaluación	74
8.4.1	Error relativo RE	74
8.4.2	Error medio cuadrático RMSE	75
8.4.3	Coeficiente de variación (S)	76
8.5	Calibración de Modelo SWMM	76
8.5.1	Selección eventos de calibración.....	77
8.5.2	Selección de parámetros de calibración.....	78
8.5.3	Resultados de calibración	79
8.6	Validación de Modelo SWMM	81
8.7	Chequeo Hidráulico Modelo SWMM	84
9.	DIAGNOSTICO HIDRÁULICO Y ALTERNATIVAS DE SOLUCION	86
9.1	Transposición de Cuencas	86
9.2	Marco Técnico Normativo.....	87
9.2.1	Periodo de retorno	88
9.2.1	Velocidad máxima en tuberías y capacidad hidráulica.	89
9.3	Hietograma de Diseño	89
9.3.1	Curvas intensidad-duración- frecuencia	89
9.3.1	Bloque alterno.....	90
9.4	Resultados Diagnostico Hidráulico	92
9.5	Planteamiento de Alternativas	98
9.5.1	Alternativa 1	99
9.5.1	Alternativa 2	101
9.6	Selección de Alternativas	103
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
	REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS	111
	ANEXOS	118

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Respuestas hidrológicas a los cambios en las características físicas debido a la urbanización.....	20
Tabla 2. Eventos de lluvia, volumen precipitado y periodo de retorno asociado.	51
Tabla 3. Precipitaciones y caudales obtenidos.	51
Tabla 4. Valores de CN de escorrentía para áreas urbanas, cubiertas de suelos en condiciones de humedad previa $I_a=0.2S$	71
Tabla 5. Parámetros determinados para cada subcuenca analizada.....	73
Tabla 6. Evaporación media total mensual multianual de la estación climatológica UPTC	73
Tabla 7. Eventos seleccionados para calibración	78
Tabla 8. Parámetros de ajuste, calibración de modelo hidrodinámico.	79
Tabla 9. Resultados de calibración, tiempo pico, caudal pico y volumen total.....	80
Tabla 10. Eventos seleccionados para validación.	82
Tabla 11. Resultados de validación, tiempo pico, caudal pico y volumen total.....	82
Tabla 12. Periodos de retorno.....	88
Tabla 13. Hietograma de precipitación, incremento de 5 minutos método de bloque alterno	91
Tabla 14. Cantidades longitud tramos de tuberías alcantarillado y pozos de inspección alternativa 1.	100
Tabla 15. Cantidades longitud tramos de tuberías alcantarillado y pozos de inspección alternativa 2.	102
Tabla 16. Costos directos alternativas N° 1 y 2.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hidrogramas de unidades hipotéticas relación lluvia-escorrentía, con definiciones de parámetros significativos. Adaptado de (Leopold, 1968).	20
Figura 2. Localización General-Ciudad de Tunja-Sector Nororiental. (POT Tunja 2014. Autor).	23
Figura 3. Geología Local (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja. 2014).	26
Figura 4. Susceptibilidad Sísmica (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja. 2014).	27
Figura 5. Diagnóstico Uso de Suelo Urbano (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja. 2014).	30
Figura 6. Susceptibilidad a Inundación Fuente: (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja.2014).	31
Figura 7. Distritos de Drenaje Sector Nororiental- Santa Inés (A), Altagracia (B), La Villita (C) y Casa Verde (D) (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor).	33
Figura 8. Distrito Barrio Santa Inés Zona 1 y 2. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor).	34
Figura 9. Verificación catastro red de alcantarillado distrito Santa Inés (Autor).	36
Figura 10. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 1 y 2. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor.)	37
Figura 11. Porcentaje materiales tuberías Alcantarillado combinado existente. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor.)	38
Figura 12. Porcentaje diámetros tuberías Alcantarillado combinado existente. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor.)	39
Figura 13. Tuberías Alcantarillado combinado existente. (Autor.)	39

Figura 14. Pozos de inspección Alcantarillado combinado existente. (Autor.)	40
Figura 15. Sumideros Alcantarillado combinado existente. (Autor).	41
Figura 16. Descarga Zona 1. Alcantarillado combinado existente. (Autor).	42
Figura 17. Descarga Zona 2. Alcantarillado combinado existente. (Autor).	43
Figura 18. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 1 y 2. (Autor.)	45
Figura 19. Pluviómetro de Balancín modelo- RainLog 2.0 con datalogger - RainLogge Marca: Rainwise. (Autor).	46
Figura 20. Alineación vertical del sensor Flo-Dar, señal de radar, medición de velocidad. Adaptado de (HACH, 2010)	47
Figura 21. Instalación del sensor Flo Dar - FL900 Series Flow Logger marca Hach. (Autor).	49
Figura 22. Hietograma e hidrograma evento de lluvia 13 de septiembre de 2018.	52
Figura 23. Grafica de masa simple. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).	58
Figura 24. Grafica de doble masa. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).	58
Figura 25. Grafica de masa residual. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).	59
Figura 26. Grafica de caja. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).	59
Figura 27. Grafica S-S. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).	59
Figura 28. Visión Conceptual del fenómeno de la escorrentía en SWMM. Adaptado de: (Environmental Protection Agency (EPA), 2015).	66
Figura 29. Ancho de cuenca, a) esquema en un plano, b) planos simétricos, c) planos asimétricos. Adaptado de: (Universidad Nacional del Litoral-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, 2015)	69
Figura 30. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 1.subcuencas y área permeable (Autor.)	70

Figura 31. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 16-jul-2018.	80
Figura 32. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 24-jul-2018.	81
Figura 33. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 29-30-jul-2018.	81
Figura 34. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 15-oct-2018.....	83
Figura 35. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 29-30-oct-2018.	83
Figura 36. Perfil hidráulico general minuto 35-50, condicion tuberías en carga. Chequeo hidráulico modelo Santa Inés Zona 1. SWMM 5.0.	84
Figura 37. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 2, subcuencas y área permeable (Autor.).....	87
Figura 38. Curvas intensidad-duración- frecuencia disponibles Ideam, Estación climatológica principal UPTC. (Autor).	90
Figura 39. Hietograma de diseño bloque alterno periodo de retorno 10 años. Estación climatológica principal UPTC. (Autor).	92
Figura 40. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 35. Pozos rebosados SWMM. (Autor).	93
Figura 41. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 40. Pozos rebosados SWMM. (Autor).	93
Figura 42. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 35. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).	94
Figura 43. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 40. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).	95
Figura 44. Perfil hidráulico general Distrito Santa Inés Zona1. SWMM.	95
Figura 45. Perfil hidráulico general Distrito Santa Inés Zona 2. SWMM.	96

Figura 46. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 35. Velocidad en tuberías SWMM. (Autor).	96
Figura 47. Distrito Santa Inés zona 1 y 2, diámetro colectores rehabilitados y proyectados alternativa 1. AutoCAD 2017(Autor).	101
Figura 48. Distrito Santa Inés zona 1 y 2, diámetro colectores rehabilitados y proyectados alternativa 2. AutoCAD 2017(Autor).	103
Figura 49. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minutos 35-40. Pozos rebosados SWMM. (Autor).	105
Figura 50. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minuto 35. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).	105
Figura 51. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minuto 40. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).	106
Figura 52. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minuto 35. Velocidad en tuberías SWMM. (Autor).	106

RESUMEN

En las ciudades se denota un crecimiento exponencial de las superficies impermeables, lo que ha generado un aumento importante de escorrentía en cuencas urbanas. Históricamente en la ciudad de Tunja se ha presentado un fenómeno de ocupación de los cauces naturales de aguas lluvias, alterando la hidrología de las cuencas naturales, afectando directamente la capacidad de drenaje de las mismas. En la actualidad la ciudad presenta un considerable y acelerado desarrollo urbano hacia la zona Nororiental, presentándose reboses en el sistema de drenaje e inundaciones, afectando a la ciudadanía.

Actualmente los modelos hidrodinámicos de los diferentes sectores de la red de alcantarillado, no han sido calibrados y validados con eventos de precipitación reales históricos. Además, el sistema carece de la instrumentación adecuada para obtener registros de caudales generados a la salida de los diferentes sectores urbanos. En este estudio se realizó la instrumentación del sector de alcantarillado Nororiental distrito Santa Inés en la ciudad de Tunja, con equipos de medición de precipitación y caudales generados, la cuenca se desagregó a una escala de detalle, obteniendo 56 subcuencas de drenaje, para las cuales se calculó parámetros como; pendiente, ancho de cuenca acorde a condiciones físicas y de drenaje, porcentaje de impermeabilidad, numero de curva, área conectada directamente (%) zero-imperm.

Esta investigación se basó en los hidrogramas de alcantarillado reales medidos en la descarga principal de la cuenca urbana, se calibro parámetros asociados a las pérdidas iniciales hidrológicas y coeficientes de rugosidad, Se construyó un modelo calibrado y validado de drenaje urbano a través del software SWMM 5.1, obteniendo la modelización hidrodinámica temporal del sistema bajo eventos de precipitaciones reales y caudales significativos de escorrentía generada.

El modelo reproduce de manera adecuada la evolución real del sistema y se empleó para realizar predicciones bajo un evento de precipitación máxima de diseño. Determinando 2 zonas vulnerables a inundación, definiendo alternativas de solución enfocadas al aumento de capacidad hidráulica de colectores existentes y proyectar redes paralelas que contribuyan a liberar la carga hidráulica que sufre el sistema de drenaje bajo un escenario de tormenta.

1. INTRODUCCIÓN

Las superficies impermeables en general se definen como aquellas que limitan la infiltración de las aguas de escorrentía superficial hacia suelos subyacentes (Gibbons & Chester, 1996). En las ciudades o zonas urbanas se denota un crecimiento exponencial de las superficies impermeables, el cual está directamente relacionado con las actividades humanas y la construcción de viviendas, edificaciones, estacionamientos, carreteras y otras estructuras que disminuyen la capacidad de infiltración de los suelos. El proceso de desarrollo urbanístico conduce a la alteración de los paisajes naturales y la sustitución de las superficies cubiertas de vegetación con áreas impermeables (Lei, Wei, & Liding, 2016). Como consecuencia de esto, se genera una reducción substancial de la capacidad de infiltración de agua del suelo natural, produciendo un aumento importante de escorrentía en cuencas urbanas (Mejía & Moglen, 2010).

De manera general, se puede ver cómo el proceso de urbanización afecta masivamente el ciclo del agua de diferentes maneras. Se efectúa no sólo el aumento del volumen de escorrentía y de la velocidad del flujo, sino también el incremento de la acumulación de partículas contaminantes en las superficies, que luego vendrán transportadas por efecto del arrastre y circulación del agua de escorrentía. El lavado de las superficies está directamente relacionado con la disminución de la calidad de agua que llega a un medio natural receptor de vertidos (Elliot & Trowsdale, 2007).

En Colombia el manejo de las aguas de lluvias y residuales se hace en su gran mayoría a través de sistemas de drenaje combinados. Al respecto cabe mencionar que “sólo el 30.6 % de las aguas de alcantarillado son tratadas en el país”, según cifras de la Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (Superservicios, 2013). Para la vigencia 2017 se identificaron 682 STAR en el país, Tan solo 37 de estos sistemas de tratamiento se encuentran localizados en el departamento de Boyacá (Superservicios, Departamento Nacional de Planeación , 2018).

Esto genera un detrimento de la calidad de los cuerpos de agua receptores. La recolección, evacuación, tratamiento y disposición de dichas aguas demanda la implementación de soluciones costo-efectivas por parte de las autoridades gubernamentales y ambientales para reducir la contaminación de los ríos y otros medios acuáticos receptores de vertidos (Díaz Granados & Camacho, 2001).

Actualmente el prestador del servicio de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Tunja es la empresa privada Veolia Aguas de Tunja S.A. E.S.P. Se destaca por ser una entidad de servicios medioambientales, especializada en la gestión integral de agua y residuos. Desde 1997 esta empresa ha realizado el levantamiento de la información topológica, rehabilitación y construcción de redes proyectadas de drenaje. Igualmente, gerenció, planeó y construyó el plan maestro de alcantarillado. Así mismo, se adelantó el proyecto de redes menores entre años 2003-2015.

Hizo los modelos hidrodinámicos de los diferentes sectores de la red de alcantarillado actual, mediante el método racional modificado para obtener caudales de escorrentía, teniendo en cuenta las curvas, Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) determinadas probabilísticamente para la ciudad de Tunja. Sin embargo, estos modelos hidrodinámicos (hidráulico e hidrológico) no han sido calibrados y validados con eventos de precipitación reales históricos, por lo que se desconoce la magnitud de la lluvia efectiva generada que ingresa al sistema. Además, el sistema carece de la instrumentación adecuada para obtener registros de caudales generados a la salida de los diferentes sectores urbanos.

En Tunja se han presentado ocupaciones de los cauces naturales de aguas lluvias o de escorrentía alterando la hidrología de las cuencas naturales afectando de forma directa la capacidad de drenaje de las mismas. La ciudad de Tunja presenta un considerable y acelerado desarrollo urbano hacia la parte Nororiental, registrando reboses en el sistema de drenaje e inundaciones, afectando a la ciudadanía en términos económicos y ambientales (Proactiva Aguas de Tunja S.A.E.S.P, 2016).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Desarrollar un modelo hidrodinámico, calibrado, validado de drenaje urbano del sector Nororiental distrito Santa Inés del sistema de alcantarillado en la ciudad de Tunja.

2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información topológica, catastro de redes, fotografías aéreas para la creación del modelo hidrodinámico de la zona de drenaje de estudio.
- Desarrollar la instrumentación del sector Nororiental distrito Santa Inés al sistema de drenaje urbano en la ciudad de Tunja, con equipos de medición de precipitación y caudales generados a la salida de la subcuenca urbana.
- Diseñar un modelo hidrodinámico calibrado, validado de drenaje urbano a través del software SWMM 5.1 del sector de estudio previsto.
- Plantear alternativas técnicas de solución a las posibles problemáticas identificadas en la infraestructura de drenaje del sector de estudio, bajo escenarios de lluvia de periodos de retorno.

3. IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE LA URBANIZACION

Desde una perspectiva hidrológica, hay dos cambios físicos significativos sobre una cuenca como resultado de su urbanización. En primer lugar, es el aumento del porcentaje de superficies impermeables como techos, carreteras, estacionamientos y andenes, lo que reduce la cantidad de infiltración en el suelo y el almacenamiento de agua en superficies naturales (Kibler, 1982). Los tejados y las carreteras han existido durante mucho tiempo, pero el pavimento impermeable ha presentado un aumento significativo hasta la actualidad. Un censo nacional de carreteras mostró que, en 1904, el 93 por ciento de las carreteras en Estados Unidos no estaban pavimentadas (Southworth & Ben-Joseph, 1995). Esto cambió con el incremento del automóvil a principios del siglo XX sobre el ferrocarril, impulsado por la construcción masiva del sistema de autopistas interestatales, que sirvió para estimular el crecimiento de los centros urbanos.

A partir de ese momento, la impermeabilidad se convirtió en sinónimo de la presencia del humano, estudios han demostrado que la densidad poblacional de un área, está correlacionada con el porcentaje de cobertura impermeable (Stankowski, 1972). En los centros urbanos se presenta un constante cambio en el uso de la tierra y distribución de las coberturas vegetales, infraestructuras construidas por el hombre (carreteras, pueblos, industrias) ejercen un efecto de mayor desarrollo, produciendo una gran influencia sobre el valor de la tierra. Las consecuencias en la modificación de usos del suelo natural en la hidrológica de una cuenca urbana, están asociadas a cambios en las características de flujo máximo, variabilidad en la escurrimiento total, alteración a la calidad de agua y transformación en la apreciación de los ríos y fuentes superficiales. De todos los cambios

de uso del suelo que afecta la hidrología de un área, la urbanización es por mucho el más decisivo (Leopold, 1968).

En segundo lugar, es la conversión del sistema de drenaje natural a uno artificial. El sistema de drenaje artificial, introduce pendientes uniformes, reduce la rugosidad de las superficies y el flujo es transportado a través de canales y conductos. Estas alteraciones en su configuración, llevan al aumento en el pico y volumen de escorrentía y la disminución en el tiempo pico (Kibler, 1982). El tiempo de retardo puede verse modificado sustancialmente por los efectos de la urbanización en la superficie de la cuenca. El agua transita más rápido por las calles y techos que sobre áreas con vegetación natural. Además, la construcción de canales artificiales, especialmente el alcantarillado, también disminuye el tiempo de retardo. A medida que se reduce el tiempo requerido para que una cantidad determinada de agua se escurra, la tasa máxima de escorrentía aumenta. Los cambios hidrológicos que experimenta una cuenca se ilustran en la Figura 1 Hidrogramas de unidades hipotéticas relación lluvia-escorrentía, con definiciones de parámetros significativos. Adaptado de (Leopold, 1968).

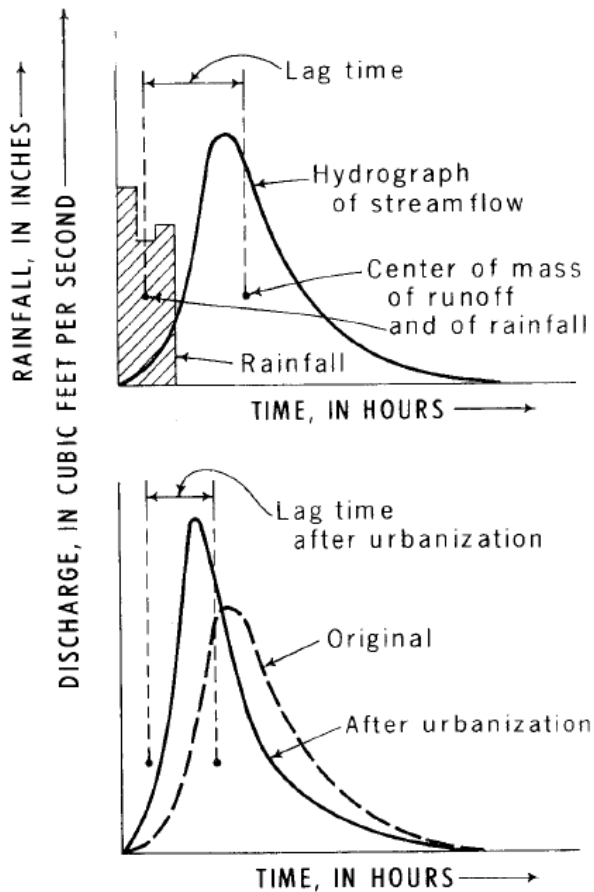


Figura 1. Hidrogramas de unidades hipotéticas relación lluvia-escorrentía, con definiciones de parámetros significativos. Adaptado de (Leopold, 1968).

Tabla 1.

Respuestas hidrológicas a los cambios en las características físicas debido a la urbanización.

Cambios en las características físicas de la cuenca	Respuesta hidrológica
Remoción de vegetación	Disminución de la evapotranspiración; Incremento en la sedimentación del cauce.
Desarrollo de viviendas, Áreas comerciales e industriales, Incremento en área impermeable.	Reducción del tiempo de concentración, lo que aumenta el pico del hidrograma, aumenta las velocidades de flujo y reduce el tiempo pico. El volumen de escorrentía y el

Cambios en las características físicas de la cuenca	Respuesta hidrológica
	potencial de daño por inundación también aumentan considerablemente.
Construcción de alcantarillados pluviales y mejoras en canales de drenaje	El alivio local de las inundaciones, pero la concentración de las aguas de las inundaciones puede agravar los problemas de inundaciones río abajo

Nota: Adaptado de (ASCE , 1975).

4. DESCRIPCION DE LA CUENCA

4.1 Descripción Zona de Estudio

Tunja es una ciudad colombiana, capital del departamento de Boyacá, situada en el centro-oriente de Colombia, en la región del Alto Chicamocha. Está ubicada en las coordenadas 5°32'7"N 73°22'04"O / 5.53528, -73.36778 y su longitud en relación con Bogotá es de 0 grados, 43 minutos y 0 segundos. Su extensión territorial es de 118 Km², de los cuales el 87 % corresponde al área rural y el 13 % al área urbana. Dista a 130 km de la ciudad de Bogotá, la capital del país. Como capital del departamento, Tunja alberga las sedes de la Gobernación de Boyacá, la Asamblea Departamental, el Tribunal Superior de Tunja; además, es la sede de empresas oficiales, como la Empresa de Energía de Boyacá.

Limita por el norte con los municipios de Motavita y Cóbbita, al oriente con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá, por el sur con Ventaquemada y por el occidente con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora. Registra 200 desarrollos urbanísticos en la zona urbana y 10 veredas en el sector rural: Barón Gallero, Barón Germania, Chorroblanco, El Porvenir, La Esperanza, La Hoya, La Lajita, Pirgua, Runta y Tras del Alto. Los ríos: Jordán que atraviesa a la ciudad de sur a norte y la Vega que va de occidente a oriente, se consideran sus principales fuentes hídricas (Alcaldía de Tunja).

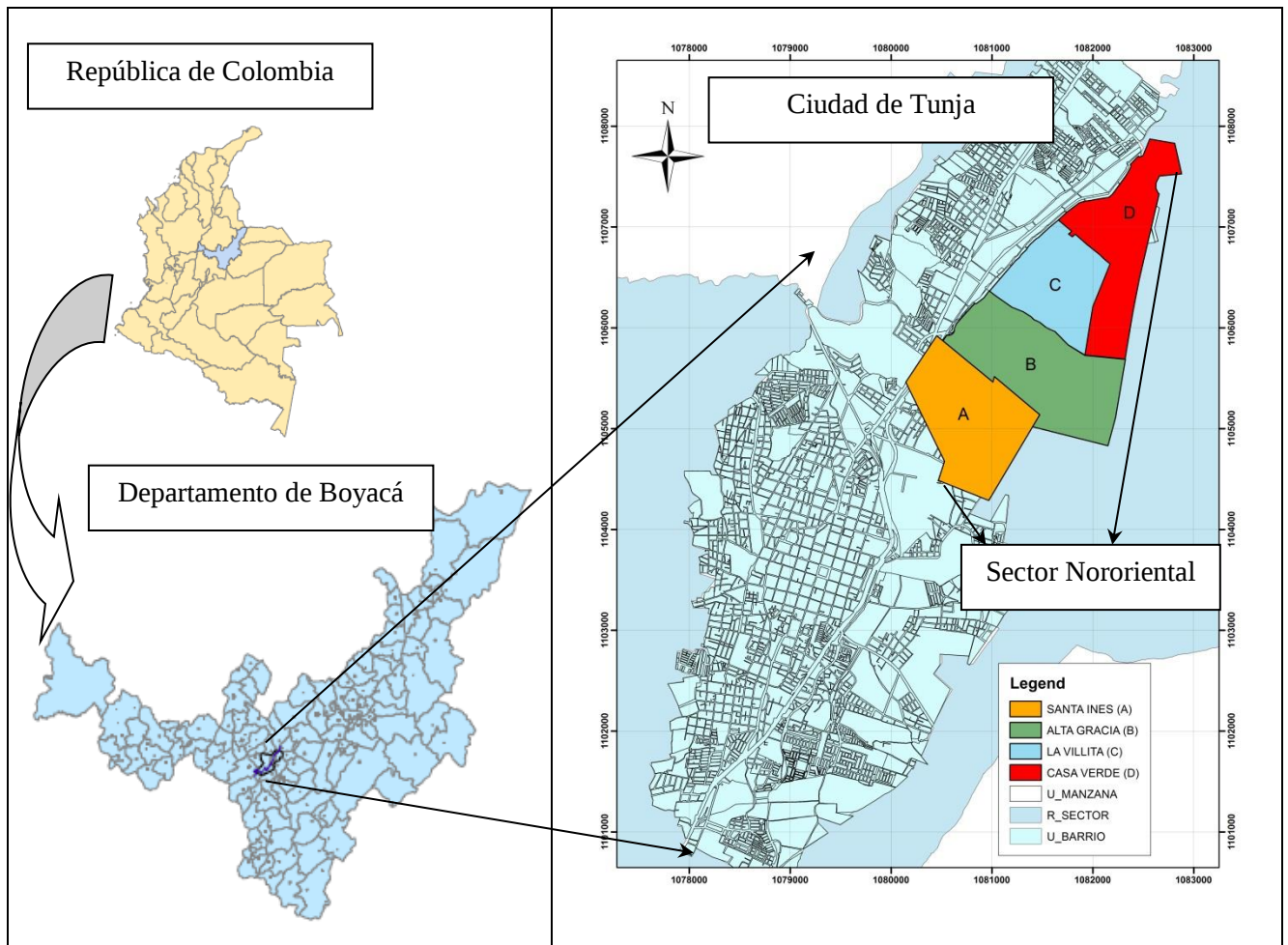


Figura 2. Localización General-Ciudad de Tunja-Sector Nororiental. (POT Tunja 2014. Autor).

4.1.1 Descripción local

La zona Nororiental de Tunja, potencial desarrollo de la ciudad, cuenta con un área aproximada de 285 ha, a lo largo de la avenida universitaria. Ésta zona según el plan de ordenamiento territorial del municipio se encuentra contemplada entre los siguientes aspectos:

Geología. Para la zona en estudio se identificó tanto la estratigrafía como las estructuras tectónicas presentes, desde formaciones características hasta el sinclinal de Tunja, que colinda con la zona Nororiental objeto de estudio. Ver Figura 3. Geología local. Las formaciones presentes hacen parte de la secuencia conformada por rocas de origen sedimentario depositadas durante el Terciario y Cuaternario, de las cuales se identificaron (Guacaneme, 2006):

- Formación Tilatá (Tst): Se da el nombre de Tilatá a una formación que se encuentra en capas horizontales entre Tilatá y la represa del Sisga, formada alternativamente de gredas, capas arenosas y cascajos con unos 150 m de espesor visible. El borde oriental de la pista de aterrizaje “Gustavo Rojas Pinilla” de la ciudad de Tunja, está conformada por arcillas blancas y grises, subhorizontales y compactas; todo este sector se halla fuertemente afectado por procesos erosivos proporcionando una morfología característica de cárcavas profundas y amplias.
- Formación Fluvio-Lacustre (Qac): Se encuentra formando los valles del río Jordán y de la quebrada La Cascada. Presenta una morfología de relieve suave a plano; son depósitos no consolidados y su composición varía lateralmente, así como la granulometría de sus elementos, situación que refleja la frecuente variación de la intensidad de las corrientes hídricas que los depositaron.

Susceptibilidad Sísmica. Tunja en su calidad de capital histórica y cultural, cuenta con numerosos museos de interés arquitectónico, religioso, arqueológico y turístico. Estudios realizados por la AIS, (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica; Universidad de Los Andes, 1984) y (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica; Universidad de Los Andes; Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química-Ingeominas, 1996), señalan que Tunja se encuentra en un área expuesta a la actividad sísmica.

Según datos históricos, en los últimos 500 años la sismicidad de Tunja y su área cercana ha sido destacada. El Departamento de Boyacá ha sido epicentro de más de 15 importantes sismos en Colombia, mientras que en Tunja según diversos catálogos sísmicos se han presentado más de 280 sismos con magnitudes M_s o m_b superiores a 2.5 en los últimos 400 años, dentro de los que se destacan los de los años 1785, 1826, 1926, 1923, 1962 y 1967, los cuales causaron graves daños a las edificaciones de la ciudad (Ramirez, 1975).

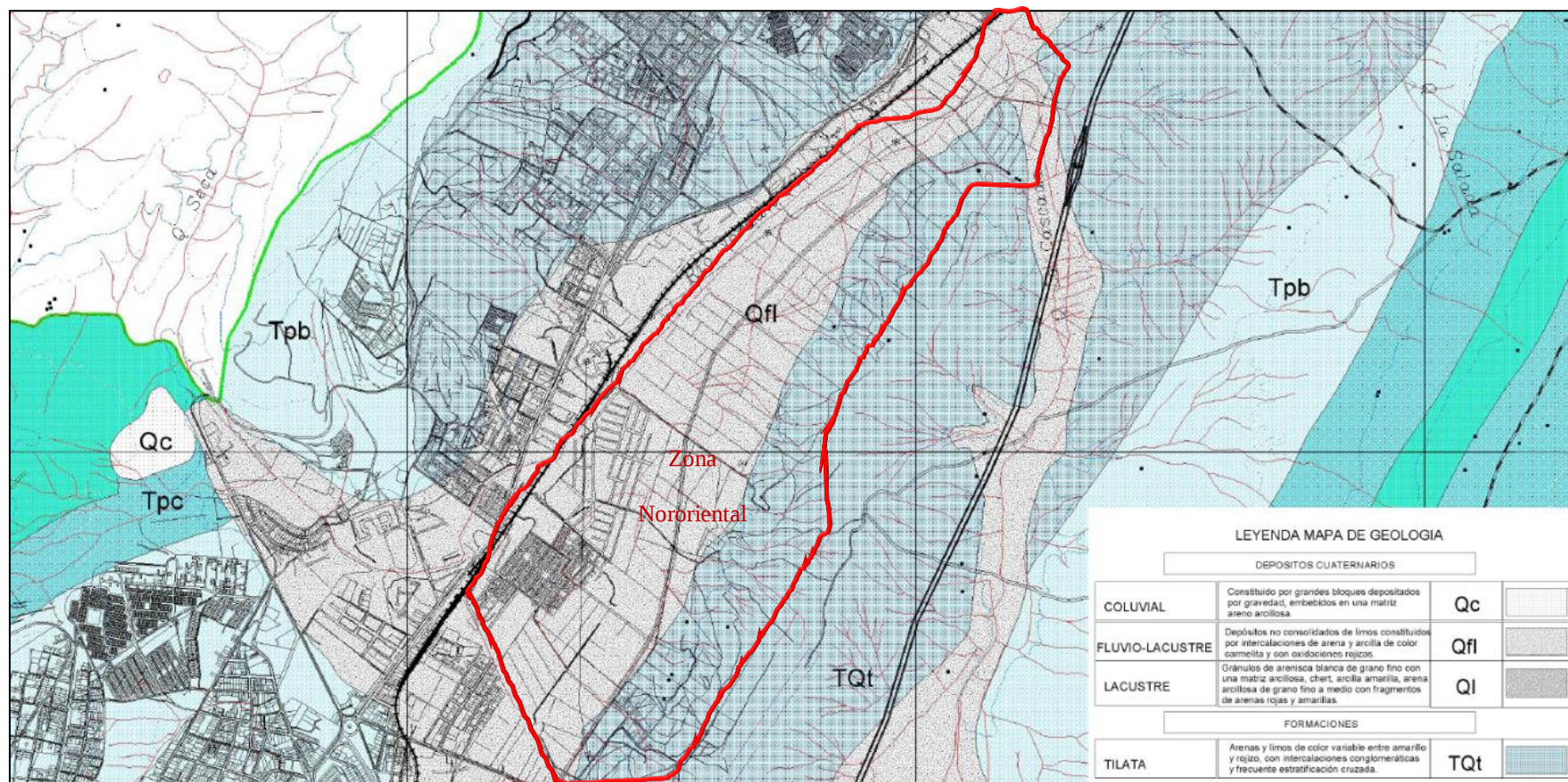


Figura 3. Geología Local (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja, 2014)

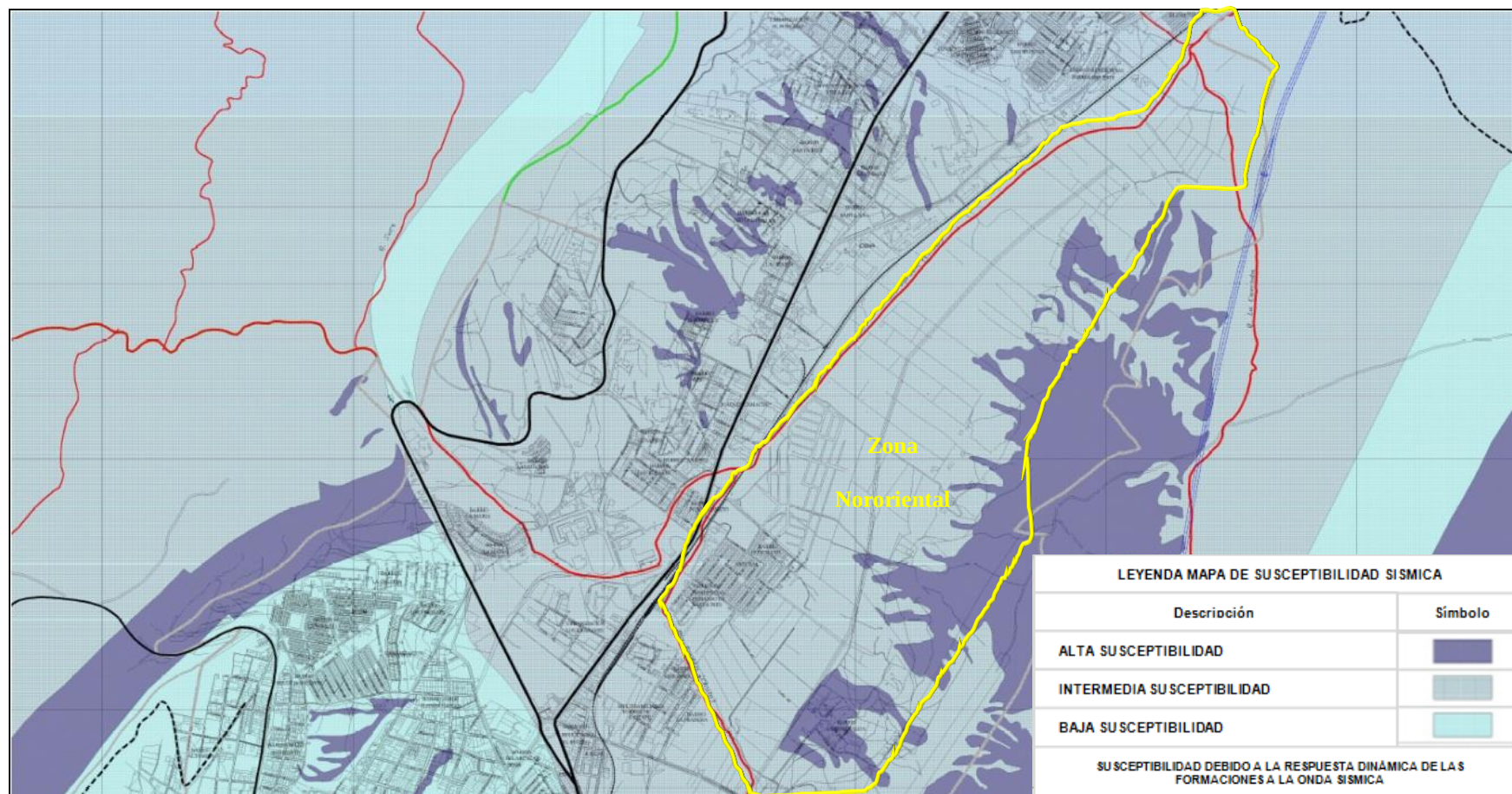


Figura 4. Susceptibilidad Sísmica (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja. 2014).

La zonificación de los suelos en superficie de la ciudad de Tunja permite precisar su baja capacidad portante, expansividad, con mal drenaje y sustrato profundo e inundable, la gran susceptibilidad sísmica es evidente; de igual manera lo indica la presencia del eje de la estructura del Sinclinal de Tunja, el cual se encuentra desplazado por una falla transversal, con movimiento de rumbo y orientación NW. (Ver figura 4).

El alto número de cárcavas presentes en el área urbana, especialmente en los extremos Sur y Norte, cuya composición de materiales generan una alta susceptibilidad a fenómenos inducidos por sismos como lo son los deslizamientos de tierras, son una amenaza latente. Por otra parte la presencia en aumento de rellenos antrópicos distribuidos por la ciudad, sobre los cuales se ha construido sin tomar precauciones adecuadas y en muchos casos sin ningún tipo de prevención, componen otra amenaza (Guacaneme, 2006).

Uso del Suelo Urbano: El POT del municipio de Tunja da a conocer el desarrollo que se tiene en la zona, a lo largo de la avenida universitaria se presentan usos de suelo específico, a saber: residencial exclusivo unifamiliar, uso institucional y uso mixto. (Ver Figura 5).

Residencial Exclusivo Unifamiliar: Área cuyo uso principal es el residencial, el cual solamente permite el desarrollo de algunos usos de bajo impacto urbanístico, compatibles a él. Para el área urbana de Tunja se identifica con el código U.P.R.E (Urbano Privado Residencial Exclusivo).

Institucional 2: Áreas destinadas a uso institucional específico, a saber:

Educación: institutos técnicos, especializados, centros de capacitación, colegios de enseñanza media y similar.

Administrativos: centros administrativos locales, Centros de Atención inmediata y de telecomunicaciones.

Social-cultural: Teatros al aire libre, centros culturales comunitarios y academias.

Asistencial: Instituciones prestadoras de servicio de salud del nivel uno.

Recreativos: polideportivos, escenarios al aire libre.

Residencial Mixto X1 y X2: Áreas destinadas al uso residencial, pero que permite el desarrollo o mezcla con otros usos, en especial de comercio, servicio o industria, desarrollados en forma independiente o dentro de la misma vivienda. Para el área urbana de Tunja se identifica con el código U.P.R.M (Urbano Privado Residencial Mixto).

Susceptibilidad a Inundación. La actual tendencia en la ciudad es la de edificar en las zonas aluviales de los Ríos Jordán y La Vega, zonas que teniendo en cuenta la respuesta hidrológica de las fuentes superficiales presentan inundaciones. Las principales causales de incremento en el grado de susceptibilidad a inundación que afecta a la zona Nororiental del Municipio de Tunja, son las provenientes de erosión avanzada y cárcavamiento. En la figura 6 se ilustra el plano Susceptibilidad a Inundación (Resolución 0241 POT, 2014), para la ciudad de Tunja, en donde se evidencia que la zona Nororiental posee susceptibilidad alta de inundaciones, teniendo en cuenta su cercanía a los cauces naturales del Río Jordán, Quebrada La Vega y por la presencia importante de cárcavas en la zona.

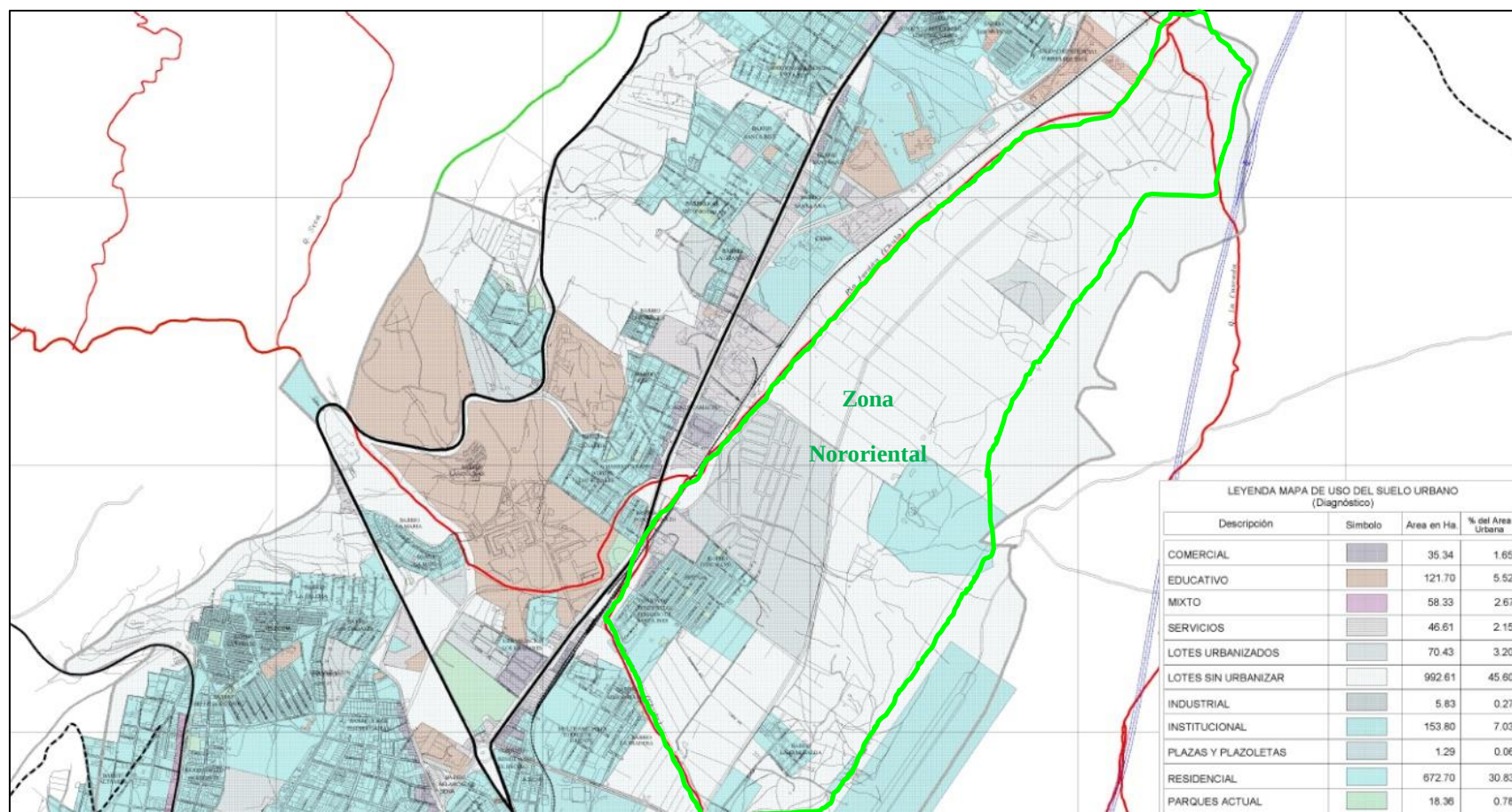


Figura 5. Diagnóstico Uso de Suelo Urbano (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja. 2014).

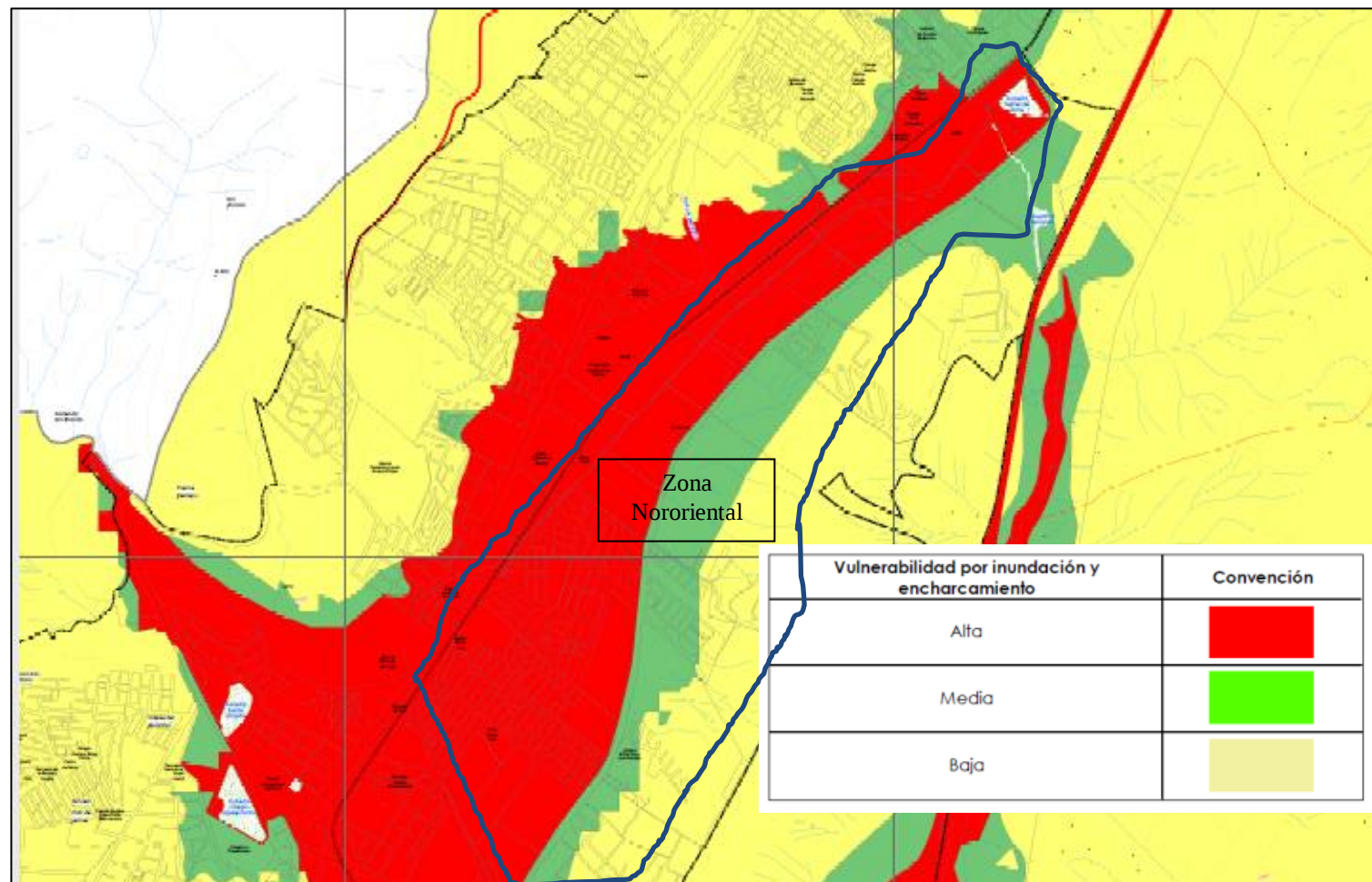


Figura 6. Susceptibilidad a Inundación Fuente: (Plan de Ordenamiento Territorial, Municipio de Tunja.2014).

El POT vigente para la ciudad de Tunja establece lineamientos de desarrollo encaminados a la ejecución de obras de control y protección que minimicen la amenaza de inundación e implementar la planta de tratamiento de aguas servidas como aporte a la recuperación de la Cuenca del Chicamocha (Resolución 0241 POT, 2014). Los suelos urbanizables deben proyectar un plan general del trazado de redes fundamentales de agua acueducto y alcantarillado sanitario y pluvial definiendo las características de esas redes y galerías. Sin embargo, la expansión urbanística no siempre va acompañada de una adecuada planificación, las leyes urbanísticas no han creído nunca necesario establecer que para usar el suelo virtualmente siempre es necesario el manejo del recurso hídrico.

4.2 Sector Nororiental

Basados en la sectorización contemplada en el Plan Maestro de Alcantarillado de Tunja, la zona Nororiental se encuentra dividida en cuatro distritos de drenaje: Santa Inés (A), Altagracia (B), Villita (C) y Casa Verde (D) (Ver Figura 7).



Figura 7. Distritos de Drenaje Sector Nororiental- Santa Inés (A), Altagracia (B), La Villita (C) y Casa Verde (D) (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor).

4.3 Delimitación Zona de Estudio

Basados en el Plan Maestro de Alcantarillado de Tunja y catastro de redes suministrado por el operador del servicio (Veolia Aguas de Tunja) se pudo establecer que el Sector Nororiental está compuesto por cuatro (4) distritos de drenaje, los cuales no se encuentran conectados entre sí y realizan las descargas de aguas combinadas a diferentes puntos del interceptor.

Para el desarrollo del presente estudio, se cuenta con un solo equipo (Flow Logger) para realizar el monitoreo de caudal y obtención de hidrogramas de alcantarillado reales medidos en la descarga principal de la cuenca urbana, los cuales se utilizarán en la calibración y validación del modelo hidrodinámico. Teniendo en cuenta factores y características como; vulnerabilidad por inundación, mayor porcentaje de área impermeable y densidad de urbanización, se decide seleccionar el distrito Barrio Santa Inés (A) como zona específica de estudio, teniendo en cuenta que históricamente este sector ha presentado problemas de inundación, posee una mayor área impermeable y densidad de urbanización con respecto a los otros distritos que hacen parte del sector Nororiental. El distrito de alcantarillado Santa Inés ha estado en operación durante 35 años aproximadamente. El distrito Santa Inés, zona 1 y 2 tienen un área total de 21.89 Ha. (Ver Figura 8).

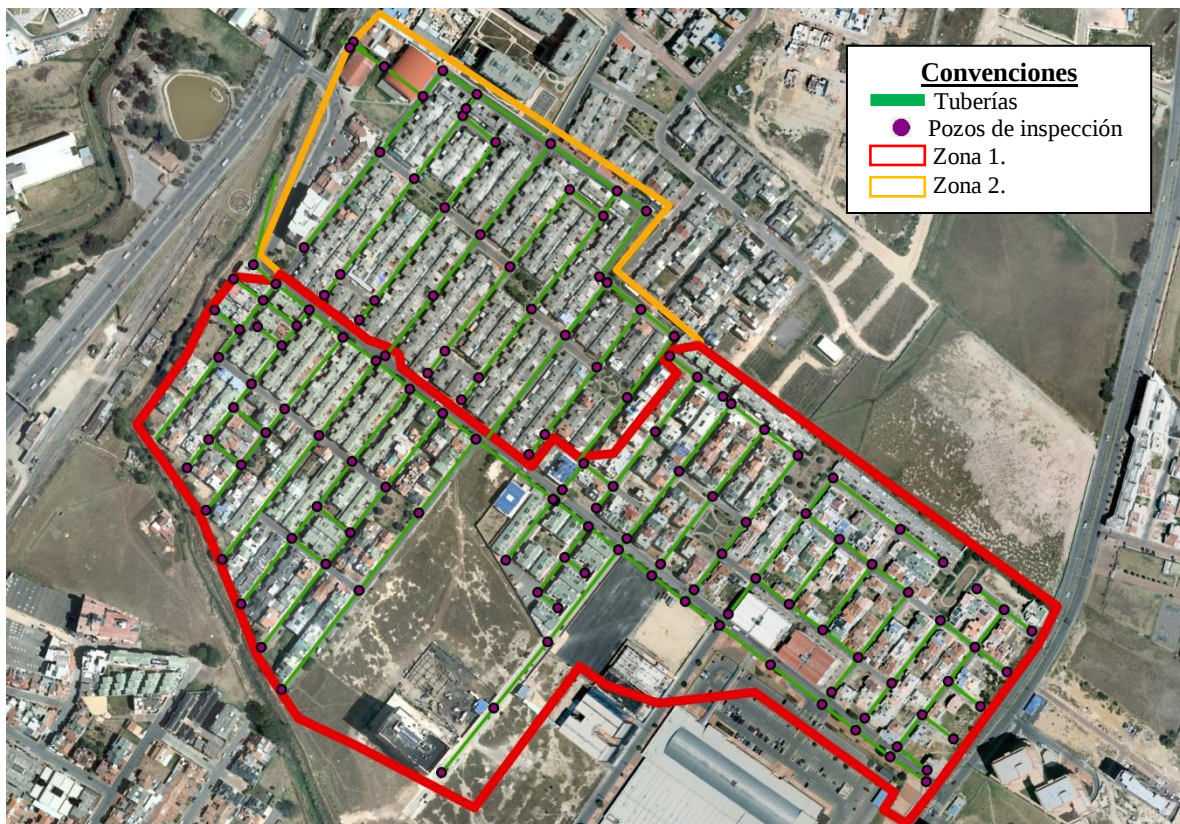


Figura 8. Distrito Barrio Santa Inés Zona 1 y 2. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor).

4.4 Base Catastral Red de Drenaje Distrito Santa Inés

El catastro de red, es un sistema de registro y archivo de información técnica estandarizada y relacionada con todos los detalles técnicos de ubicación de tuberías, diámetros, pendientes, pozos o cámaras de inspección, cámaras de caída, sumideros, aliviaderos y todo accesorio de la red (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Teritorio, 2016).

4.4.1 Validación base catastral

Con el fin de validar la representatividad de la base catastral del sistema de alcantarillado existente, se identificaron 12 puntos de interés de la zona de estudio, en donde se realizó verificación de profundidad de pozos y conectividad del sistema existente. La actividad de validación del catastro de alcantarillado se ejecutó con el apoyo de estudiantes del Semillero de investigación denominado “Manejo Sostenible de Recursos Hidro-Ambientales” MSRHA y el personal profesional operativo del prestador del servicio (Veolia Aguas de Tunja), en esta actividad se identificó la conectividad de los pozos, cotas batea y/o rasante, clave, diámetro de colectores de entrada, salida y estado físico de las estructuras en general.

Esta actividad fue fundamental para verificar los sentidos de flujo y conectividad de los colectores en los puntos de incertidumbre, concluyendo que el catastro de alcantarillado existente es representativo y constituye la realidad del sistema de drenaje en la zona de estudio. La actividad de verificación se procesó y digitalizó a través de una ficha en

formato Access, en donde se plasman los datos topológicos recopilados en campo de los diferentes pozos y colectores. En seguida, se presentan algunas fotografías.



Figura 9. Verificación catastro red de alcantarillado distrito Santa Inés (Autor).

4.4.2 Topología red de drenaje distrito Santa Inés

Una vez realizadas las actividades de inspección, catastro de redes, verificación de conectividad del sistema, identificación de pozos iniciales, se procedió a ejecutar la delimitación del distrito Santa Inés, encontrando que el distrito se encuentra dividido en dos zonas diferentes, a continuación, se presenta la base topológica del modelo hidrodinámico (pozos de inspección, cotas batea y rasante, geometría de tuberías, diámetros, materiales y pendientes).

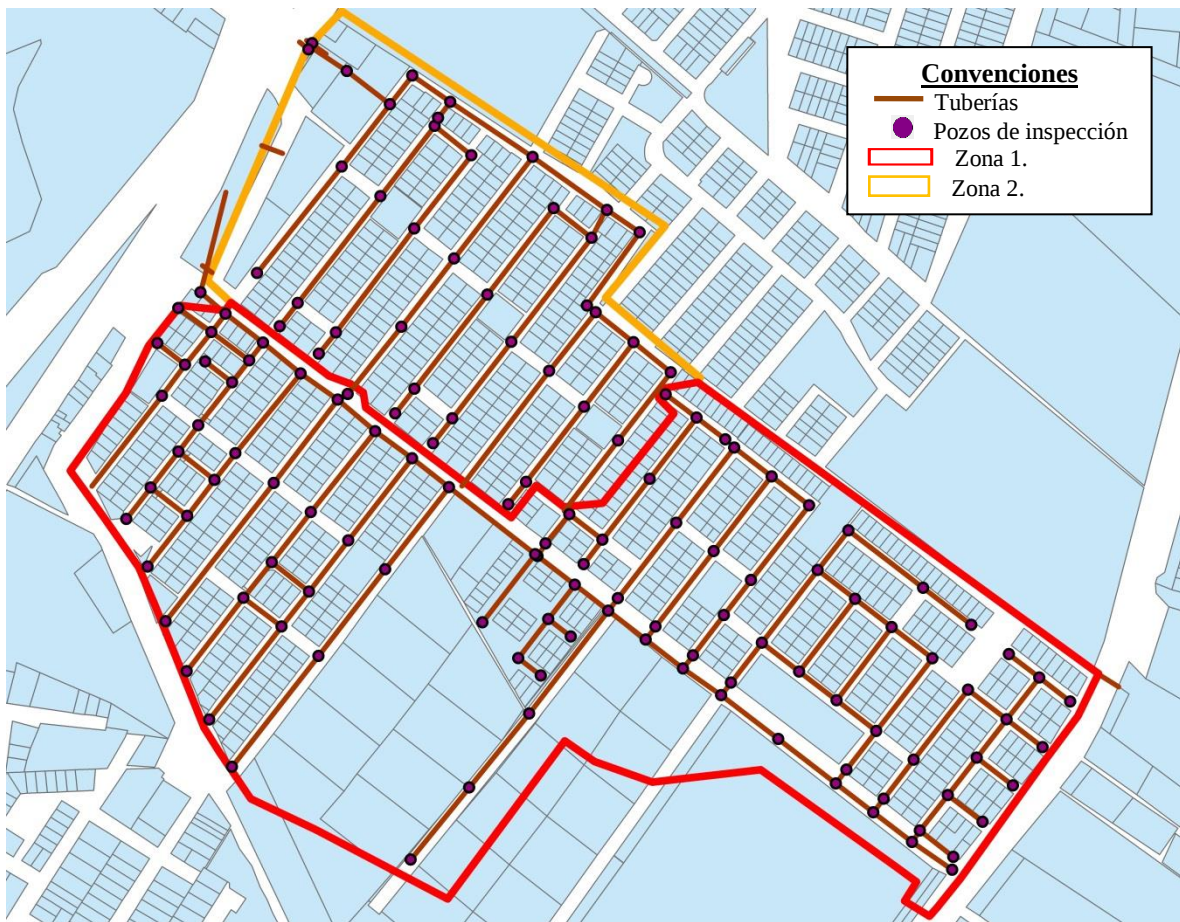


Figura 10. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 1 y 2. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor.)

▪ Tuberías

El sistema de alcantarillado del Barrio Santa Inés es de tipo combinado, los sistemas de alcantarillado combinados son aquellos en los cuales tanto las aguas residuales como las aguas lluvias son recolectadas y transportadas por el mismo sistema de tuberías (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Teritorio, 2016). Las tuberías del sistema de drenaje están construidas en materiales como; Concreto y PVC Tipo alcantarillado, con un porcentaje de 96 % y 4 % respectivamente. La totalidad de tramos o colectores entre pozos de inspección es de 156.

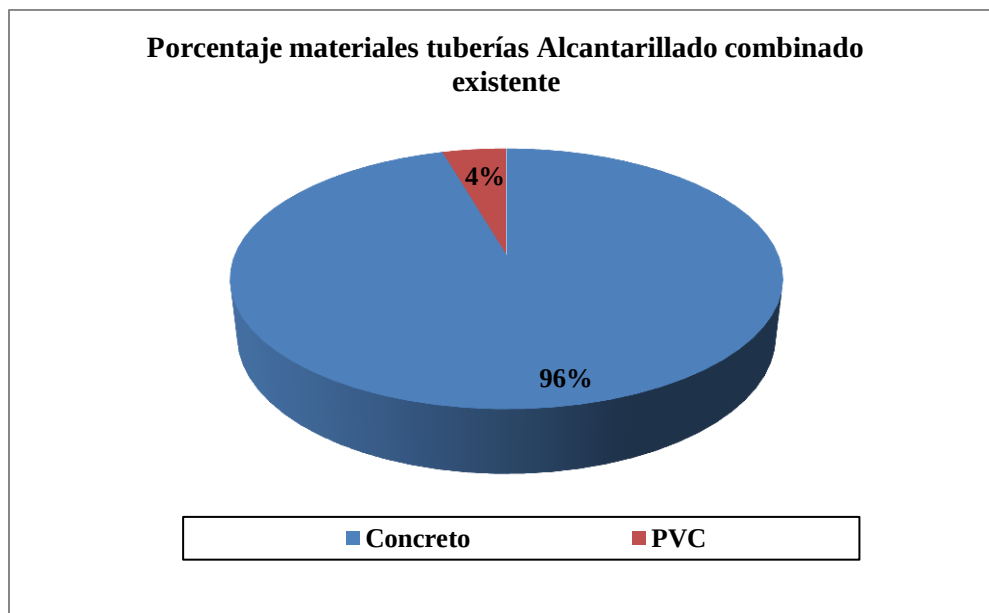


Figura 11. Porcentaje materiales tuberías Alcantarillado combinado existente. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor.)

Las tuberías del sistema de drenaje combinado existente están construidas en diámetros nominales de 10", 12", 14", 16", 18" 24" 27" y 30", el 32.05 % corresponde a tubería de 14" como se indica en la siguiente figura, siendo este diámetro el predominante. La longitud total de las redes es de 6539.43 metros lineales con una pendiente media de 0.49 %.

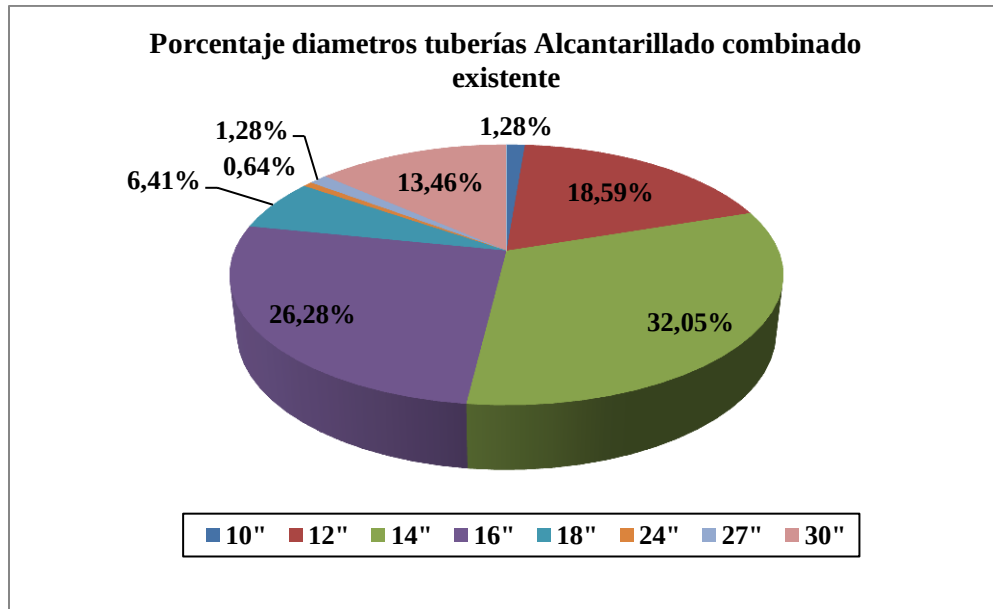


Figura 12. Porcentaje diámetros tuberías Alcantarillado combinado existente. (Veolia Aguas de Tunja 2018. Autor.)



Figura 13. Tuberías Alcantarillado combinado existente. (Autor.)

▪ Pozos de Inspección

Los pozos de inspección son estructuras usualmente de forma cilíndrica, localizada al inicio o entre tramos de la red de alcantarillado, permite el acceso desde la superficie para realizar labores de inspección o mantenimiento a los conductos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Teritorio, 2016). Los 140 pozos de inspección que conforman el sistema de alcantarillado combinado del distrito Barrio Santa Inés, son en su totalidad cilíndricos, contruidos en mampostería, con una profundidad promedio a cota batea de 1.10 metros.



Figura 14. Pozos de inspección Alcantarillado combinado existente. (Autor.)

▪ Sumideros

El sistema de alcantarillado combinado cuenta con 206 sumideros laterales que permiten el ingreso de las aguas pluviales al sistema de drenaje, para la zona de estudio estas estructuras están localizadas generalmente en tramos iniciales, intermedios y finales de las vías urbanas. Las medidas estándar de la rejilla son: largo 0.90 m, Ancho 0.50 m y profundidad de sumidero; 1.20 m.



Figura 15. Sumideros Alcantarillado combinado existente. (Autor).

▪ Descargas

El distrito Santa Inés, posee (2) puntos de descarga, ya que el sistema de drenaje se encuentra dividido en (2) zonas, las cuales se han denominado 1 y 2.

Descarga Zona 1.

La descarga principal del distrito Santa Inés (Zona 1), es una cámara de alivio que permite realizar la descarga de aguas sanitarias al interceptor y las aguas lluvias de exceso fluyen en tubería de 30" hasta el descole en el río Jordán o también denominado Río Chulo.



Figura 16. Descarga Zona 1. Alcantarillado combinado existente. (Autor).

Descarga Zona 2.

La descarga de la zona 2 es un pozo que permite la conexión de las aguas residuales al interceptor, se encuentra localizado en cercanía a la iglesia del Barrio Santa Inés. Las aguas lluvias de exceso también son conducidas al río Chulo.



Figura 17. Descarga Zona 2. Alcantarillado combinado existente. (Autor).

5. EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

El estudio de la hidrología urbana y principalmente de los métodos de lluvia-escorrentía aplicados a la superficie de una ciudad, se ha aplicado con la ausencia general de comprobaciones con medidas reales que permitieran cuantificar el comportamiento de las redes de drenaje en general. Por esta razón, los diagnósticos de alcantarillados y proyección de nuevos colectores se realizan asumiendo una serie de parámetros y coeficientes que han sido estimados a partir de medidas de campo en otros países y en condiciones de lluvias o de urbanización muchas veces distintas. Para un estudio cuantitativo del comportamiento hidrológico e hidráulico de una cuenca urbana es necesario registrar los datos de precipitación y de caudales de escorrentía a la salida del área de drenaje, asociados a esas lluvias (Gómez Valentín , 2007).

El método cuantitativo en una investigación tradicional, se acostumbra a asociarlo a la medición de variables en función de su magnitud, extensión o cantidad (Cerde, 1993). Es fundamental mencionar que los equipos para monitorear precipitaciones y caudales en la zona de estudio, fueron adquiridos por la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja, facultad de Ingeniería civil, permitiendo así, desarrollar estudios investigativos aplicados. A continuación, se ilustra la localización del pluviómetro y caudalímetro dentro de la cuenca Santa Inés-Zona 1. Objeto de calibración y validación.

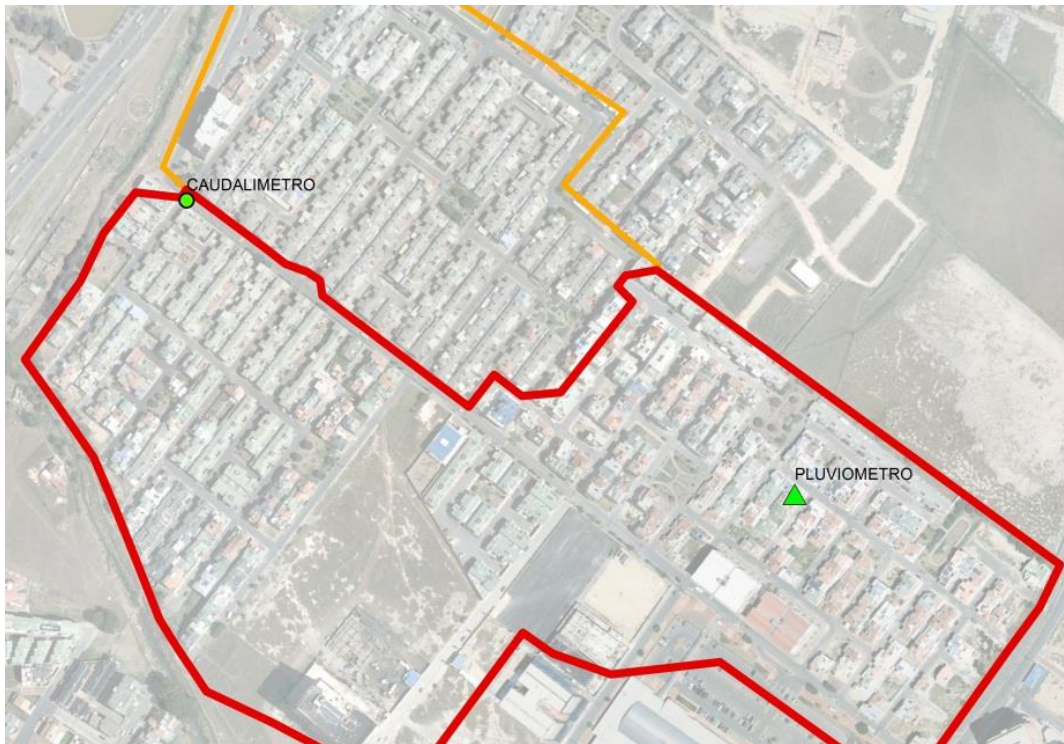


Figura 18. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 1 y 2. (Autor.)

5.1 Medida de Precipitación

La medida de precipitación se obtuvo a través de un pluviómetro de balancín modelo- RainLog 2.0 con datalogger - RainLogge Marca: Rainwise, instalado adecuadamente dentro de la cuenca. Cada vez que se produce un vuelco de las cazoletas, el aparato transmite una señal a un datalogger que almacena la información del instante, hasta que sea descargado a un ordenador portátil (RainWise, Inc, 2013). Sus principales características son:

Reporte de precipitación: Diario, minuto y evento.

Resolución de precipitación: 0.25 mm

Memoria de almacenamiento Logger: 2 mb o 298,422 datos.



Figura 19. Pluviómetro de Balancín modelo- RainLog 2.0 con datalogger - RainLogge Marca: Rainwise. (Autor).

5.2 Medida de Caudal

Teniendo en cuenta la base catastral de la red de drenaje, se pudo establecer el pozo de salida del distrito Santa Inés Zona 1, denominado PATP3939 según el sistema de información geográfica del operador del servicio de alcantarillado, este pozo de inspección, brindó condiciones adecuadas para la instalación del caudalimetro, con una profundidad a cota batea de 1.58 metros, el colector principal está construido en tubería de concreto con diámetro 30 pulgadas.

El caudal en la sección de tubería de salida, se obtuvo, utilizando el sensor Flo Dar - FL900 Series Flow Logger marca Hach. La medición del flujo con el sensor Flo-Dar sigue el método de área velocidad, midiendo una velocidad media usando señal de radar y el nivel o calado, a partir del cual se calcula el área mojada de la sección transversal. El caudal circulante será el producto del área mojada por la velocidad medida.

5.2.1 Medida de velocidad por tecnología radar

La señal del radar se refleja desde la superficie hacia el sensor. Una parte de la señal se refleja con una frecuencia ligeramente distinta. La diferencia de frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del caudal. A su vez, una unidad de control microprocesada utiliza un modelo matemático para realizar el cálculo de velocidad. Generalmente, estos sistemas de medición, se utilizan en colectores de alcantarillados combinados o en pequeños canales con fluidos que contienen partículas de gran tamaño, de esta forma, se evita el deterioro del sensor y se minimizan las labores de mantenimiento que requieren los sensores intrusivos o que se encuentran en contacto con el fluido (Ramas Ayala, 2014).

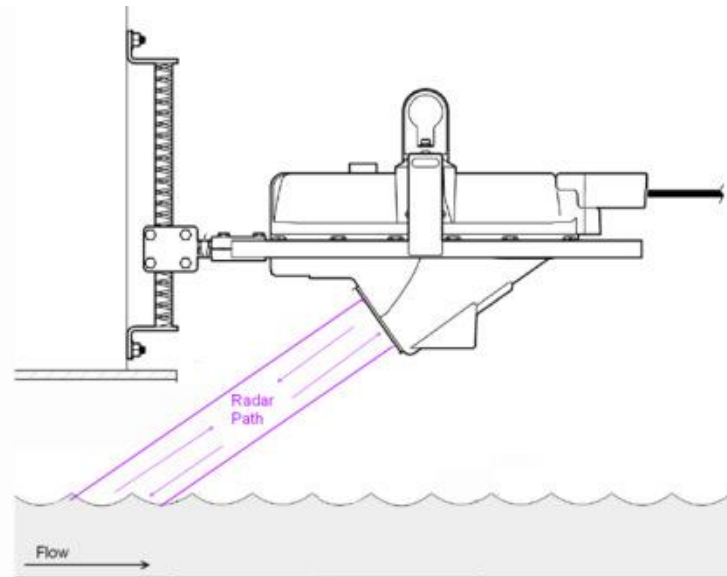


Figura 20. Alineación vertical del sensor Flo-Dar, señal de radar, medición de velocidad. Adaptado de (HACH, 2010)

5.2.2 Medida de nivel o calado

La profundidad del agua se mide utilizando un sensor ultrasónico-eco de impulsos. Se envía un impulso electrónico contra la superficie del agua y parte de la señal vuelve al sensor. El tiempo de tránsito hasta la superficie y de vuelta, se utiliza para calcular la distancia desde la superficie del agua hasta el sensor. El diámetro de la tubería se utiliza para convertir la distancia en la profundidad del agua (HACH, 2010). “El principio de medida consiste en medir el tiempo de viaje (ida y vuelta) de un ultrasonido desde un emisor hasta la superficie del agua, y su retorno. Conocido el tiempo de viaje” (Gómez Valentín , 2007). Tenemos que:

$$h = D - d = D - V_{\text{Ultrasonido}} * \frac{T}{2}$$

En dónde: h es calado, D altura desde el emisor de ultrasonidos hasta la solera o cota batea del colector, d distancia entre emisor y superficie libre, V velocidad de ultrasonido.

5.2.3 Medida de inundación

Con el fin de registrar velocidades y láminas de agua cuando el sistema de drenaje entre en carga, al caudalimetro se le instaló el sensor de velocidad de sobrecarga (SVS). El cual se activa cuando el nivel del caudal crece hasta una distancia 17,7 cm del chasis de montaje del sensor y permanece activo hasta que el caudal desciende 17,7 cm. El SVS mide la velocidad mediante un sensor electromagnético que genera un campo magnético. Cuando

el agua atraviesa el campo magnético, se genera una tensión (voltaje) directamente proporcional a la velocidad del agua que atraviesa el sensor (HACH, 2010).

En seguida se presenta la Figura 21, en donde se observa el proceso de instalación del sensor Flo Dar - FL900 Series Flow Logger marca Hach en el pozo de salida de la cuenca urbana. Actividad realizada por el personal operativo de Veolia Aguas de Tunja, con el apoyo del director y autor del presente estudio.



Figura 21. Instalación del sensor Flo Dar - FL900 Series Flow Logger marca Hach. (Autor).

6. PRECIPITACIONES Y CAUDALES OBTENIDOS

Es necesario mencionar que, el pluviómetro de Balancín modelo- RainLog 2.0 con datalogger fue instalado en noviembre del año 2017. La adquisición del sensor Flo Dar - FL900 Series Flow Logger se realizó hasta junio del año 2018, por lo tanto, el monitoreo simultaneo de lluvias y caudales asociados se realizó desde el 12 de julio hasta 14 de noviembre de 2018.

Es decir que se efectuó un monitoreo total de 4 meses como estaba previsto, durante este periodo se realizaron labores de inspección y seguimiento cada 15 días, con el fin de establecer las condiciones físicas y funcionales de los equipos instalados. La representatividad de los eventos de lluvias y caudales, se ejecutó cruzando los datos registrados en los equipos de medición, verificando la magnitud y el tiempo de ocurrencia entre hidrogramas e hietogramas.

6.1 Datos de Precipitación

En el periodo simultaneo de monitorización, se logró capturar 6 eventos de lluvia representativos de la zona de estudio, presentando variabilidad en magnitud, tiempo de duración e intensidad de lluvia, es necesario mencionar que durante el periodo de julio a noviembre se registró la segunda temporada de lluvias a nivel nacional y departamental (El Pais, 2018). El evento de lluvia de mayor magnitud registrado, ocurrió el 13 de septiembre de 2018, con una duración total de 185 minutos.

Tabla 2.
Eventos de lluvia, volumen precipitado y periodo de retorno asociado.

Evento	Lluvia Total (mm)	Volumen de lluvia (m ³)	Duración (minutos)	Intensidad (mm/h)	Periodo de retorno asociado
16-jul-18	3.75	598.50	35	6.43	< 2 años
24-jul-18	3.25	518.70	35	5.57	< 2 años
29-30-ago-18	13.52	2157.79	245	3.31	< 2 años
15-oct-18	9.52	1519.39	80	7.14	< 2 años
22-23-oct-18	8.00	1276.80	235	2.04	< 2 años
13-sep-18	22.22	3546.312	185	7.21	2 años

6.2 Datos de Caudales

El caudalímetro fue retirado el día 14 de noviembre de 2018, los caudales máximos registrados, correspondieron a las mayores precipitaciones obtenidas, por otra parte, en el monitoreo, hubo coincidencia con el periodo seco registrado en la semana del 1 de agosto a 21 de agosto de 2018. Por tratarse de un sistema de alcantarillado combinado, en tiempos secos, se pudo observar la periodicidad en los hidrogramas registrados, obteniendo incrementos en caudales de aguas residuales para las horas máximas de consumo de agua. Estos datos de caudal registrados, evidenciaron el buen funcionamiento del medidor.

Tabla 3.
Precipitaciones y caudales obtenidos.

Suceso de Lluvia	Lluvia Total (mm)	Duración (minutos)	Intensidad Máxima (mm/h)	Caudal Máximo (l/s)
16-jul-18	3.75	35	6.43	161.13
24-jul-18	3.25	35	5.57	140.72
29-30-ago-18	13.52	245	5.81	219.63
15-oct-18	9.52	80	7.14	266.66
22-23-oct-18	8.00	235	3.75	146.11
13-sep-18	22.22	185	20.97	536.99

6.3 Evento de lluvia del 13-septiembre-2018

En la zona de estudio, distrito Santa Inés, el día 13 de septiembre de 2018 se produjo una precipitación total de 22.22 mm con una duración de 185 minutos. El hidrograma observado e hietograma registrado del suceso se refleja en la Figura 22, para intervalos de tiempo de 5 minutos, de intensidad máxima de 20.97 mm/h, lo que generó que el sistema entrara en carga, el sensor SVS registro láminas de flujo desde las 5.45 pm hasta las 6.00 pm. Esta condición fue objeto de chequeo en las simulaciones realizadas para el modelo hidrodinámico calibrado y validado.

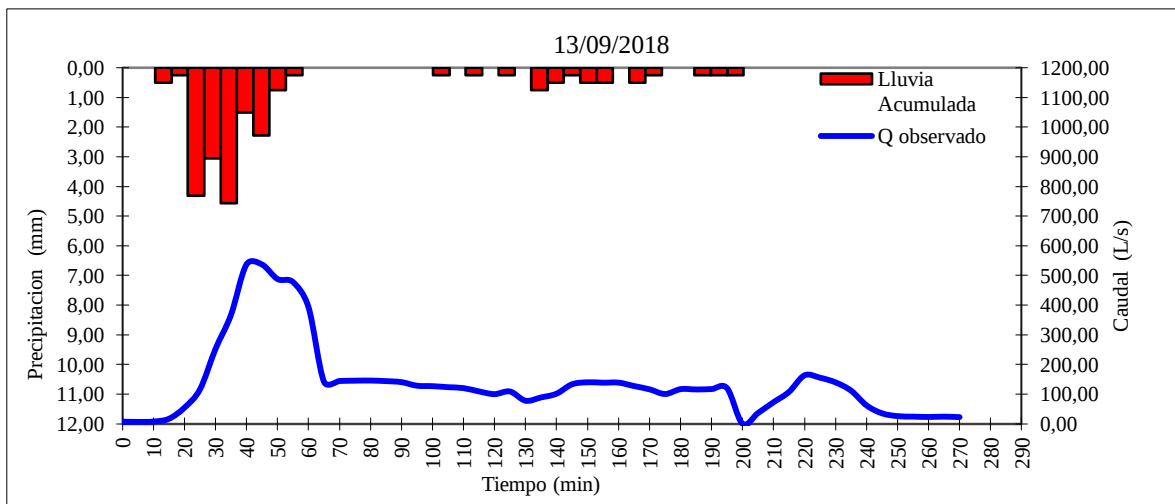


Figura 22. Hietograma e hidrograma evento de lluvia 13 de septiembre de 2018.

7. ANÁLISIS DE CALIDAD DE INFORMACION PLUVIOMETRICA

El análisis y modelado de series hidrológicas y climatológicas a menudo asume que los datos dados son estacionarios en la media y en la covarianza. Sin embargo, si hay cambios o tendencias en los datos, estos pueden ser el resultado de factores climáticos, naturales o de acciones antrópicas (Smith & Campuzano, 2000). En este capítulo, se realizó un análisis de calidad de los datos obtenidos en el pluviómetro Santa Inés, a través de un análisis estadístico exploratorio, el cual tiene como objetivo confirmar estadísticamente la presencia o ausencia de ciertas propiedades en los datos identificando gráficamente correlaciones en la series de datos observados en el tiempo. Específicamente, las gráficas propuestas para detección de cambios y tendencias son:

Gráfica de Masa Simple

Gráficas de Doble Masa

Gráficas de Masa Residual

Gráficas de Caja

Gráficas S-S

7.1 Graficas de Masa Simple

Las gráficas de masa simple, son gráficas de la serie acumulada de la variable original contra el tiempo. Para construir esta gráfica primero se define la serie acumulada S_t como:

$$S_t = \sum_{i=1}^t X_i \quad t = 1, 2, \dots, N$$

Una serie sin un cambio en la media tendrá una gráfica de masa simple similar a una línea recta, mientras que una serie con un cambio en la media causará una variación en la pendiente de la línea recta. Asimismo, una serie con una tendencia tendrá una gráfica de masa simple no lineal o curvilínea. Adaptado de (Smith & Campuzano, 2000).

7.2 Graficas de Doble Masa

Los métodos para aplicar la técnica de curva de doble masa a los datos hidrológicos y la forma en que se utilizan los resultados varían un poco con el tipo de datos que se analizan. Los registros de precipitación son importantes en los estudios hidrológicos que involucran tendencias. Antes de que los registros de precipitación sean usados en tales estudios, estos deben ser probados por la técnica graficas de doble masa, para asegurar que cualquier tendencia descubierta es debido a causas meteorológicas y no a cambios en la localización de la lluvia, al utilizar la curva de doble masa, suponemos que la relación entre las variables X y Y se puede expresar mediante una línea que tiene una ecuación de la

forma $Y = bX$, donde b es la pendiente de la curva de doble masa. Este supuesto es correcto principalmente para las relaciones que involucran datos de precipitación. La técnica de la curva de doble masa no se usa frecuentemente para probar la consistencia de los datos de estaciones distanciadas y con diferencias en elevación (Searcy & Hardison, 1960).

Una gráfica de doble masa es una gráfica de las sumas parciales de la serie a ser analizada contra las sumas parciales de la serie que se sabe que no tiene problemas. En este caso se asume que Y_t , $t = 1, 2, \dots, N$ representa la serie de datos libre de problemas de homogeneidad. Se definen entonces las siguientes series:

$$R_t = \sum_{i=1}^t Y_i \quad t = 1, 2, \dots, N$$

$$S_t = \sum_{i=1}^t X_i \quad t = 1, 2, \dots, N$$

La gráfica de Doble Masa es una gráfica de S_t contra R_t , para $t = 1, 2, \dots, N$. Si ninguna de las series tiene cambios en la media, la gráfica de Doble Masa es una línea recta

7.3 Graficas de Masa Residual

La curva de masa residual tiene las siguientes características: Se magnifican los cambios en la relación entre dos variables. Una ruptura en la curva de doble masa corresponde a un máximo o un punto mínimo en la curva de masa residual. Son gráficas de

las desviaciones acumuladas de las series promedias contra el tiempo (Searcy & Hardison, 1960).

7.4 Graficas de Caja

El diagrama de caja consiste en un rectángulo con lados superior e inferior en los niveles de los cuartiles, una línea horizontal agregada en el nivel de la mediana y bigotes de longitud 1,5 veces el rango intercuartil, agregados en la parte superior e inferior. Se basa en valores numéricos. Los puntos fuera de estos límites se delinean y son posibles valores atípicos (Benoit, 2011).

7.5 Gráficas S-S

La gráfica S-S es una gráfica de la serie a ser analizada contra otra serie (S-S). Si las dos series tienen el mismo número de observaciones y si cada valor de una serie corresponde a un valor específico de la otra serie, se dice que son series apareadas. Si ambas series tienen la misma media, la gráfica S-S parecerá una gráfica de datos dispersos alrededor de una línea de 45°. Si una serie tiene consistentemente valores más altos que la otra serie, los puntos de la gráfica S-S se concentrarán en la parte superior (o en la inferior) de la gráfica. La gráfica S-S indicará entonces si una serie tiene valores promedios más altos o más bajos que otra serie (Smith & Campuzano, 2000).

7.6 Análisis Aplicado

Los gráficos del análisis exploratorio, se desarrollaron para las series pluviométricas del mes de julio de 2018 registradas en pluviómetro Santa Inés y estación climatológica principal UPTC. La grafica de masa simple tiene una tendencia creciente, curvilínea y pendiente positiva, la gráfica de doble masa presenta pendiente positiva creciente sin quiebres, no es una línea recta, es decir, no presenta cambios en la media.

La gráfica de masa residual presenta tres partes distintas, primero un decrecimiento indicando que en la primera parte los registros de precipitación para el mes de julio de 2018, están generalmente por debajo del valor medio de la serie. Una segunda parte en la cual la gráfica de masa residual, fluctúa alrededor de un valor constante cercano a la media de la serie. Una tercera parte con valores crecientes los cuales se encuentran por encima del valor medio de la serie.

Las curvas de masa residual de los registros pluviométricos, evidencian que los residuos aumentan, disminuyen y fluctúan en la misma serie de tiempo, si bien la magnitud de lluvia residual no es la misma, se puede evidenciar que existe una correlación en su comportamiento. La grafica de caja indica que las dos sub series tienen una media cercana, La grafica S-S, muestra datos dispersos alrededor de la línea de 45, corroborando la cercanía entre la media de los datos de precipitación.

A través del análisis exploratorio se pudo establecer estadísticamente, la presencia de una correlación entre la series de datos de precipitación observados para el mes de julio

de 2018 entre el pluviómetro estación climatológica principal UPTC y pluviómetro Santa Inés. Esta tendencia puede darse, por la proximidad entre estos y similitud en elevación sobre el nivel del mar.

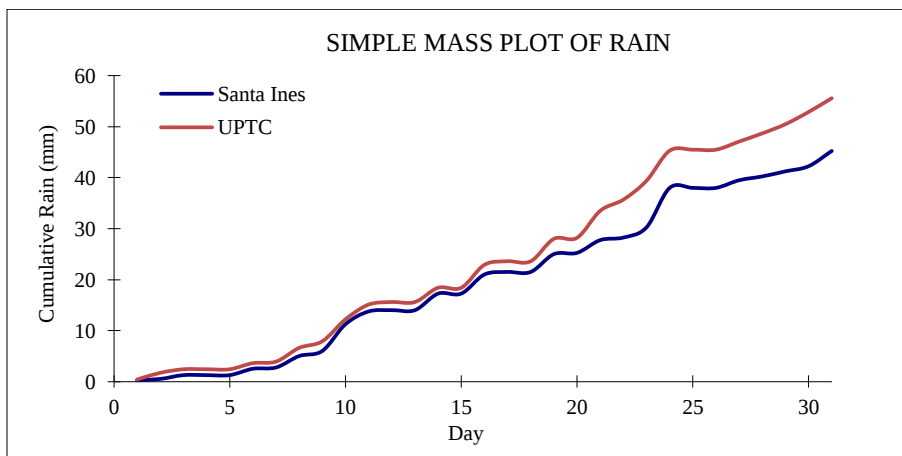


Figura 23. Grafica de masa simple. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).

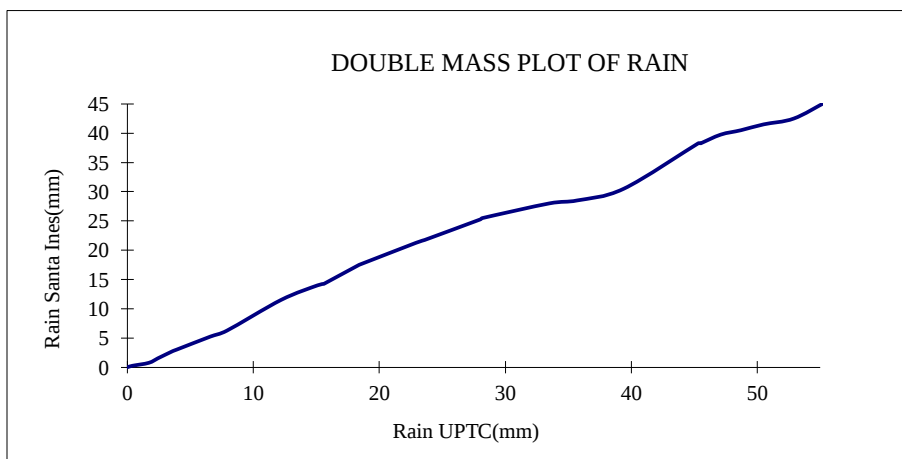


Figura 24. Grafica de doble masa. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).

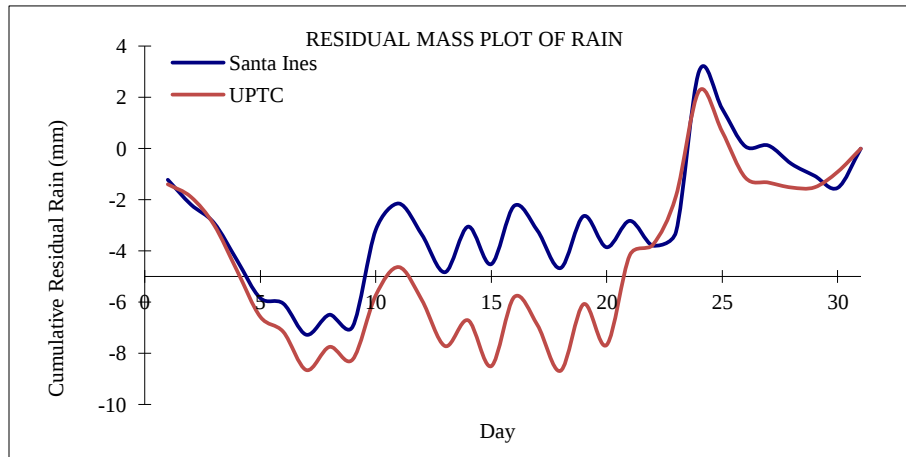


Figura 25. Grafica de masa residual. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).

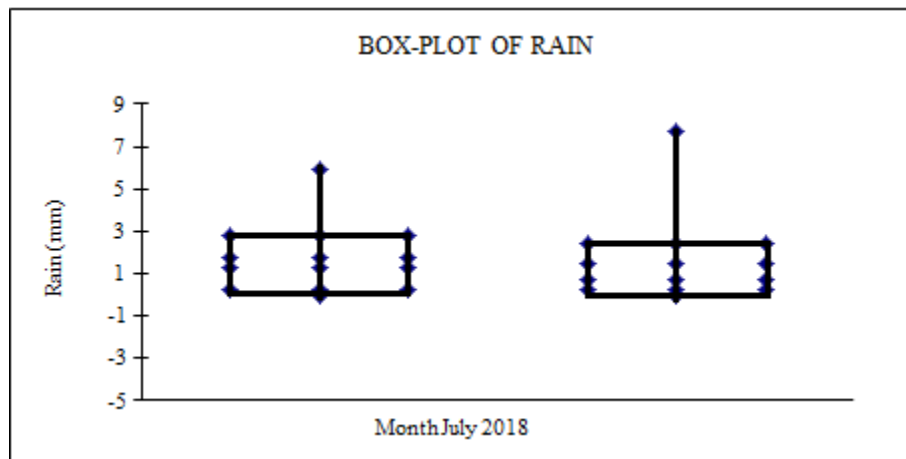


Figura 26. Grafica de caja. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).

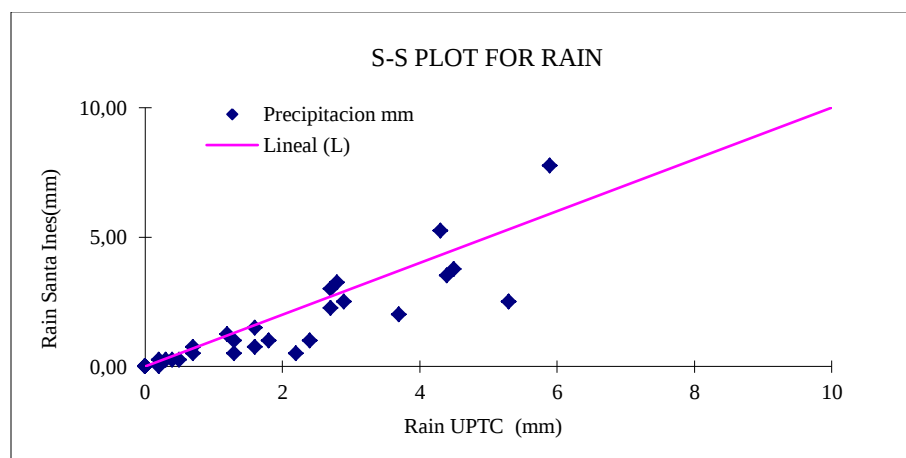


Figura 27. Grafica S-S. Pluviometro UPTC -Santa Inés.(Autor).

8. ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

Trabajar con un modelo hidrodinámico de la cuenca de estudio, permite la representación temporal para predecir el comportamiento o la evolución del sistema. De este modo, al no contar en la actualidad el sistema de alcantarillado del municipio de Tunja con un modelo hidrodinámico calibrado y validado, los resultados obtenidos (por ejemplo, en la generación de escorrentía vinculada a eventos de precipitación reales) no son representativos de la realidad del sistema.

El conocimiento de los volúmenes y de la evolución temporal de la escorrentía es fundamental para el análisis del sistema (proyección y ampliación de la red de drenaje, cuantificación del caudal de entrada a la PTAR, determinación de volúmenes de agua vertidos, etc.). Este modelo creado servirá como punto de partida para establecer posibles ampliaciones o rehabilitaciones de redes en las diferentes zonas urbanas de la ciudad de Tunja, y cuantificar los caudales generados que serán conducidos hacia un sistema de tratamiento de aguas residuales existente.

El prestador del servicio tendrá los resultados de este estudio, como base fundamental para realizar inversión en infraestructura, garantizando la optimización de los costos de su ejecución. Además, la calibración del modelo hidrodinámico de un sector de alcantarillado serviría como base preliminar para el análisis de la implementación de los parámetros calibrados de modelo en otras cuencas urbanas de características (físicas y meteorológicas) similares, en un proceso de trasposición de cuencas.

La existencia de un modelo hidráulico del sistema de drenaje, así como la calibración y validación de la cuenca urbana objeto de estudio, representan una gran ayuda para el diseño de las estructuras de regulación del sistema de alcantarillado combinado (Temprano & Tejero, 2002). El mejoramiento de la calidad de vida en el ámbito social y el desarrollo a escala humana, es parte integral de las políticas pendientes a desarrollar la visión de futuro. Es fundamental garantizar el correcto funcionamiento de la infraestructura de drenaje urbano, desarrollando estudios encaminados a la obtención de resultados que permitan tomar decisiones a mediano plazo y optimizar la infraestructura existente.

El principal beneficiario es el factor social de la zona de estudio, ya que esto permitirá la mitigación de riesgos de inundaciones, rebosamientos y colmatación de la red de drenaje contemplados con el desarrollo urbano de la ciudad. La investigación se desarrollará en áreas específicas del conocimiento como; la modelización hidráulica de drenaje urbano e hidrología urbana, las cuales son temáticas fundamentales dentro de las políticas institucionales de investigación encaminadas en contribuir de manera sostenible a la solución de problemáticas de ingeniería aplicada en el entorno local y regional.

8.1 Modelación de Sistemas de Alcantarillado

Gracias a la evolución computacional los posibles usos de los modelos se han ampliado en gran medida (Astaraie-Imani, Kapelan, Fu, & Butler, 2012). Desde los años 70, la modelación matemática se convirtió en una herramienta importante para el diagnóstico y diseño de sistemas de drenaje. Desarrollándose modelos matemáticos para resolver las ecuaciones de Saint Venant de manera completa (conservación de la masa y cantidad de movimiento) o simplificada (modelos difusivos y cinemáticos) (Macor & Pedraza, 2005). Los modelos son aproximaciones de sistemas reales, la confiabilidad de su representatividad dependerá de su buena estructuración matemática y qué tan bien haya sido parametrizado con información primaria (Hogue, Gupta, & Sorooshianc, 2006).

Existen a la fecha numerosos estudios desarrollados en distintas ciudades para la investigación y modelación de los sistemas de alcantarillado, Macor & Pedraza, (2005) realizaron un análisis sobre los efectos de la discretización en la simulación de escorrentía urbana, deduciendo que la escala de simplificación espacial influye significativamente en los resultados de simulación del software SWMM, utilizando mayor simplificación en las zonas de aportación de la cuenca y red de drenaje, se obtuvieron errores relativos en caudales pico mayores al 20 %, generando la forma del hidrograma simulado con el observado. A través del método de Carter (1961) se estimó el tiempo de concentración total de la cuenca urbana, calculado en 21.60 minutos, se tuvo en cuenta la pendiente media ponderada de subcuencas y la longitud principal de flujo,

Un estudio elaborado por el departamento de hidráulica facultad de ingeniería en la Universidad Nacional del Nordeste-Argentina, denominado “Hidrología Urbana: Instrumentación y Evaluación del Escurrimiento Superficial en una microcuenca de Resistencia, Chaco” en donde se establecieron herramientas metodológicas para medir, evaluar variables y características de la hidrología urbana, seleccionando una zona de estudio, su representatividad, tamaño, homogeneidad, importancia de los suelos, disponibilidad de datos y facilidad de acceso. Concluyeron que la obtención de hidrogramas de escurrimiento superficial urbanos, resulta un trabajo complejo y costoso, determinando variables sensibles que pueden inducir errores en la magnitud de resultados como lo son la definición de porcentajes de impermeabilidad y delimitación de las zonas de aportación (Ruberto, Depettris, & Kutnich, 2010).

Un ejemplo en Colombia es el desarrollado en la Universidad de los Andes, denominado “Modelación Hidrológica y Ambiental de una Subcuenca de la Ciudad de Bogotá”, proyecto financiado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. El caso de estudio fue la subcuenca El Virrey, la zona se instrumentó, para obtener información hidrológica, hidráulica. Determinando que la calibración del modelo hidrodinámico, pudo obtener buenos ajustes en la simulación de parámetros de calidad con respecto a las series observadas (Díaz Granados & Camacho, 2001).

(Seco & Gómez Valentín, 2012) llevaron a cabo un estudio que tuvo como objetivo la obtención de patrones de calidad específicos del comportamiento del sistema de alcantarillado de un sector de la ciudad de Granollers, en la Comunidad autónoma de Cataluña, España. Allí se hizo la calibración hidrodinámica de la red unitaria con datos de

episodios de lluvia obtenidos en el programa de monitorización, llevado a cabo entre los meses de mayo de 2010 a noviembre de 2011. Se utilizó el software SWMM 5.0, debido a la facilidad de acceso a esta herramienta. Las variables adoptadas de simulación se mostraron adecuadas al observar la calibración y validación del modelo hidrodinámico propuesto.

La literatura presenta varios procesos para ejecutar la calibración de los modelos de transformación lluvia-escorrentía. La eficiencia de este proceso está directamente relacionada con las variables del modelo tales como los sitios de monitoreo (su representatividad) y los eventos de lluvia (su variabilidad) aplicadas en la calibración (Arriero Shimma & Ribeiro Reis, 2014).

(Kourtis, Kopsiaftis, Bellos, & Tsihrintzis, 2017) desarrollaron la calibración de un modelo en SWMM, para la red de drenaje en el centro de Atenas-Grecia, utilizando un algoritmo genético, los resultados de simulación se evaluaron utilizando el error medio cuadrático (RMSE) y error medio absoluto. Los resultados de calibración y validación mostraron que el modelo SWMM pudo simular con bastante precisión la forma del hidrograma, el tiempo pico y descarga máxima en el alcantarillado combinado.

8.2 Modelo Lluvia-Esorrentía

El Stormwater Management Model (modelo de gestión de aguas pluviales) de la EPA (SWMM), es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones y calidad de agua principalmente en áreas urbanas (Environmental Protection Agency (EPA), 2015). SWMM trata cada cuenca como un depósito no lineal, este se obtiene mediante la combinación de la ecuación de continuidad y la ecuación de Manning para cada subcuenca (Huber, Dickinson, & Barnwell, 1988). En el modelo, una subcuenca se define como un área de suelo que contiene su propia fracción de superficies impermeables y permeables, cuya esorrentía drena a un punto de salida, que podría ser un sumidero u otra subcuenca (Rossman, 2010).

El módulo de transporte de SWMM encauza esta esorrentía a través de un sistema de tuberías, canales, que incluye estructuras de un sistema de drenaje como; dispositivos de almacenamiento, bombas y reguladores. SWMM permite realizar el seguimiento de la velocidad, profundidad de flujo y de la calidad de agua en cada colector durante un período de simulación multitemporal (United States Environmental Protection Agency EPA, 2016).

Existen diferentes caudales de salida tales como la infiltración, la evaporación y la esorrentía superficial. La esorrentía superficial por unidad de área, Q , se produce únicamente cuando la profundidad del agua en este “depósito” excede el valor del máximo almacenamiento en depresión (d_s o D_{store}), el cual corresponde al volumen de agua que puede almacenarse en depresiones naturales en la superficie del suelo permeable o impermeable, alusivo a encharcamientos. El caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning (Environmental Protection Agency (EPA), 2005).

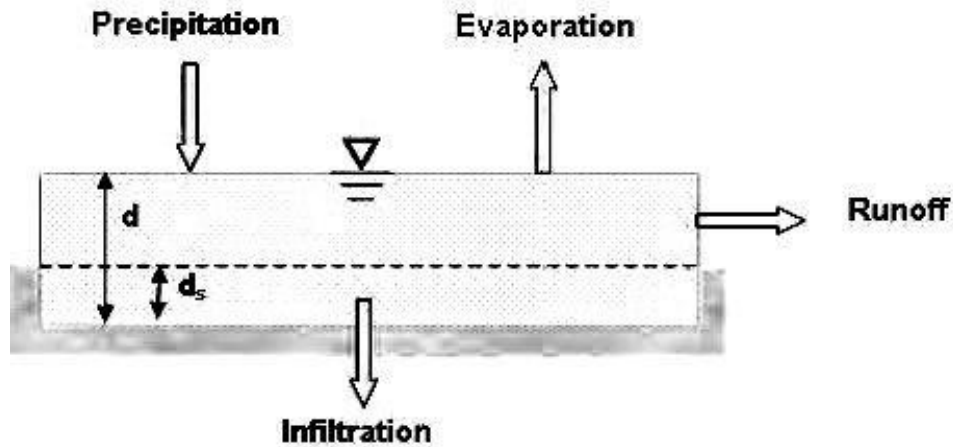


Figura 28. Visión Conceptual del fenómeno de la escorrentía en SWMM. Adaptado de: (Environmental Protection Agency (EPA), 2015).

8.3 Parametrización SWMM

Los parámetros de entrada de los modelos basados en procesos físicos como SWMM, a menudo corresponden a las propiedades físicas de la zona. La mayoría de los parámetros de control de SWMM, se pueden extraer de capas de Sistemas de Información Geográfica (GIS), por ejemplo, área de la subcuenca y pendiente superficial. El n de Manning, o coeficiente de rugosidad de la superficie, determina la tasa de escorrentía terrestre desde una subcuenca. Un mayor valor de n produce una menor tasa de escorrentía y prolonga la duración del flujo en el tiempo (Sun, Hall, Hong, & Zhang, 2014). Este estudio busca determinar parámetros físicos para cada subcuenca analizada del distrito Santa Inés zona 1, los cuales se señalan a continuación.

8.3.1 Área y pendiente subcuenca

El distrito Santa Inés zona 1, se caracteriza por tener un alto índice de urbanización con respecto a otros sectores de la ciudad de Tunja. Su topografía es plana, con una pendiente promedio de 0.47 % y un área de 15.96 Ha. Desagregada en 56 subcuencas.

8.3.2 Ancho de subcuenca

Si la subcuenca se considera como un plano rectangular inclinado, cuyo flujo superficial transita pendiente abajo, entonces el ancho de la subcuenca es el ancho físico del escurrimiento en el plano (Figura 29. a) puede calcularse como:

$$W = \frac{A}{L}$$

Dónde: A es el área de la subcuenca y L, la longitud media del flujo (Macor J. L., 2002).

Si la subcuenca se idealiza como dos áreas simétricas aportantes a un conducto principal (Figura 29. b), el ancho total es dos veces la longitud del conducto de drenaje (Macor J. L., 2002).

$$W = 2 * L$$

Dónde: L es la longitud media del flujo o longitud del conducto de drenaje. No obstante, las subcuencas urbanas generalmente no tienen propiedades de simetría y

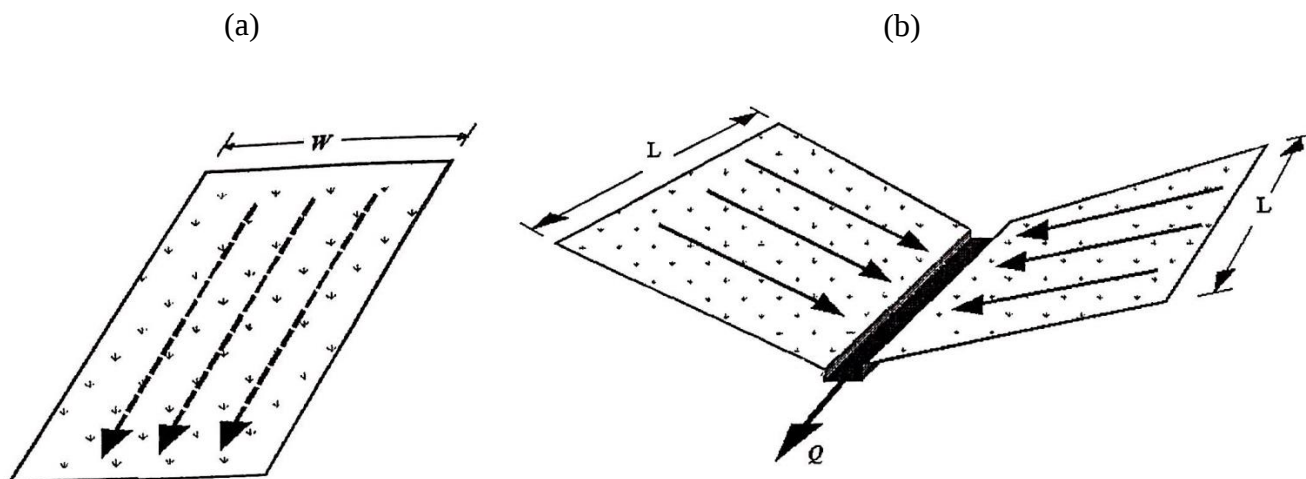
uniformidad (Figura 29. c), para esta condición se recurre a determinar un factor de sesgo (Digiano, Adrian, & Mangarella, 1977), el cual se calcula de la siguiente forma:

$$S_k = \frac{(A_2 - A_1)}{A}$$

Siendo S_k el factor de sesgo, $0 \leq S_k \leq 1$, A_1 el área menor de un lado del conducto de drenaje, A_2 el área mayor del otro lado del conducto, y A el área total de la subcuenca.

W se determina como:

$$W = \frac{(2 - S_k)}{L}$$



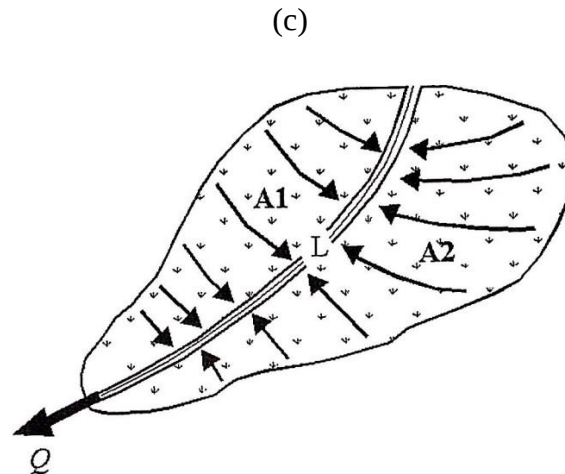


Figura 29. Ancho de cuenca, a) esquema en un plano, b) planos simétricos, c) planos asimétricos. Adaptado de: (Universidad Nacional del Litoral-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, 2015).

En la construcción del modelo hidrodinámico Santa Inés zona 1. La cuenca se desagregó a una escala de detalle, obteniendo 56 subcuencas de drenaje, para las cuales se calculó el ancho de cuenca acorde a las tres condiciones físicas y de drenaje expuestas anteriormente. Las subcuencas se trazaron, teniendo en cuentas los puntos de salida o sumideros existentes conectados al sistema de alcantarillado.

8.3.3 Porcentaje de impermeabilidad

Para cada una de las 56 subcuencas, se determinó el porcentaje de impermeabilidad, trazando polígonos del área permeable sobre una imagen aérea de la zona de estudio, calculando el porcentaje equivalente con respecto al área total de subcuenca. El porcentaje de área impermeable de la zona 1 representa el 71.70 %.

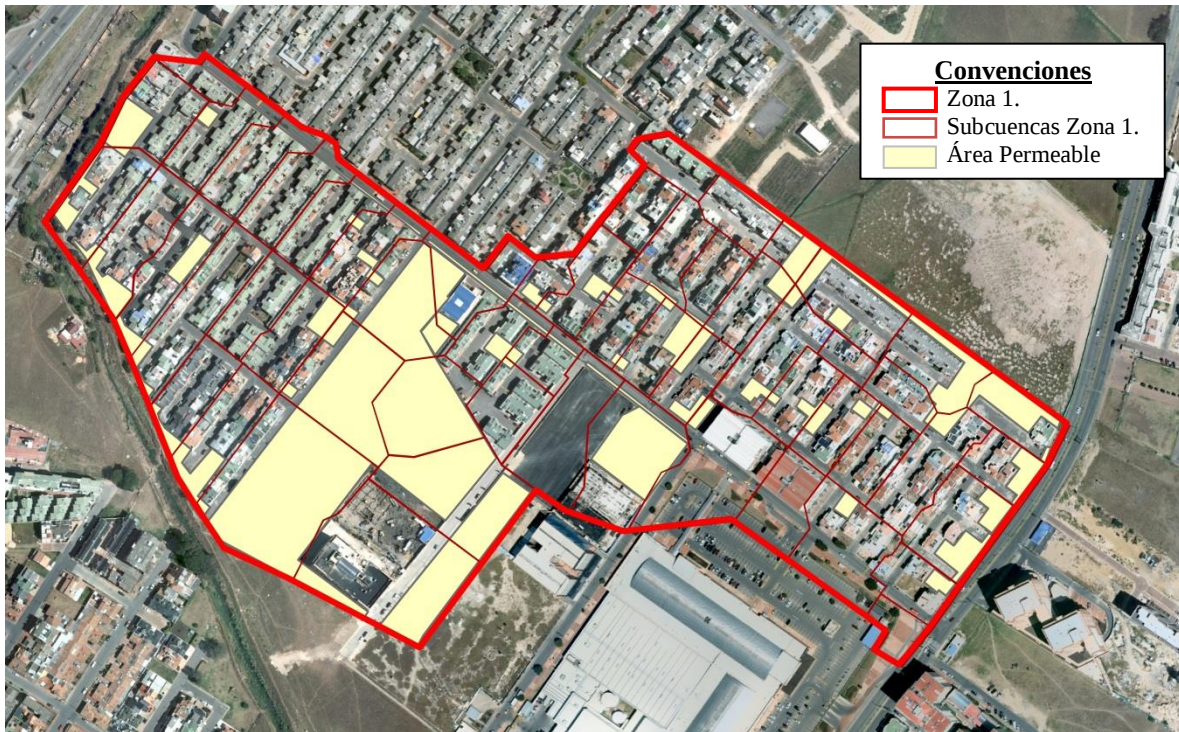


Figura 30. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 1.subcuencas y área permeable (Autor.)

8.3.4 Numero de curva

Siguiendo el proceso, necesario para la caracterización de las subcuencas del sistema de drenaje, se hace un reconocimiento sobre el tipo de superficie que cubre el área de las mismas, utilizando como herramienta el plano temático de uso del suelo, el plano de cobertura y el de grupo hidrológico el cual se basa en el tipo de suelo. En forma inicial, los suelos son agrupados en categorías, dependientes del potencial de escorrentía y de su capacidad de infiltración. La agrupación de los suelos se hace teniendo en cuenta la siguiente clasificación: (Soil Conservation Service SCS, 1989).

Grupo A. Suelos con bajo potencial de escorrentía y alta infiltración, aunque esté completamente húmedo. Su profundidad es especialmente grande. Es el caso de arenas o

gravas excesivamente drenadas, o suelos que tengan una razón alta de transmisión de agua (mayor a 7.62 mm/hora). Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B. Suelos con infiltración moderada aun completamente húmedo. Son suelos que van de moderadamente profundos a profundos. Suelos bien drenados con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Tiene una razón de transmisión de agua moderada (3.81 a 7.62 mm/hora). Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C. Suelos con baja infiltración, aunque estén completamente húmedos, y consisten en suelos que tienen una capa que impide el movimiento descendente de agua. Son suelos con textura moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja razón de transmisión de agua (1.27 a 3.81 mm/hora). Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D. Suelos con un alto potencial de escorrentía, ellos tienen una muy baja capacidad de infiltración, aun en condiciones de total humedad. Consisten principalmente de suelos arcillosos con un alto potencial de expansión, suelos con nivel freático permanentemente alto, suelos con una capa de arcillas en la superficie, suelos poco profundos sobre materiales impermeables cercanos. Estos suelos tienen una razón de transmisión de agua muy baja (0.0-1.27 mm/hora).

Tabla 4.

Valores de CN de escorrentía para áreas urbanas, cubiertas de suelos en condiciones de humedad previa

$I_a=0.2S$

Descripción de la cubierta		Numero de Curva grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Prados cubiertos permanentemente con hierba		30	58	71	78
Suelo desnudo		77	85	91	93
Pavimentos incluyendo andén		83	89	92	93
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Distritos Residenciales:					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable				
1/8 acre o menos	65	78	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
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89

Nota. Fuente: (Soil Conservation Service SCS, 1989).

Las áreas permeables de la cuenca de estudio, están conformadas principalmente por prados cubiertos permanentemente con hierba, superficies que no se encuentran conectadas al sistema de alcantarillado, presentando un bajo potencial de escorrentía y facilitando la infiltración, clasificándose en grupo hidrológico A.

8.3.5 Área conectada directamente (%) zero-imperm

Este parámetro se relacionó a la superficie que conforman las vías de la zona de estudio, cuyo drenaje presenta la condición de conexión directa al sistema de alcantarillado a través de sumideros. Este parámetro representa el 35.33 %. La superficie total impermeable de la zona de estudio es del 71.70 %.

Este estudio busca determinar los parámetros físicos para cada subcuenca analizada en el distrito de Santa Inés, zona 1, que se presentan a continuación en (Tabla 5)

Tabla 5.
Parámetros determinados para cada subcuenca analizada.

No	Parámetro	Valor o Rango	Unidad
1	Área (Ha)	15.96	ha
2	Pendiente (%)	0.015-2.87	%
3	Porcentaje de Impermeabilidad (%)	71.70	%
4	Área conectada directamente (%) Zero-Imperm	35.33	%
5	Ancho (m)	23.50-251.56	m
6	Número de Curva CN	35.6-90.8	-

8.3.6 Pérdidas por evaporación

La tasa de evaporación depende de factores meteorológicos y de las características de la superficie. A su vez, se ve influenciada en parte por el contenido de humedad en la masa de aire que circunda a la superficie de evaporación (Fattorelli & Fernandez, 2011), para determinar la tasa de evaporación, se tomaron los registros de evaporación media total mensual multianual de la estación climatológica UPTC, siendo esta la más cercana a la zona de estudio. Para determinar un valor constante de evaporación, se promediaron los datos de los meses de monitoreo de lluvias. Este valor se incluyó dentro del modelo hidrodinámico de la red de drenaje.

Tabla 6.
Evaporación media total mensual multianual de la estación climatológica UPTC

Evaporación	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
Media/mensual (mms)	86.8	92.8	100	102
Media/diaria (mm/d)	2.89	3.09	3.33	3.40
Promedio (mm/d)	3.18			

Nota: Datos suministrados por Ideam solicitud 20181121105816.

8.4 Criterios Estadísticos de Evaluación

La aplicación de un modelo hidrodinámico para un sistema de drenaje generalmente determina el flujo máximo, tiempo pico, volumen y forma del hidrograma. Para aceptar los resultados del proceso de calibración y validación, los criterios de evaluación utilizados fueron; error relativo (RE) en el flujo máximo, tiempo pico y volumen del hidrograma, el error medio cuadrático (RMSE) para los caudales simulados y observados (Choi & Ball, 2002). Además, el coeficiente de variación (S), el cual representa una forma normalizada de RMSE. Algebraicamente los criterios fueron:

8.4.1 Error relativo RE

Se llama error relativo (RE) de una aproximación al cociente entre el error absoluto y el valor exacto de una magnitud, es decir, para una variable x arbitraria (Kreinovich, 2013).

$$RE = \frac{x_o - x_s}{x_o}$$

Donde, x_o es el valor observado de un hidrograma característico y x_s es el valor simulado del mismo.

8.4.2 Error medio cuadrático RMSE

El error cuadrático medio (RMSE) (también llamado desviación cuadrática media, RMSD) es una medida determinada de la diferencia entre los valores observados en campo y simulados por un modelo. Estas diferencias individuales también se denominan residuos y el RMSE sirve para agregarlos en una sola medida de poder predictivo. Algebraicamente se define como; la raíz cuadrada de la media de las diferencias cuadradas entre los valores correspondientes a observaciones y pronósticos (Barnston, 1992).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_s(i)]^2}{n}}$$

Dónde: $Q_s(i)$ y $Q_o(i)$ son el caudal simulado y observado en la descarga respectivamente, y, n es el número de observaciones en la serie de tiempo.

El valor RMSE indica la medida en que las simulaciones están sobre-estimando o sub-estimando valores observados, cuanto menor sea el valor RMSE, más cerca estarán los resultados de las simulaciones a los datos observados (Liu, Egodawatta, Guan, & Goonetilleke, 2013). Una vez realizado el proceso de calibración, se adoptó como criterio de validación del modelo que los errores relativos del caudal pico, tiempo pico y volumen total de descarga fueran simultáneamente inferiores al 20 % (Alley, 1986).

8.4.3 Coeficiente de variación (S)

El coeficiente de variación (S) representa una forma normalizada de RMSE. El coeficiente de variación es una calificación que permite a los usuarios evaluar la calidad estadística de las estimaciones (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2008). El coeficiente de variación en el rango de 0.1-0.2 indica un modelo bien calibrado (DHI Water, Environment & Health, 2014).

$$S = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_s(i)]^2}{n}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n Q_o(i)}$$

8.5 Calibración de Modelo SWMM

Calibración: Según Cesario es el proceso de ajuste de un modelo hasta que es capaz de simular las condiciones que prevalecen en el sistema para un horizonte de tiempo determinado (Cesario, 1995). Por otra parte, Walski, Chase, Savic, Grayman, Beckwith, & Koelle, 2003 definieron que; es el proceso de comparar los resultados de un modelo con la información recopilada en campo, generalmente es necesario ajustar los datos que describen el sistema hasta que el comportamiento simulado este de acuerdo razonablemente con el comportamiento observado para diferentes condiciones de operación. La literatura presenta varios procesos para ejecutar la calibración de los modelos de transformación lluvia-escorrentía.

8.5.1 Selección eventos de calibración

A través del análisis exploratorio se pudo establecer estadísticamente, la presencia de una correlación entre la series de datos de precipitación observados para el mes de julio de 2018 entre el pluviómetro estación climatológica principal UPTC y pluviómetro Santa Inés, es decir que los datos de los eventos de lluvias registrados son válidos. Idealmente, el número de eventos utilizados para la calibración debe ser mayor que el número de parámetros de ajuste. Para modelos lluvia-escorrentía urbanos, se recomienda usar al menos 3 eventos (DHI Water, Environment & Health, 2014).

El uso de más eventos en la calibración con diferentes tamaños aumentará la confiabilidad del modelo, mejorando su rendimiento entre el balance de volumen general y los picos de los hidrogramas. Generalmente, en el proceso de calibración se utilizan registros de flujo continuo y el objetivo es obtener un balance de volumen general, los hidrogramas deben asemejarse tanto en forma como en magnitud. Para los modelos que contribuyan al desarrollo de estructuras de control de inundación y gestión general de agua, los criterios más importantes son el flujo máximo, la sincronización de los tiempos pico y los volúmenes totales (DHI Water, Environment & Health, 2014).

Se procedió a analizar los registros de lluvia continua, individualizando 6 eventos de precipitación y se clasificaron por fecha y tamaño, teniendo en cuenta los datos observados de caudales a la salida de la cuenca urbana. Se adoptó como criterio utilizar los 3 primeros eventos registrados para el proceso de calibración, estos presentan diferente magnitud y tiempo de duración, por otra parte, los 2 eventos restantes se usaron para validación, el

evento del 13 de septiembre que registró la mayor magnitud, se usó para chequeo hidráulico.

Tabla 7.
Eventos seleccionados para calibración

Suceso de Lluvia	Lluvia Total (mm)	Duración (minutos)	Función del evento
16-jul-18	3.75	35	Calibración
24-jul-18	3.25	35	Calibración
29-30-ago-18	13.52	245	Calibración

8.5.2 Selección de parámetros de calibración

Los parámetros que se ajustan en la calibración son generalmente los que no pueden evaluarse directamente a partir de datos de campo, este estudio se basa en los hidrogramas de alcantarillado reales medidos en la descarga principal de la cuenca urbana, este estudio de caso calibra parámetros asociados a las pérdidas iniciales hidrológicas y coeficientes de rugosidad, tales como; almacenamiento de la depresión (D_{store}) para coberturas permeables e impermeables, el n de Manning para superficies permeables e impermeables, el n de Manning para las tuberías del sistema de drenaje (Roughness).

8.5.3 Resultados de calibración

En la tabla 8. se presentan los valores de los parámetros de ajuste que se utilizaron en el desarrollo de la calibración del modelo, es necesario mencionar que el valor obtenido para el almacenamiento de la depresión (Dstore) impermeable fue 0.5 mm, este valor presentó una baja magnitud, posiblemente porque los suelos de la zona de estudio conservaron una humedad antecedente, debido a la temporada de lluvias registrada entre los meses de julio a noviembre de 2018, reduciendo sustancialmente la capacidad de infiltración de la superficie y generando una respuesta hidrológica rápida.

Tabla 8.
Parámetros de ajuste, calibración de modelo hidrodinámico.

Parámetro de ajuste	Valor	Unidad
Dstore-perv:	2.4	mm
Dstore-Imperv:	0.5	mm
n Manning concreto	0.016	-
n Manning PVC	0.011	-
N Perm:	0.065	-
N Imperv	0.022	-

Los coeficientes de rugosidad fueron ajustados teniendo en cuenta rangos de valores típicos establecidos en la bibliografía para diferentes superficies impermeables y permeables como; concreto pulido con grava de fondo, adoquín, pavimento en concreto acabado áspero, pavimento asfáltico textura áspera, matorrales de baja densidad, arbustos y pastos. Se adoptó como criterio de validación del modelo que los errores relativos del caudal pico, tiempo pico y volumen total de descarga fueran simultáneamente inferiores al 20 %. Coeficiente de variación (S) en el rango de 0.1-0.2.

En la tabla 9. se presentan los resultados de calibración, obteniendo valores admisibles dentro de los criterios de bondad adoptados, por otra parte, los resultados del RMSE presentaron un buen equilibrio de caudales entre los hidrogramas simulados y observados para los diferentes eventos de calibración. Además, se calculó el coeficiente de escorrentía teniendo en cuenta el balance hidrológico de la cuenca, obteniendo buenos resultados comparativos para el proceso de calibración y validación.

Tabla 9.
Resultados de calibración, tiempo pico, caudal pico y volumen total.

Variable	16-jul-18		24-jul-18		29-30-ago-18		Unidades
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	Observado	Simulado	
Tiempo Pico (T_p)	40	40	40	40	75	75	min
Caudal Pico (Q_p)	161.13	163.76	140.72	133.49	219.63	244.96	L/s
Volumen Total (V_T)	368826.0	336984.0	345891.0	291825.0	1350384.0	1329891.0	L
Precipitación Efectiva	2.233648	2.111429	2.089945	1.828477	7.920011	8.332650	mm
Coeficiente Escorrentía (C_e)	0.60	0.56	0.64	0.56	0.59	0.62	-
Criterios Estadísticos de Evaluación							
RE (T_p)	0.00		0.00		0.00		%
RE (Q_p)	-1.63		5.14		-11.53		%
RE (V_T)	8.63		15.63		1.52		%
RMSE (Q)	9.22		8.31		10.34		L/s
S (Q)	0.165		0.195		0.152		-

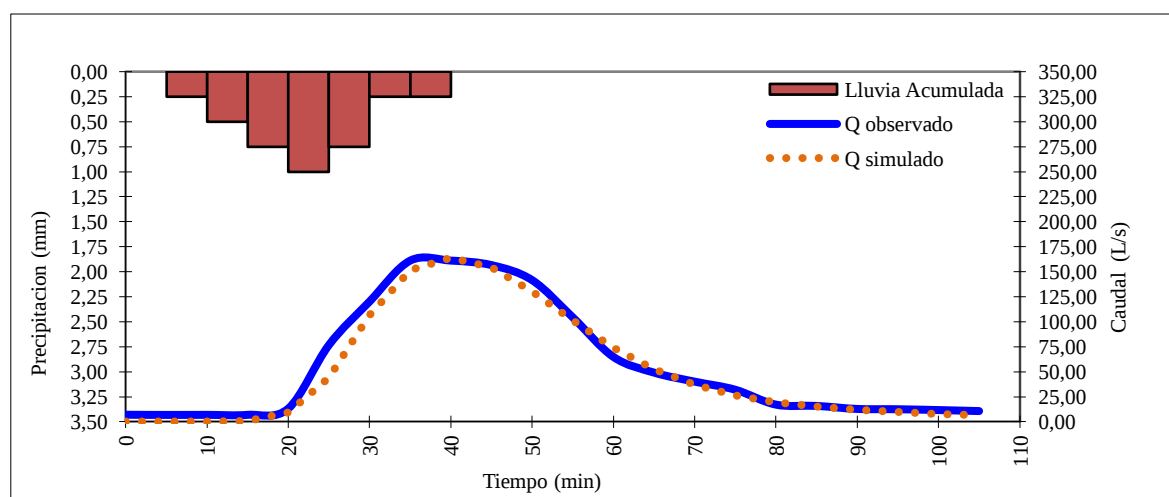


Figura 31. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 16-jul-2018.

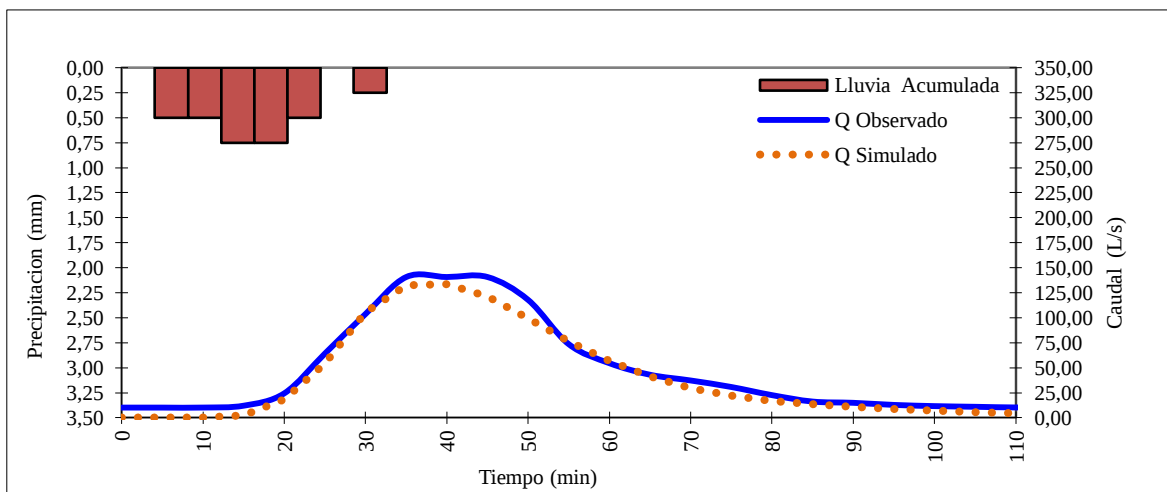


Figura 32. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 24-jul-2018.

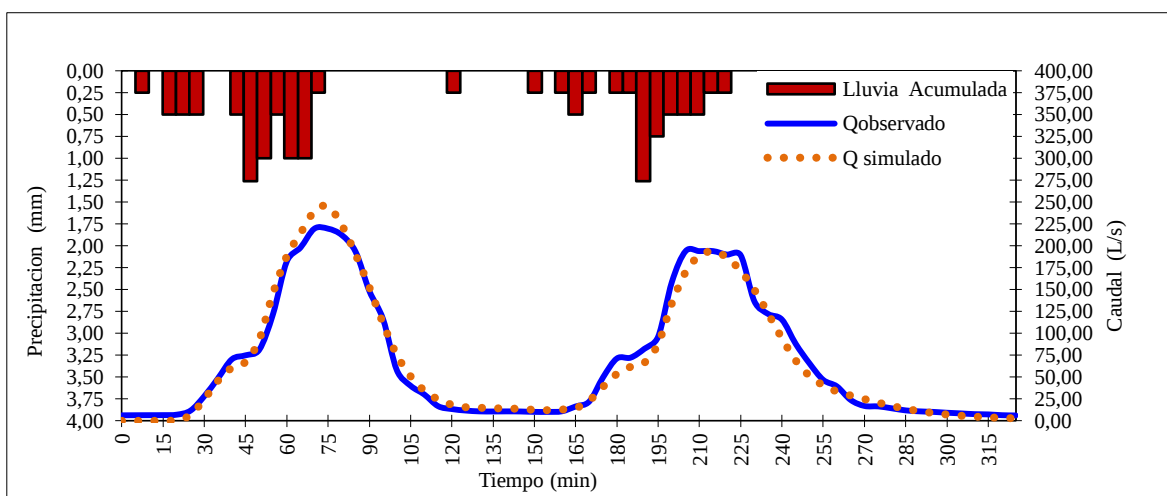


Figura 33. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 29-30-jul-2018.

8.6 Validación de Modelo SWMM

“La validación de un modelo computacional es un proceso para formular y documentar la aplicabilidad de los resultados del modelo en relación con el sistema natural que se quiere representar. Su propósito es confirmar que el modelo corresponda con la realidad física que se quiere modelar, es decir, que las predicciones realizadas sean lo

suficientemente confiables para ser usadas en la toma de decisiones” (Ditmars, Adams, Bedford, & Ford, 1987).

La validación se refiere a verificar la precisión de un modelo bajo diferentes eventos a los utilizados para la calibración. El rendimiento del modelo en el proceso de validación se suele cuantificar utilizando medidas de bondad o criterios estadísticos de evaluación usados en el proceso de calibración (Niazi, y otros, 2017). A continuación, se presentan los eventos seleccionados para validación.

Tabla 10.
Eventos seleccionados para validación.

Suceso de Lluvia	Lluvia Total (mm)	Duración (minutos)	Función del evento
15-oct-18	9.52	80	Validación
22-23-oct-18	8.00	235	Validación

Tabla 11.
Resultados de validación, tiempo pico, caudal pico y volumen total.

Variable	15-oct-18		22-23/10/2018		Unidades
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	
Tiempo Pico (T_p)	70	65	45	50	min
Caudal Pico (Q_p)	266.66	307.9	146.11	142.81	L/s
Volumen Total (V_T)	947721.0	903975.0	855849.0	771645.0	L
Precipitación Efectiva	5.761435	5.664004	4.843504	4.834868	mm
Coefficiente Escorrentía (C_e)	0.61	0.59	0.61	0.60	-
Criterios Estadísticos de Evaluación					
RE (T_p)	7.14		-11.11		%
RE (Q_p)	-15.47		2.26		%
RE (V_T)	4.62		9.84		%
RMSE Q	19.56		7.45		L/s

En los resultados de validación, se obtuvieron errores relativos (RE) para caudal pico, tiempo pico y volumen del hidrograma inferiores al 20 %, los resultados del RMSE

presentaron buen equilibrio de caudales entre los hidrogramas simulados y observados para los eventos de validación, no superando un caudal de 20 L/s.

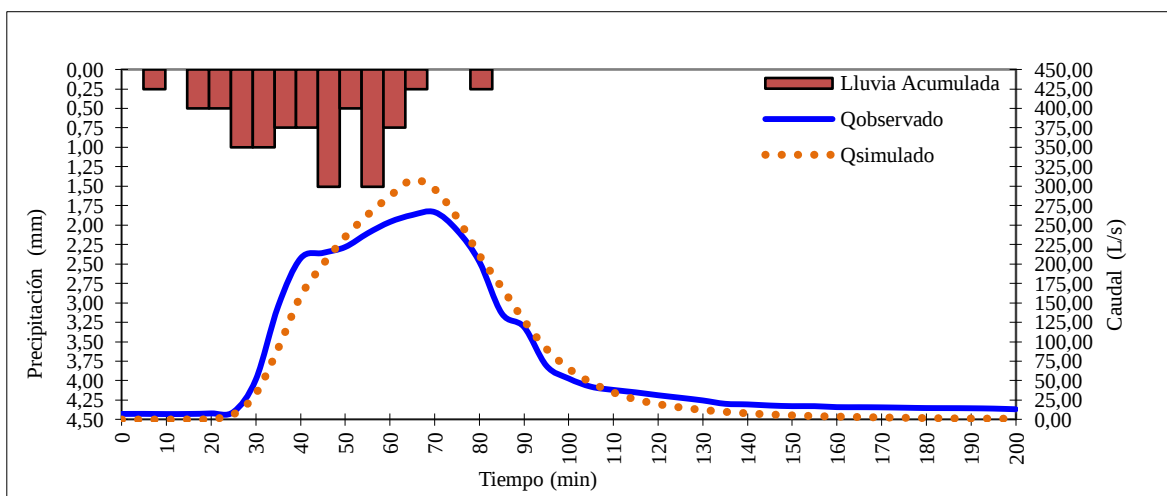


Figura 34. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 15-oct-2018.

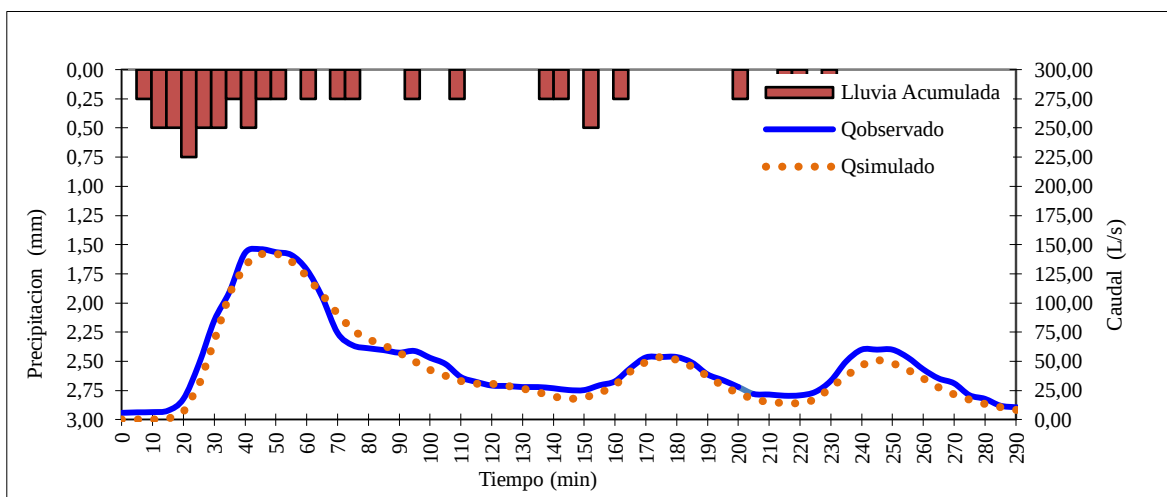


Figura 35. Hidrogramas observados y simulados evento de lluvia 29-30-oct-2018.

8.7 Chequeo Hidráulico Modelo SWMM

En la zona de estudio, distrito Santa Inés, el día 13 de septiembre de 2018 se produjo una precipitación total de 22.22 mm con una duración de 185 minutos, lo que generó que el sistema entrara en carga, el sensor SVS registro láminas de flujo desde las 5.45 pm hasta las 6.00 pm. Según el modelo calibrado y validado, la condición de carga en el sistema se presentó durante 15 minutos, es decir desde el minuto 35-50 de simulación. Obteniendo así similitud en el tiempo de duración de la condición real de carga en tuberías y los resultados del modelo en SWMM.

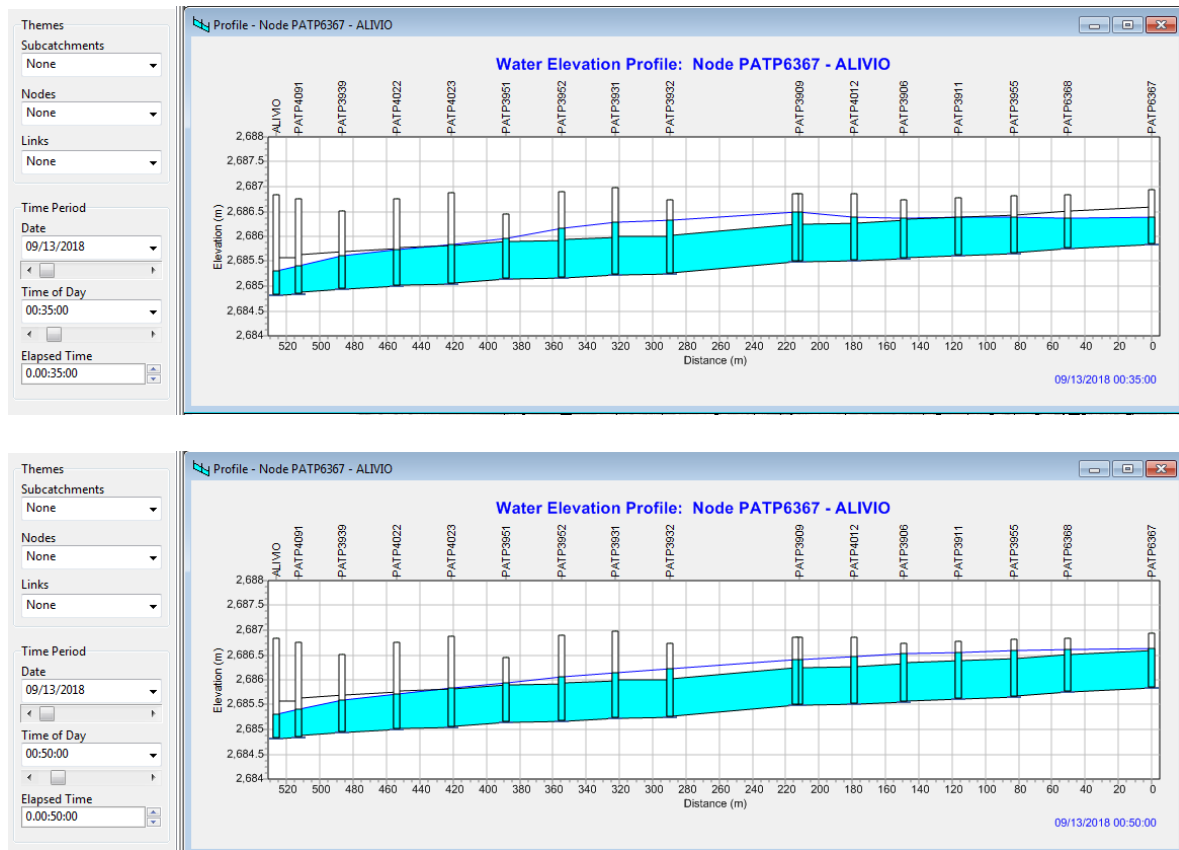


Figura 36. Perfil hidráulico general minuto 35-50, condicion tuberías en carga. Chequeo hidráulico modelo Santa Inés Zona 1. SWMM 5.0.

Se pudo concluir que el modelo hidrodinámico construido para la zona 1. Santa Inés, reproduce de manera adecuada la evolución de los caudales, además, de presentar un buen ajuste en los tiempos de respuesta hidrológica.

Por otra parte, el modelo hidrodinámico, logró establecer que la estructura de separación o aliviadero, permite el ingreso de 232.50 l/s al interceptor de aguas residuales, antes que el flujo supere la cresta del vertedero de separación, identificando plenamente una condición operativa desfavorable. Permitiendo así un alto ingreso de caudal pluvial al interceptor, que debe conducir principalmente aguas residuales.

En las redes unitarias de drenaje, durante los periodos de lluvia hay un aumento de caudal, acompañado por una reducción en la carga orgánica por unidad de volumen, o sea, una dilución del agua residual ocasionada por la incorporación a ésta del agua lluvia. Por lo tanto, la estructura de alivio debe tener la capacidad para ajustar tanto la punta de caudal como el efecto de dilución del agua residual (Alpresa Calvillo, 2006).

9. DIAGNOSTICO HIDRÁULICO Y ALTERNATIVAS DE SOLUCION

9.1 Transposición de Cuencas

(Wang, y otros, 2012) Plantearon una comparación de modelos de calibración aplicados en sitio único y multi-sitio, se llevó a cabo el protocolo de sitio único utilizando sólo los datos observados a la salida de la cuenca, mientras que el protocolo multi-sitio se realizó utilizando los datos de tres sitios diferentes distribuidos espacialmente en el sistema. Se concluyó que un protocolo de calibración de un solo sitio puede ser ajustado para ejecutar análisis de calibración en diferentes zonas.

Con el fin de realizar un análisis hidráulico de la totalidad de la zona de estudio, se procedió a ejecutar un proceso de transposición de cuencas, en donde los parámetros calibrados obtenidos para la zona 1, se incluyeron dentro de la modelación hidráulica de la zona 2 Santa Inés. Este procedimiento se implementó en este estudio de caso, considerando que la zona 1 y 2 presentan similitud en características físicas de drenaje tales como; usos de suelo, tipos de cobertura permeable e impermeable, topografía plana, por otra parte, las tuberías del sistema de alcantarillado registran tiempos aproximados de operación.

Los parámetros físicos y características de subcuenca para la zona 2, se determinaron teniendo en cuenta la metodología de cálculo expuesta en el capítulo 8.3 Parametrización SWMM. La zona 2 se desagregó en 26 subcuencas, con una pendiente

promedio del 0.39 % con un área total 5.93 Ha. El área impermeable total representa el 91 %.



Figura 37. Cuenca Urbana delimitada red de drenaje Santa Inés. Zona 2, subcuencas y área permeable (Autor.)

9.2 Marco Técnico Normativo

El Ministerio de vivienda ciudad y territorio de la república de Colombia, ha establecido manuales y criterios técnicos de buenas prácticas de ingeniería para la proyección de infraestructura de agua potable y saneamiento básico. A través de la Resolución 0330 de 2017, recopilo criterios de diseño y evaluación hidráulica para

alcantarillados combinados, sanitarios y pluviales, derogando resoluciones de años anteriores, como por ejemplo la resolución 1096 de 2000.

9.2.1 Periodo de retorno

Con el fin de realizar la evaluación hidráulica al sistema de alcantarillado existente, se selecciona una lluvia de diseño asociada a un periodo de retorno de acuerdo a la importancia de las áreas, daños y perjuicios que las inundaciones puedan generar a los habitantes, tráfico, infraestructura, comercio e industria. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Tabla 12.
Periodos de retorno

Características del área de drenaje	Periodo de retorno (años)
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 hectáreas	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales, con áreas tributarias menores de 2 hectáreas	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 hectáreas	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores de 10 hectáreas	10

Nota: Tabla 16 Artículo 135 Adaptado de (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

El distrito Santa Inés (zona 1 y 2) tiene un área total de 21.89 Ha, entonces según lo establecido en la normatividad técnica vigente, se debe realizar la evaluación hidráulica para una lluvia con magnitud equivalente a un periodo de retorno de 10 años.

9.2.1 Velocidad máxima en tuberías y capacidad hidráulica.

Las aguas combinadas transportan sólidos que pueden depositarse en los colectores si el flujo tiene velocidades reducidas. Por lo tanto, debe disponerse de una velocidad suficiente para lavar los sólidos depositados durante periodos de caudal bajo, es decir tiempos secos. Para esto se establece la velocidad mínima como criterio de diseño. La velocidad mínima real permitida en el colector es 0,75 m/s para el caudal de diseño. Velocidad máxima como criterio de diseño es 5.0 m/s. La profundidad hidráulica máxima en colectores de aguas lluvias es del 93 % del diámetro real interno. (Adaptado de Resolución 0330 de 2017).

9.3 Hietograma de Diseño

9.3.1 Curvas intensidad-duración- frecuencia

En el capítulo 7.6 Análisis Aplicado, se pudo establecer estadísticamente, la presencia de una correlación entre la series de datos de precipitación observados para el mes de julio de 2018 entre el pluviómetro estación climatológica principal UPTC y pluviómetro Santa Inés, por lo tanto, es válido adoptar las curvas de intensidad-duración y frecuencia disponibles de la estación UPTC suministradas Instituto El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) para la construcción de la lluvia de diseño a través de la metodología de bloques alternos.

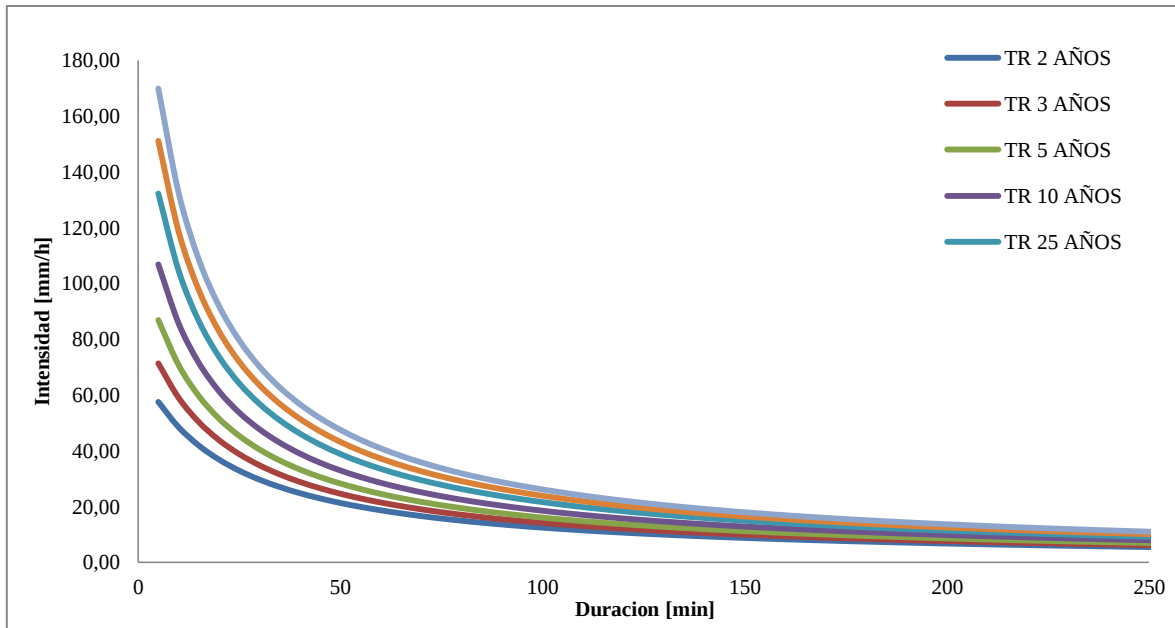


Figura 38. Curvas intensidad-duración- frecuencia disponibles Ideam, Estación climatológica principal UPTC. (Autor).

9.3.1 Bloque alterno

El método del bloque alterno, es una forma simplificada para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración – frecuencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n\Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída de una curva IDF para cada una de las duraciones $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$, y la profundidad de precipitación correspondiente, se determina al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencia entre los valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional 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 requerida T_d y que los demás

bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Chow, Maidment, & Mays, 2000).

La duración del hietograma de diseño fue 60 minutos, teniendo en cuenta que el tiempo de retardo general de la cuenca urbana oscila entre 20 y 25 minutos. Los eventos de precipitación registrados en el tiempo de monitorización, generalmente presentaron el mayor de los pulsos en la mitad del tiempo de duración de lluvia, por lo tanto, dicha forma fue ajustada a la tormenta de diseño.

Tabla 13.
Hietograma de precipitación, incremento de 5 minutos método de bloque alterno

Intervalo	Duración t (min)	Intensidad I (mm/h)	Precipitación P (mm)	Precipitación incremental ΔP (mm)	Precipitación ordenada ΔP (mm)
1	5	106.78	8.90	8.90	0.56
2	10	85.70	14.28	5.38	0.79
3	15	71.51	17.88	3.59	1.18
4	20	61.32	20.44	2.56	1.91
5	25	53.64	22.35	1.91	3.59
6	30	47.66	23.83	1.48	8.90
7	35	42.87	25.01	1.18	5.38
8	40	38.94	25.96	0.95	2.56
9	45	35.67	26.75	0.79	1.48
10	50	32.89	27.41	0.66	0.95
11	55	30.52	27.98	0.56	0.66
12	60	28.46	28.46	0.48	0.48

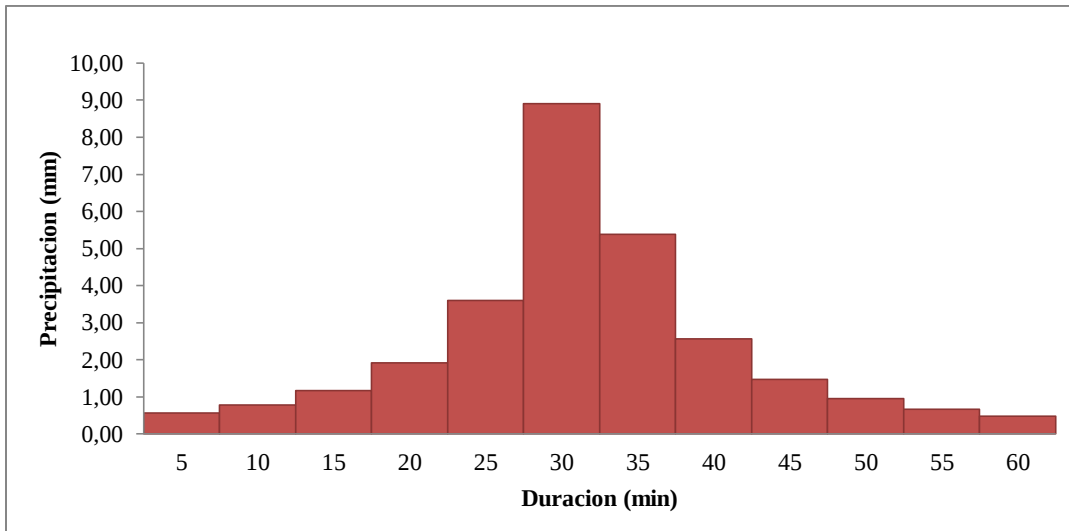


Figura 39. Hietograma de diseño bloque alterno periodo de retorno 10 años. Estación climatológica principal UPTC. (Autor).

9.4 Resultados Diagnostico Hidráulico

Luego de realizar la calibración y validación para el modelo hidrodinámico distrito Santa Inés zona 1 y realizar el proceso de transposición de cuencas para la simulación de la Zona 2. Se procede a realizar la evaluación hidráulica al sistema de alcantarillado para una tormenta de diseño equivalente a un periodo de retorno de 10 años, atendiendo lo establecido en la normatividad técnica vigente aplicable a la fecha. Este diagnóstico, tiene como finalidad, determinar las posibles deficiencias del sistema de drenaje existente en términos de capacidad hidráulica, identificar zonas vulnerables de rebose de pozos y verificación de condiciones de velocidad en el sistema.

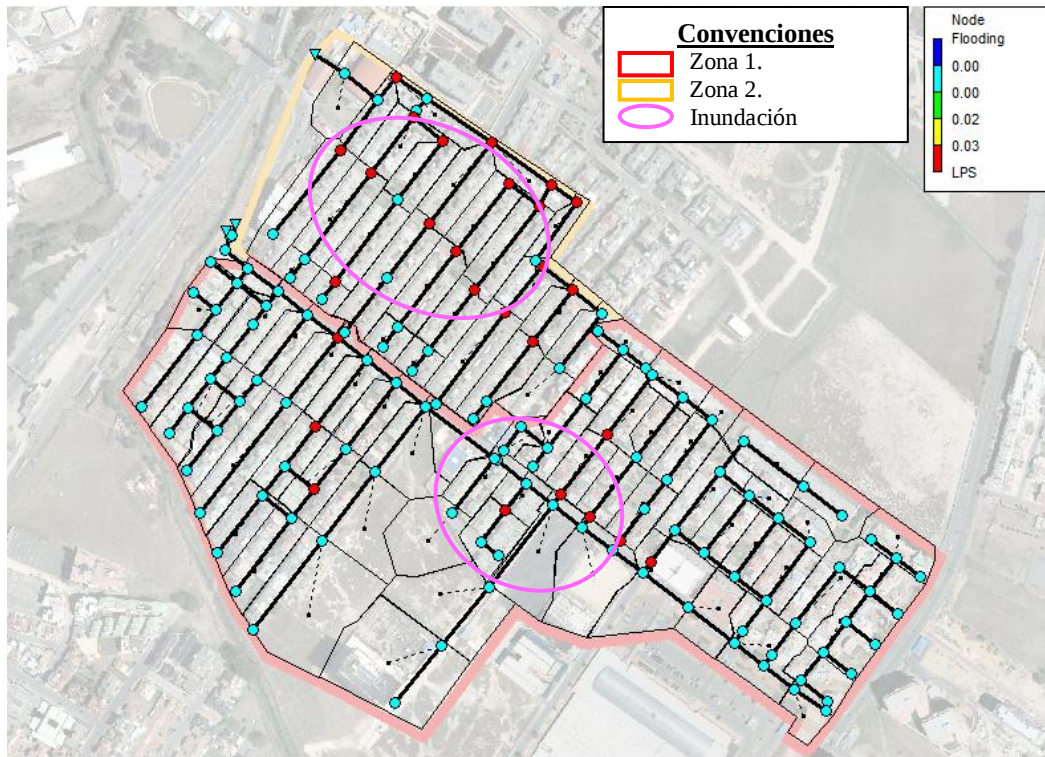


Figura 40. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 35. Pozos rebosados SWMM. (Autor).

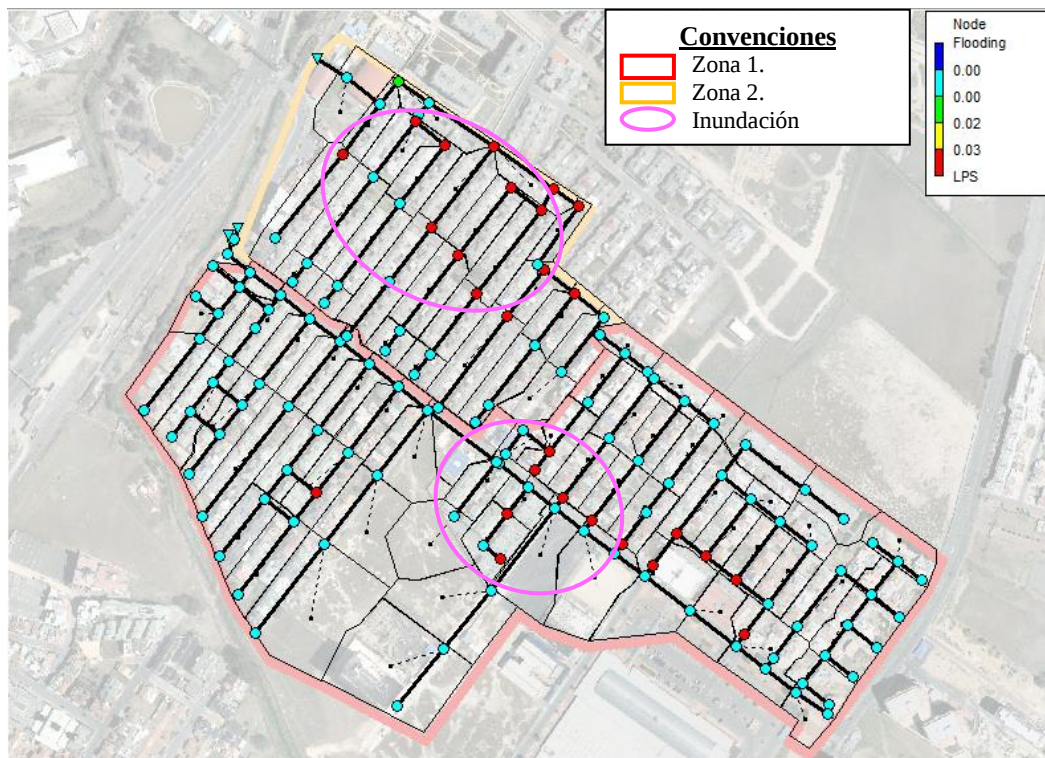


Figura 41. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 40. Pozos rebosados SWMM. (Autor).

Según los resultados del modelo hidrodinámico, en el escenario periodo de retorno 10 años, se identificaron 2 zonas susceptibles de inundación, en donde se registra el rebosamiento de los pozos de inspección, por lo tanto, el caudal fluye hasta el exterior, el pozo más vulnerable tiene como ID PATP3912 en donde se presentó una tasa de inundación de 259.48 l/s. El volumen total de inundación es 1.57×10^6 litros. En términos de capacidad hidráulica en tuberías se registró que el 82.70 % de la totalidad de los colectores del sistema operan a tubo lleno o superando el 93 % de capacidad hidráulica para el minuto 35 de simulación y el 94.87 % para el minuto 40, donde se presenta el pico máximo del hidrograma.

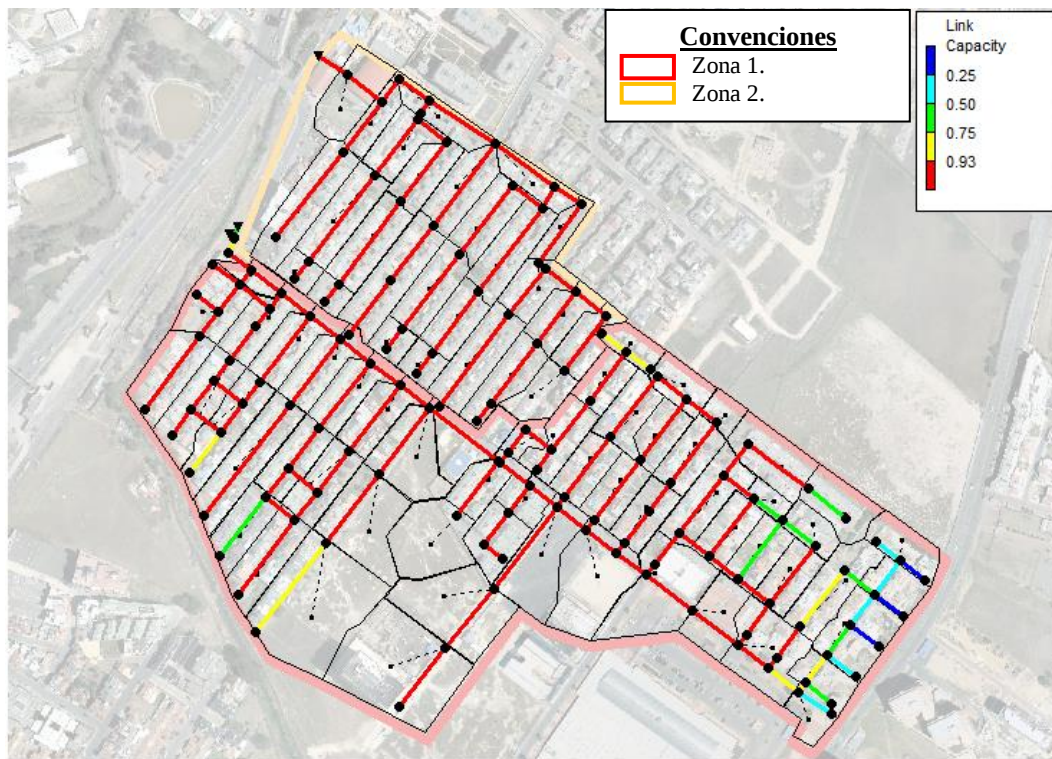


Figura 42. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 35. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).

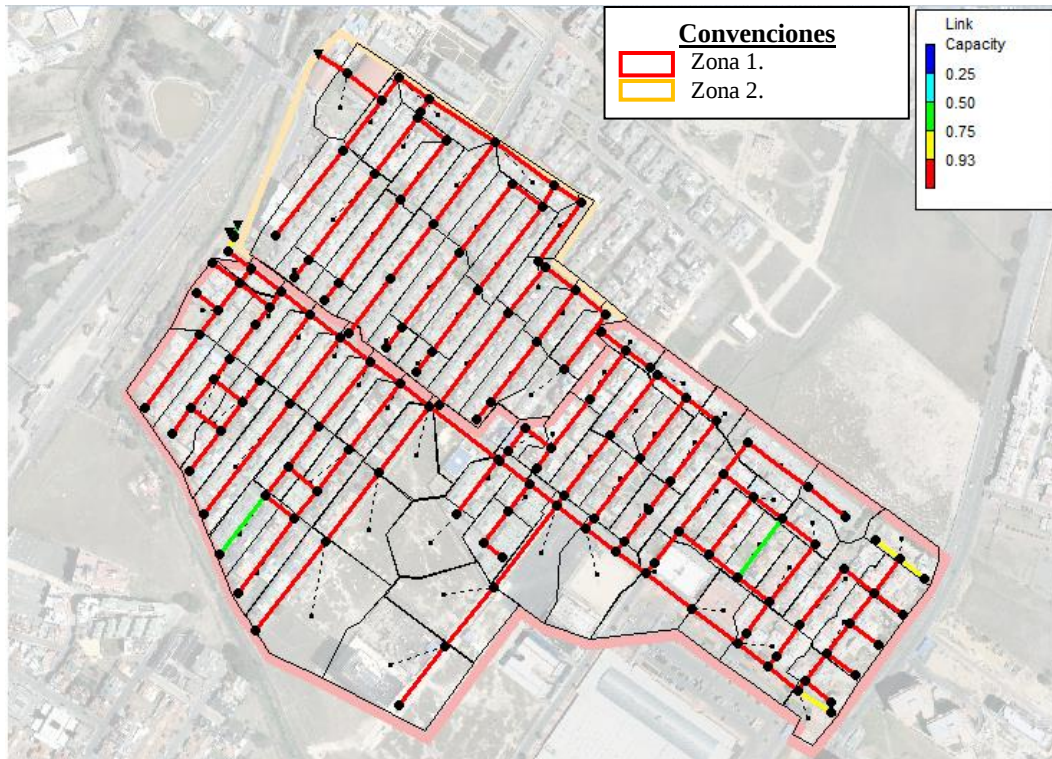


Figura 43. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 40. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).

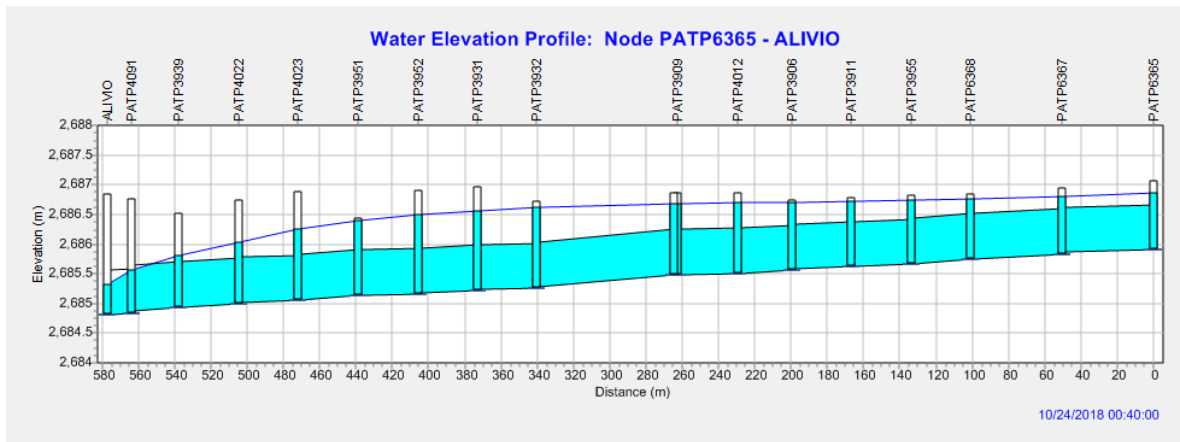


Figura 44. Perfil hidráulico general Distrito Santa Inés Zona1. SWMM.

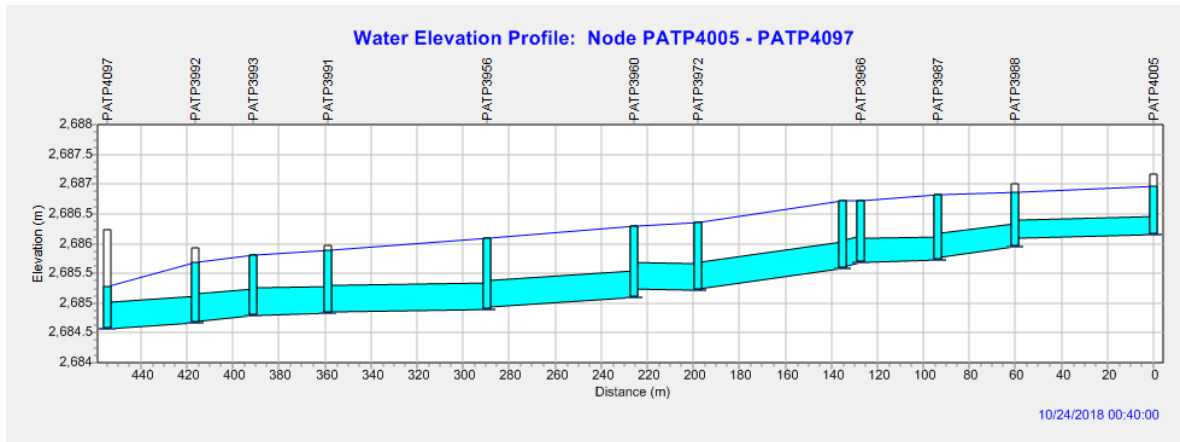


Figura 45. Perfil hidráulico general Distrito Santa Inés Zona 2. SWMM.

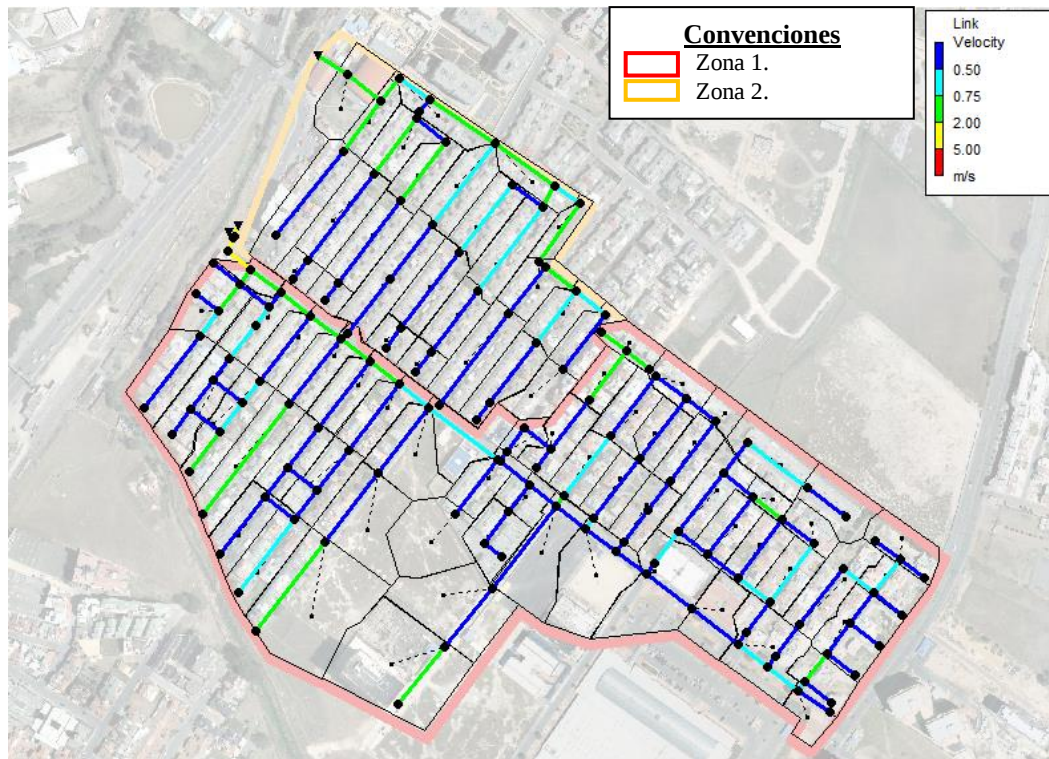


Figura 46. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. PR 10 años, minuto 35. Velocidad en tuberías SWMM. (Autor).

Los valores máximos permisibles para la velocidad media en los colectores dependen del material, en función de su sensibilidad a la abrasión. La simulación en el periodo pico del hidrograma, obtuvo valores admisibles inferiores a 5.0 m/s, registrando una velocidad máxima de 4.58 m/s para el colector con ID PATLAL4813.

A través del modelo hidrodinámico calibrado y validado bajo un escenario de lluvia equivalente a un periodo de retorno de 10 años, se pudo establecer la vulnerabilidad del sistema de drenaje del distrito Santa Inés zona 1 y 2, presentándose incapacidad hidráulica de desagüe en tuberías, el 94.87 % de la totalidad de los colectores del sistema operan a tubo lleno o superando el 93 % de capacidad hidráulica en el periodo máximo del hidrograma, por otra parte se registró el rebosamiento de 27 pozos de inspección durante el minuto 35 y 40 de simulación.

El 96 % de las tuberías del sistema de drenaje están construidas en concreto, material que presenta una mayor rugosidad y menor capacidad hidráulica de transporte con respecto a tuberías plásticas. Las líneas principales de drenaje entran en carga para el tiempo crítico de simulación (35 minutos) permitiendo la acumulación de caudal aguas arriba, generando el rebose de los pozos de inspección en las calles internas del barrio Santa Inés.

9.5 Planteamiento de Alternativas

En un análisis de pre factibilidad, se desarrollarán alternativas técnicas de solución a la problemática evidenciada en el sistema de drenaje objeto de estudio. El sistema de alcantarillado en la actualidad permite el transporte de caudal superficial producto del drenaje de las vías a través de cunetas hasta ingresar a sumideros, esta condición permite que la respuesta hidrológica de la cuenca urbana, sea rápida.

Por otra parte, el sector tiene topografía plana, las constantes intersecciones de las vías del distrito Santa Inés, impide que se puedan proyectar canales o cunetas que drenen sus aguas hasta el río Jordán. Además, en la zona no se cuenta con un predio propiedad del municipio en donde se pueda realizar inversión pública para construir estanques de detención, cuya finalidad es controlar y amortiguar los caudales pico generados por una tormenta.

Es por esta razón que, las alternativas de solución están enfocadas al aumento de capacidad hidráulica de colectores existentes y proyectar redes paralelas que contribuyan a liberar la carga hidráulica que sufre el sistema de drenaje bajo un escenario de tormenta. Por factores limitantes como el tiempo y alcance del presente estudio, no se desarrolló un análisis estadístico e hidráulico para proyectar estructuras de separación (aliviaderos), por lo tanto, las alternativas de solución plantean la operación del sistema de drenaje tipo combinado (aguas lluvias y residuales). A continuación, se presenta la descripción de las alternativas de solución propuestas.

9.5.1 Alternativa 1

Para la zona 1, se proyecta la construcción y aumento de capacidad hidráulica de las redes existentes, rehabilitando el colector principal existente localizado sobre la calle 41, desde el pozo PATP6368 hasta la descarga en la cámara de alivio, en tubería PVC tipo alcantarillado con diámetros 36", 39" y 42". Además, se plantea el aumento de capacidad hidráulica de 8 tramos de alcantarillado que se conectan al colector principal sobre la calle 41.

Para la zona 2, se proyecta la construcción de un colector nuevo sobre la calle 42 entre carrera 3 hasta la carrera 5. El cual tiene como finalidad, interceptar las aguas que generan saturación sobre el colector principal de la calle 43. Por otra parte, este colector recibe las aguas de exceso provenientes de la zona 1. En la alternativa 1, se plantea la demolición de 14 pozos existentes, construcción y replanteo de 21 pozos de inspección. La longitud total de las redes nuevas y rehabilitadas es 1400.78 metros.

Tabla 14.
Cantidades longitud tramos de tuberías alcantarillado y pozos de inspección alternativa 1.

Construcción colectores Zona 1. Alternativa N°1			
DI (mm)	DN (mm)	D (in)	Longitud Total (m)
407	450	18	49.26
452	500	20	152.73
595	650	24	46.45
670	730	27	8.20
900	980	36	66.01
977.6	1065	39	173.32
1054	1149	42	237.27
Longitud alcantarillado combinado			733.24
Construcción colectores Zona 2 Alternativa N°1			
DI (mm)	DN (mm)	D (in)	Longitud Total (m)
407	450	18	20.15
452	500	20	155.25
595	650	24	163.42
670	730	27	117.79
747	813	30	180.20
900	980	36	30.73
Longitud alcantarillado combinado			667.54
Construcción Pozos de inspección Zona 1 y 2 Alternativa N°1			
Demolición pozos de inspección			14
Pozos de inspección 1.0-1.5			14
Pozos de inspección 1.5-2.0			7
Pozos de inspección 2.0-2.5			0

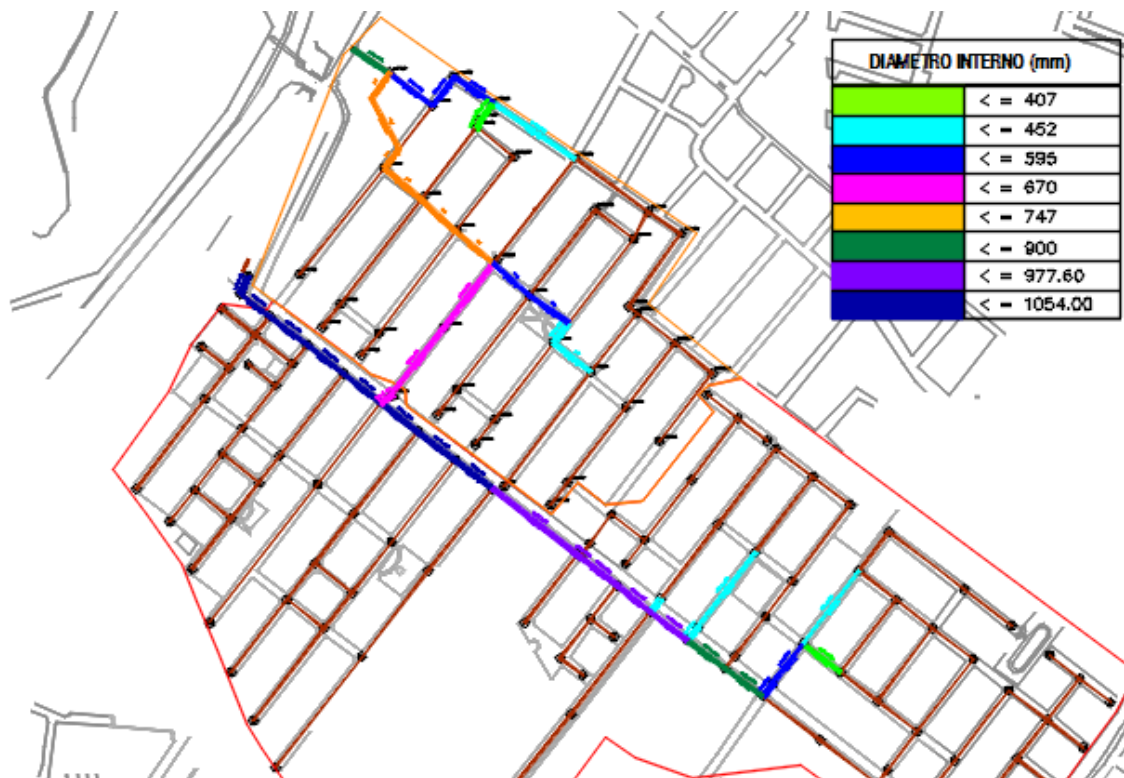


Figura 47. Distrito Santa Inés zona 1 y 2, diámetro colectores rehabilitados y proyectados alternativa 1. AutoCAD 2017(Autor).

9.5.1 Alternativa 2

Para la zona 1, se proyecta la intervención parcial del colector principal existente localizado sobre la Calle 41, aumentando la capacidad hidráulica desde el pozo PATP6368 hasta el pozo PATP3909, en tubería PVC tipo alcantarillado diámetro 36". A partir de este punto, se proyecta la construcción de un colector nuevo por la Calle 41 en tubería PVC tipo alcantarillado diámetro 39" paralelo al colector existente en concreto con diámetro 30". Bajo eventos de precipitación estos dos colectores operan simultáneamente, disminuyendo la carga del sistema aguas arriba evitando rebose de pozos de inspección. Se plantea el aumento de capacidad hidráulica de 7 tramos de alcantarillado que se conectan al colector principal sobre la calle 41.

Para la zona 2, se proyecta la construcción de un colector nuevo sobre la calle 42 entre carrera 2B hasta la carrera 5. El cual tiene como finalidad, interceptar las aguas que generan saturación sobre el colector principal de la calle 43. Es necesario mencionar, que esta alternativa plantea la división total de los sectores 1 y 2. En la alternativa 2, se plantea la demolición de 11 pozos existentes, construcción y replanteo de 23 pozos de inspección. La longitud total de las redes nuevas y rehabilitadas es 1119.63 metros.

Tabla 15.
Cantidades longitud tramos de tuberías alcantarillado y pozos de inspección alternativa 2.

Construcción colectores Zona 1. Alternativa N°2			
DI (mm)	DN (mm)	D (in)	Longitud Total (m)
327	355	14	7.45
407	450	18	16.29
452	500	20	33.35
595	650	24	46.45
900	980	36	173.68
977.6	1065	39	292.67
Longitud alcantarillado combinado			569.89
Construcción colectores Zona 2. Alternativa N°2			
DI (mm)	DN (mm)	D (in)	Longitud Total (m)
407	450	18	20.15
452	500	20	85.99
595	650	24	267.34
670	730	27	145.53
747	813	30	30.73
Longitud alcantarillado combinado			549.74
Construcción Pozos de inspección Zona 1 y 2 Alternativa N°2			
Demolición pozos de inspección			11
Pozos de inspección 1.0-1.5			12
Pozos de inspección 1.5-2.0			11
Pozos de inspección 2.0-2.5			0

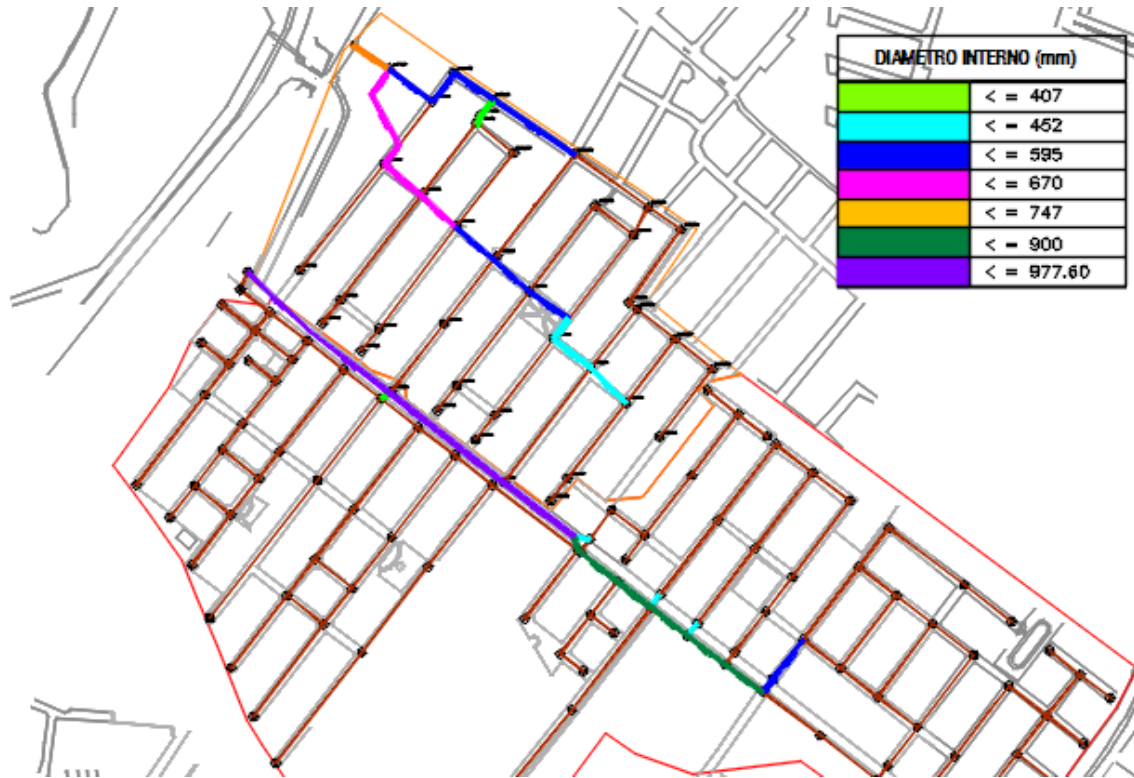


Figura 48. Distrito Santa Inés zona 1 y 2, diámetro colectores rehabilitados y proyectados alternativa 2. AutoCAD 2017(Autor).

9.6 Selección de Alternativas

Como criterio principal de selección de alternativas, se tuvo en cuenta el componente económico o de inversión, es decir, se seleccionó la alternativa que garantiza una óptima funcionalidad del sistema con la menor inversión. El presupuesto de inversión parcial no tuvo en cuenta los costos de administración, imprevistos y utilidad, se enfocó a los costos directos de obras, en componentes como; suministro e instalación de tubería, construcción y demolición de pozos de inspección. Es necesario mencionar, que este estudio plantea alternativas de solución en fase de prefactibilidad, no de ingeniería de detalle o estudios en fase 3.

Tabla 16.
Costos directos alternativas N° 1 y 2

Alternativas	Total Costo Directo
Alternativa N° 1	\$ 1,144,452,009.75
Alternativa N°2	\$ 879,497,789.34

Nota: precios de lista nacional y Gobernación de Boyacá 2017

La alternativa N° 2 presenta un 23.15 % menos de inversión con respecto a la alternativa N°1, por lo tanto, se selecciona como solución técnica para garantizar la correcta funcionalidad del sistema de drenaje bajo un evento critico de simulación.

En la alternativa de solución seleccionaba, se redujo a cero el número de pozos que rebosaban, eliminando la totalidad de las zonas de vulnerabilidad por inundación, disminuyendo a cero el volumen de agua que drenaba hacia el exterior del sistema, en términos de capacidad hidráulica en tuberías, se logra reducir a 37.35 % la totalidad de colectores del sistema que operan a tubo lleno o superando el 93 % de capacidad hidráulica para el minuto 35 de simulación y disminuir a 78.71 % para el minuto 40, donde se presenta el pico máximo del hidrograma. Mejorando esta condición hidráulica en un 45.35 % y 16.71 % respectivamente. La simulación reportó valores admisibles de velocidad, inferiores a 5.0 m/s, registrando una velocidad máxima de 4.60 m/s para el colector con ID PATLAL4813.

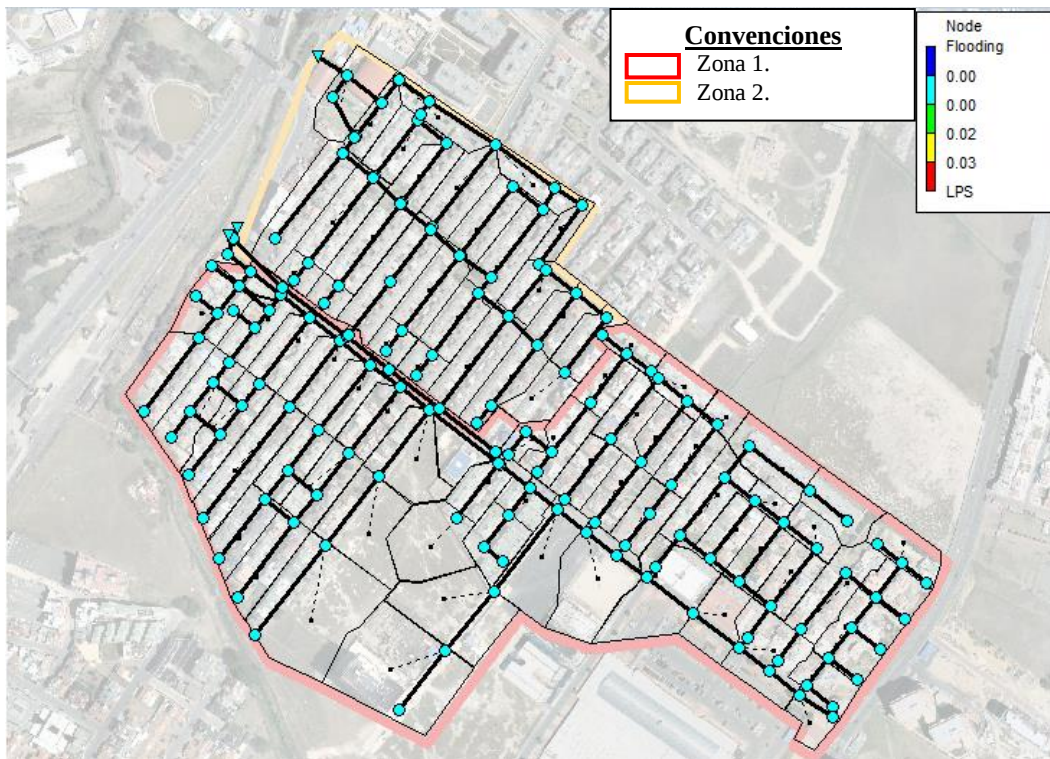


Figura 49. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minutos 35-40. Pozos rebosados SWMM. (Autor).

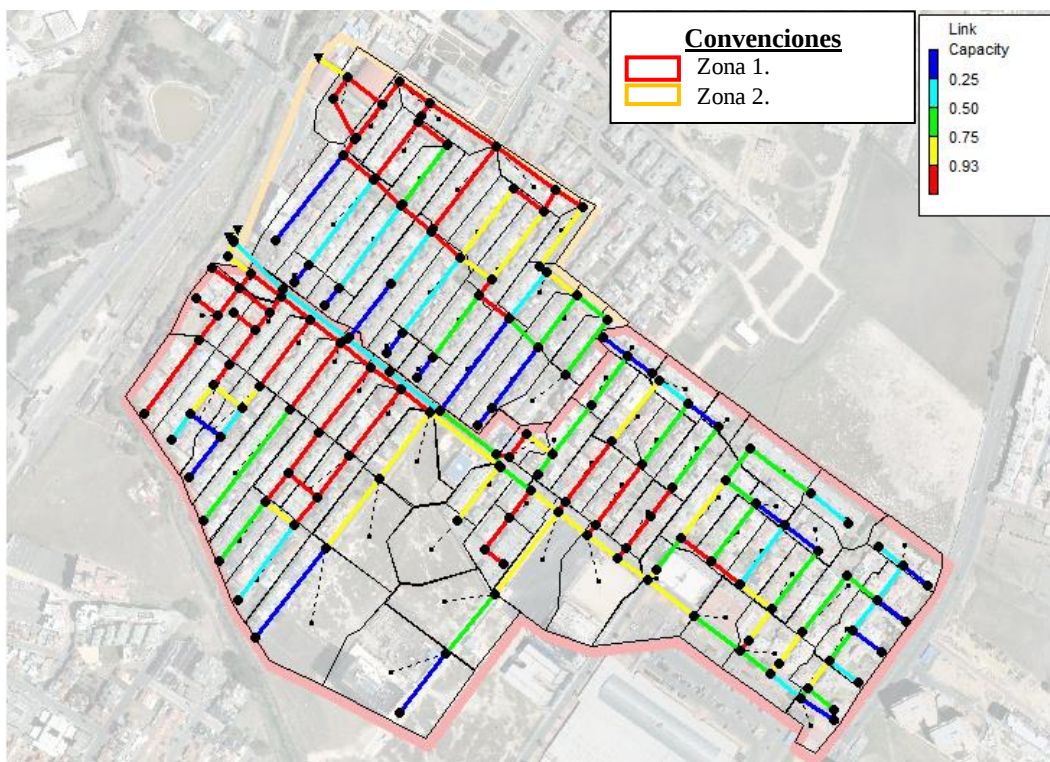


Figura 50. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minuto 35. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).

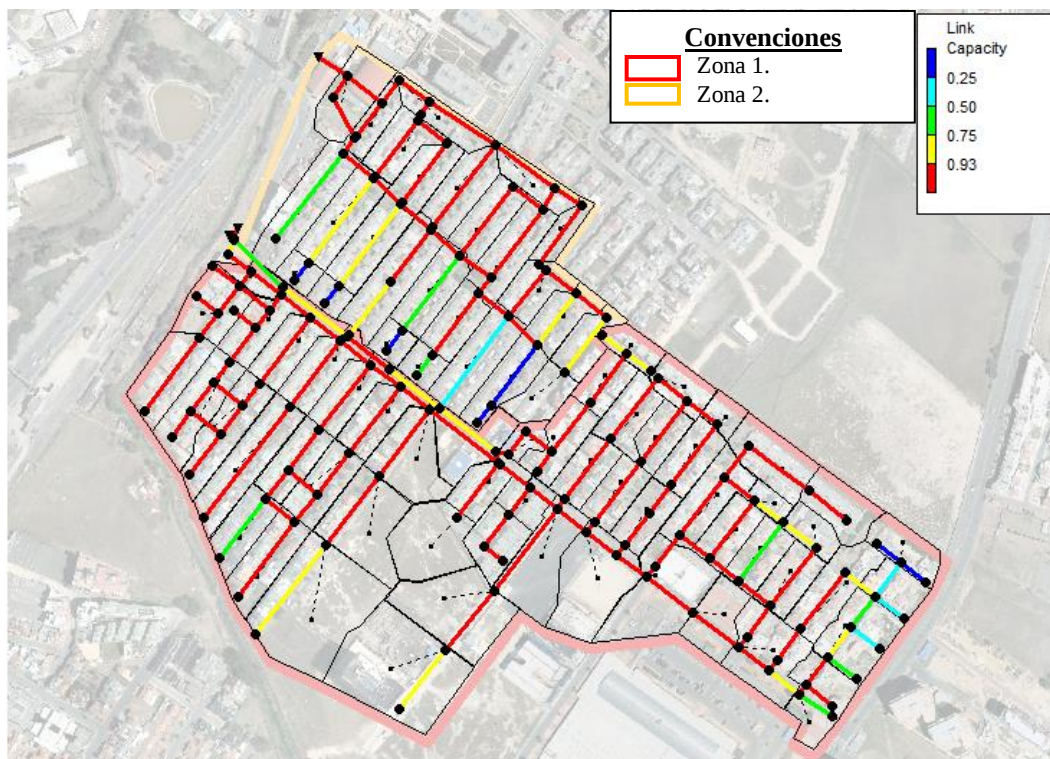


Figura 51. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minuto 40. Capacidad hidráulica tuberías SWMM. (Autor).

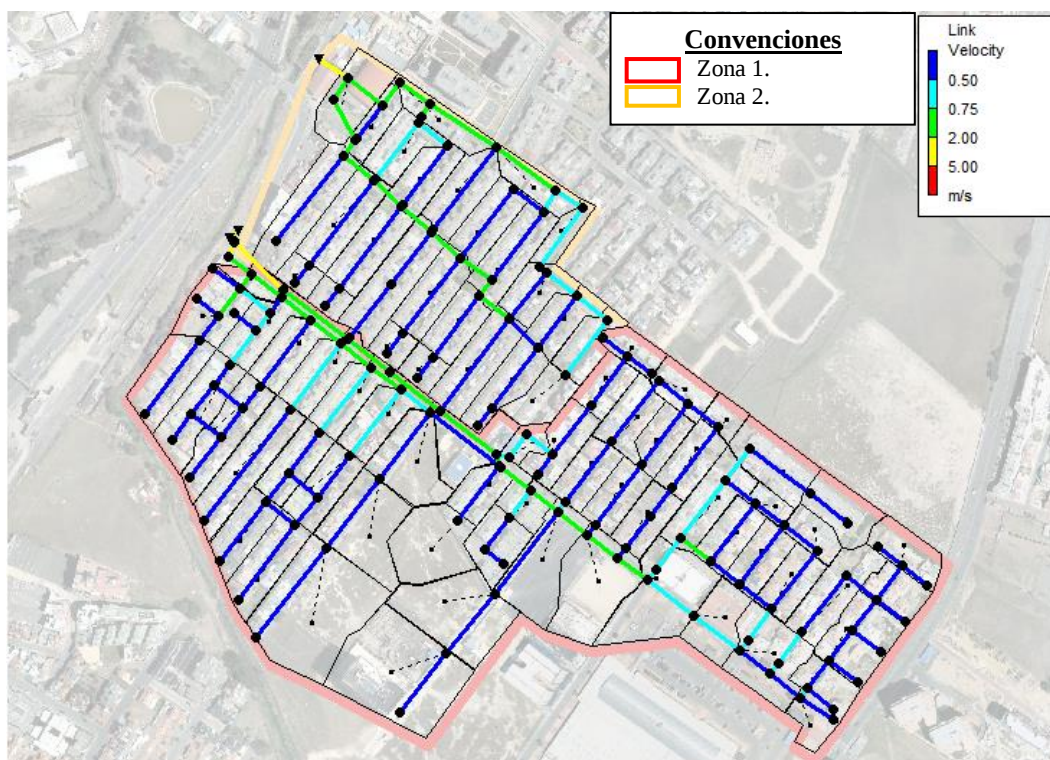


Figura 52. Distrito Santa Inés zona 1 y 2. Alternativa N°2, minuto 35. Velocidad en tuberías SWMM. (Autor).

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la actividad de validación de base catastral se pudo determinar que el catastro de alcantarillado existente es representativo y constituye la realidad del sistema de drenaje en la zona de estudio.

El monitoreo de lluvias y caudales se efectuó durante 4 meses, en este periodo se realizaron labores de inspección y monitoreo, con el fin de establecer las condiciones físicas y funcionales de los equipos instalados. La representatividad de los eventos de lluvias y caudales, se ejecutó cruzando los datos registrados en los equipos instalados, verificando la magnitud y el tiempo de ocurrencia entre hidrogramas e hietogramas. En tiempos secos, se pudo observar la periodicidad en los hidrogramas registrados, obteniendo incrementos en caudales de aguas residuales para las horas máximas de consumo de agua.

A través del análisis exploratorio se pudo establecer estadísticamente, la presencia de una correlación entre la series de datos de precipitación observados para el mes de julio de 2018 entre el pluviómetro estación climatológica principal UPTC y pluviómetro Santa Inés. Esta tendencia puede darse, por la proximidad entre estos y similitud en elevación sobre el nivel del mar.

En la construcción del modelo hidrodinámico Santa Inés zona 1. La cuenca se desagregó a una escala de detalle, obteniendo 56 subcuencas de drenaje, para las cuales se calculó el ancho de cuenca acorde a las tres condiciones físicas y de drenaje. Las

subcuencas se trazaron, teniendo en cuentas los puntos de salida o sumideros existentes conectados al sistema de alcantarillado.

Se procedió a analizar los registros de lluvia continua, individualizando 6 eventos de precipitación y se clasificaron por fecha y tamaño, teniendo en cuenta los datos observados de caudales a la salida de la cuenca urbana. Se adoptó como criterio utilizar los 3 primeros eventos registrados para el proceso de calibración, estos presentan diferente magnitud y tiempo de duración, por otra parte, los 2 eventos restantes se usaron para validación, el evento del 13 de septiembre que registró la mayor magnitud, se usó para chequeo hidráulico.

Este estudio se basó en los hidrogramas de alcantarillado reales medidos en la descarga principal de la cuenca urbana, se calibro parámetros asociados a las pérdidas iniciales hidrológicas y coeficientes de rugosidad, tales como; almacenamiento de la depresión (D_{store}) para coberturas permeables e impermeables, el n de Manning para superficies permeables e impermeables, el n de Manning para las tuberías del sistema de drenaje (Roughness).

Se adoptó como criterio de validación del modelo que los errores relativos del caudal pico, tiempo pico y volumen total de descarga fueran simultáneamente inferiores al 20 %. Coeficiente de variación (S) en el rango de 0.1-0.2. Obteniendo valores admisibles dentro de los criterios de bondad adoptados, por otra parte, los resultados del RMSE presentaron un buen equilibrio de caudales entre los hidrogramas simulados y observados para los diferentes eventos de calibración.

En los resultados de validación, se obtuvieron errores relativos (RE) para caudal pico, tiempo pico y volumen del hidrograma inferiores al 20 %, los resultados del RMSE presentaron buen equilibrio de caudales entre los hidrogramas simulados y observados para los eventos de validación, no superando un caudal de 20 L/s. Concluyendo que la desagregación del modelo hidrodinámico a escala de detalle redujo el grado de incertidumbre en la evolución del flujo. Además, se calculó el coeficiente de escorrentía teniendo en cuenta el balance hidrológico de la cuenca, obteniendo adecuados resultados comparativos para el proceso de calibración y validación.

En la zona de estudio, distrito Santa Inés, el día 13 de septiembre de 2018 se produjo una precipitación total de 22.22 mm con una duración de 185 minutos, lo que generó que el sistema entrara en carga, el sensor SVS registro láminas de flujo desde las 5.45 pm hasta las 6.00 pm. Obteniendo así similitud en el tiempo de duración de la condición real de carga en tuberías y los resultados de simulación, el modelo hidrodinámico reproduce de manera adecuada la evolución real del sistema y se empleó para realizar predicciones bajo un evento de precipitación máxima de diseño.

En el diagnóstico hidráulico se identificaron 2 zonas susceptibles de inundación, en donde se registra el rebosamiento de los pozos de inspección, el volumen total de inundación es 1.57×10^6 litros. En términos de capacidad hidráulica en tuberías se registró que el 82.70 % de la totalidad de los colectores del sistema operan a tubo lleno o superando el 93 % de capacidad hidráulica para el minuto 35 de simulación y el 94.87 % para el minuto 40, donde se presenta el pico máximo del hidrograma.

La alternativa N° 2 presenta un 23.15 % menos de inversión con respecto a la alternativa N°1, por lo tanto, se selecciona como solución técnica para garantizar la correcta funcionalidad del sistema de drenaje bajo un evento crítico de simulación. Se recomienda al operador del servicio realizar estudios de detalle, encaminados a evaluar y analizar constructivamente la ejecución de dicha alternativa de solución. Teniendo en cuenta que el modelo desarrollado en el presente estudio, fue calibrado y validado, por lo tanto, representa satisfactoriamente las condiciones hidrodinámicas y evolución de caudales del sistema.

Se recomienda realiza la calibración y reconstrucción de la cresta de las estructuras de alivio del sector, teniendo en cuenta que el presente estudio pudo establecer un alto ingreso de caudal pluvial al interceptor que debe conducir principalmente aguas residuales, identificando una condición operativa desfavorable. La optimización de estas estructuras, permitirá tener control sobre la dilución del agua residual, favoreciendo la operación de los procesos biológicos en la planta de tratamiento de aguas residuales de Tunja.

REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

- Alley, W. (1986). Summary of experience with the Distributed Routing Rainfall-Runoff Model (DR3M). *Urban Drainage Modelling (Proceedings, International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, UDM 86, Dubrovnik)* (págs. 403-415). Oxford, UK.: Edited by C. Maksimovic and M. Radojkovic.
- Alpresa Calvillo, M. (2006). *Dimensionamiento de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Grazalema*. Cádiz: Universidad de Cádiz .
- Arriero Shimma, T., & Ribeiro Reis, L. F. (2014). Incorporating multi-event and multi-site data in the calibration of SWMM. *Procedia Engineering*, 75-84.
- ASCE . (1975). Aspects of hydrological effects or urbanisation. *Journal of Hydraulics Division (ASCE)*, 449-468.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica; Universidad de Los Andes. (1984). *Estudio General de Riesgo Sísmico en Colombia*. Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica; Universidad de Los Andes; Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química-Ingeominas. (1996). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*. Bogota.
- Astaraie-Imani, M., Kapelan, Z., Fu, G., & Butler, D. (2012). Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK. *Journal of Environmental Management*, 1-9.
- Barnston, A. (1992). *Correspondence among the Correlation, RMSE, and Heidke Forecast Verification Measures; Refinement of the Heidke Score*. Washington, D.C. : Climate Analysis Center, NMC/NWS/NOAA.

- Benoit, K. (2011). *Data Analysis, Exploratory*. Dublin, Ireland: Trinity College.
- Cerda, H. (1993). *Elementos de la Investigación. Como reconocerlos diseñarlos y construirlos*. Quito: ABYA YALA.
- Cesario, L. (1995). *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. Denver, CO, USA: American Water Works Association.
- Choi, K.-s., & Ball, J. E. (2002). Parameter estimation for urban runoff modelling. *Elsevier Science*, 31-41.
- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2000). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2008). *Estimacion e interpretación del coeficiente de variación de la encuesta cocensal*. Bogotá: DANE.
- DHI Water, Environment & Health. (2014). *Report and papers with guidelines on calibration of urban flood models*. CORFU Consortium.
- Díaz Granados, M., & Camacho, L. (2001). Modelación Hidrológica y Ambiental de una Subcuenca de la ciudad de Bogotá. *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*, 328-335.
- Digiano, F., Adrian, D., & Mangarella, P. (1977). Short Course Proceedings-Applications of Stormwater Management Models. *Environmental Protection Agency, EPA-600/2-77-065* (NTIS PB-265321).
- Digital, G. (s.f.). *Alcaldía de Tunja*. Recuperado el 01 de 11 de 2018, de Alcaldía de Tunja: <http://www.tunja-boyaca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Ditmars, J., Adams, E., Bedford, K., & Ford, D. (1987). Performance Evaluation of Surface Water Transport and Dispersion Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 961-980.

- El Pais. (13 de Agosto de 2018). Temporada de lluvias podría extenderse hasta el mes de noviembre: Ideam. *El Pais*, págs. <https://www.elpais.com.co/colombia/temporada-de-lluvias-podria-extenderse-hasta-el-mes-de-noviembre-ideam.html>.
- Elliot, A., & Trowsdale, S. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 394-405.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2005). *Manual de usuario SWMM Modelo de gestion de aguas pluviales*. GMMF.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. U.S: EPA.
- Fattorelli , S., & Fernandez, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. Zaragoza: Water Assessment & Advisory Global Network .
- Gibbons, J. C., & Chester, L. A. (1996). Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key. *American Planning Association*, 243-258.
- Gómez Valentín , M. (2007). *Estudio e Instrumentación de una Cuenca Urbana en el Municipio de Sant Boi De Llobregat*. Barcelona : Grup de Recerca FLUMEN.
- Guacaneme, J. J. (2006). Zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja, Colombia. *Épsilon*, 29-44.
- HACH. (2010). *Manual de Usuario Sensor Flo-Dar*.
- Hogue, T., Gupta, H., & Sorooshian, S. (2006). A 'User-friendly' approach to parameter estimation in hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 202-217.
- Huber, W., Dickinson, R., & Barnwell, J. T. (1988). *Storm Water Management Model, Version 4, User's Manual*. Athens, GA,: U.S. Environmental Protection Agency.
- Kibler, D. F. (1982). *Urban stormwater hydrology*. Washington DC: American Geophysical.

- Kourtis, I., Kopsiaftis, G., Bellos, V., & Tsihrintzis, V. (2017). Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece. *15th International Conference on Environmental Science and Technology*, (págs. 2-6). Rhodes, Greece.
- Kreinovich, V. (2013). *How to Define Relative Approximation Error of an Interval Estimate: A Proposal*. El Paso, Texas: Applied Mathematical Sciences, University of Texas at El Paso.
- Lei, Y., Wei, w., & Liding, C. (2016). How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases. *Ecological Indicators*, 893–905.
- Leopold, L. B. (1968). *Hydrology for- Urban Land Planning -A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*. Washington DC.: Geological Survey Circular 554.
- Liu, A., Egodawatta, P., Guan, Y., & Goonetilleke, A. (2013). Influence of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. *Science of The Total Environment*, 255-262.
- Macor, J. L. (2002). Análisis Comparativo del Parámetro Ancho de Cuenca del Modelo Runoff – SWMM. *Ingeniería Hidráulica en Mexico*, 17 – 26.
- Macor, J. L., & Pedraza, R. A. (2005). *Efectos de la Discretización en la Simulación de Escorrentía Urbana*. Santa Fe: Ingeniería del Agua.
- Mejía, A., & Moglen, G. (2010). Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing. *Water Resources Research*, Vol. 46, 416-424.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Teritorio. (2016). *Reglamento Tecnico de Agua Potable y Saneamiento basico-RAS Titulo D*. Bogotá D.C. Minvivienda.

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017 "por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Basico-RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009"*. Bogotá D.C.: Minvivienda.
- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., y otros. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Sustainable Water in the Built Environment*, 02-32.
- Proactiva Aguas de Tunja S.A.E.S.P. (2016). *Plan Maestro de Drenaje Urbano, fase 1*. Tunja.
- RainWise, Inc. (2013). *Instruction Manual RainLog™ 2.0*.
- Ramas Ayala, J. (2014). *Métodos disponibles para la medida de la velocidad y el caudal en colectores de saneamiento, aguas residuales y vertidos*. Seba Hydrometrie Ibérica y CEO de Ramtor.
- Ramirez, J. E. (1975). *Historia de los Terremotos en Colombia*. Bogotá: IGAC.
- Resolucion 0241 POT, Alcaldia Municipal de Tunja (23 de 9 de 2014).
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0*. O.H: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Ruberto, A., Depettris, C., & Kutnich, E. (2010). Hidrología Urbana: Instrumentación y Evaluación del Escurrimiento Superficial en una Microcuenca de Resistencia, Chaco. En *Estudio de la Hidrología Urbana del Nordeste Argentino* (págs. 47-61). Resistencia: Copyright de los coordinadores.
- Searcy, J., & Hardison, C. (1960). Double-Mass Curves Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water. *Geological Survey Water-Supply Paper* , 1541-B.

- Seco, I., & Gómez Valentín, M. (2012). *Calidad de aguas en tiempo de lluvia. Estudio de una cuenca urbana en la región Mediterránea y calibración de un modelo hidrológico y de calidad en SWMM 5.0*. Barcelona,: Marcombo S.A.,.
- Smith, R., & Campuzano, C. (2000). *Analisis Exploratorio para la Detección de cambios y Tendencias en Series Hidrologicas*. Medellin: Universidad nacional de Colombia.
- Soil Conservation Service SCS. (1989). *Hydology Training Series Module 104 Runoff Curve Number Computations*. United States Departament of Agriculture .
- Southworth, M., & Ben-Joseph, E. (1995). Street Standards and tha Shaping of Suburbia. *Journal of the American Planning Association*, 65-81.
- Stankowski, S. (1972). Population Density as An Indirect Indicator of Urban and Suburban Land-surface Nodifications. *U.S. Geological Survey Professional Paper 800-B*, B219-B224.
- Sun, N., Hall, M., Hong, B., & Zhang, L. (2014). Impact of SWMM Catchment Discretization: Case Study in Syracuse, New York. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19, 223-234.
- Superservicios. (2013). *Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas residuales*. Bogotá D.C: Imprenta Nacional de Colombia.
- Superservicios, Departamento Nacional de Planeación . (2018). *Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2014 - 2017*. Bogotá D.C.
- Temprano, J., & Tejero, I. (2002). Detention storage volume for combined sewer overflow into a river. *Environ. Technol*, 23 (6) 663-675.

United States Environmental Protection Agency EPA. (17 de Marzo de 2016). *Storm Water Management Model (SWMM)*. Obtenido de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Universidad Nacional del Litoral-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2015). *Drenaje Urbano, Diseño hidrológico en areas urbanas* . Santa Fe.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modelling and Management*. Waterbury, CT, USA: Haestad Press.

Wang, S., Zhang, Z., Sun, G., Strauss, P., Guo, J., Tang, Y., y otros. (2012). Multi-site calibration, validation, and sensitivity analysis of the MIKE SHE Model for a large watershed in northern China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4621-4632.

ANEXOS