

**MODELACION DEL DRENAJE PLUVIAL EN CIUDADES INTERMEDIAS EN
ESCENARIOS DE CAMBIOS CLIMATICOS EXTREMOS**

CESAR MAURICIO DAZA RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2017

**MODELACION DEL DRENAJE PLUVIAL EN CIUDADES INTERMEDIAS EN
ESCENARIOS DE CAMBIOS CLIMATICOS EXTREMOS**

CESAR MAURICIO DAZA RODRIGUEZ

Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil

Director: Ing. Camilo Andrés Lesmes Fabián

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2017

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 23 de mayo de 2017

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento se dirige a:

El creador de todas las cosas, a quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, el que en todo momento ha estado conmigo ayudándome a aprender de mis errores y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mi familia, motores de mi vida, por formarme en cada paso que he dado y brindarme su amor incondicional en todo momento.

Ingeniero Camilo Lesmes Fabián, director del proyecto, por sus buenas enseñanzas y por apoyarme y orientarme durante el transcurso de la investigación y desarrollo del trabajo.

Ingenieros de la Gerencia de Planeación y Construcciones de la empresa PROACTIVA AGUAS DE TUNJA S.A E.S.P, por brindarme su colaboración y apoyo.

A cada uno de los ingenieros y docentes, quienes cultivaron en mí el amor hacia la ingeniería a lo largo de la carrera.

A mis amigos, por su compañía y momentos vividos durante el transcurso de mi educación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	15
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Desarrollo Urbano y Drenaje Pluvial.	17
2.2. Cambio climático e hidrología urbana.	21
2.3. Drenaje Pluvial en Ciudades Intermedias.	25
2.3.1. Problemática del Drenaje Pluvial en Europa.	26
2.3.2. Problemática del Drenaje Pluvial en América del Norte.	29
2.3.3. Problemática del drenaje pluvial en Latino América.	29
2.4. Modelación del Drenaje Pluvial.	37
2.4.1. Herramientas computacionales para modelaciones de drenaje pluvial.	39
2.4.2. Pruebas de los modelos.	42
2.4.3. Verificación de los modelos.	43
2.4.4. Modelos Determinísticos.	44
2.5. Antecedentes en la Ciudad de Tunja.	44
2.5.1. Proceso de urbanización de la ciudad.	45
2.5.2. Sistema de alcantarillado pluvial de la ciudad de Tunja.	52
2.5.3. Clima de la ciudad de Tunja.	53
3. DEFINICION DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	57
4. OBJETIVOS	58
4.1. Objetivo General.	58
4.2. Objetivos Específicos.	58
5. METODOLOGÍA	59
5.1. Método 1. Análisis del cambio climático.	59
5.1.1. Marco conceptual de Escenarios de Cambio Climático.	60

5.1.2. Escenarios de Cambio Climático Global.	66
5.1.3. Variación de la Temperatura y precipitación en Colombia.	68
5.1.4. Escenarios de Cambio Climático en Colombia.	74
5.1.5. Escenarios de Precipitación en el Departamento de Boyacá.	76
5.1.6. Escenarios de Precipitación para la Ciudad de Tunja.	77
5.2. Método 2. Estimaciones de Escorrentía.	77
5.2.1. Descripción de la Fase de Modelación con SWMM.	78
5.3. Método 3. Sistemas urbanos de drenaje sostenible	83
6. RESULTADOS	85
6.1. Procedimiento en el modelo SWMM.	85
6.1.1. Parámetros requeridos por EPA SWMM para la modelación.	87
6.2. Características Físicas de la Zona de Estudio.	91
6.2.1. Estudios Hidrológicos.	91
6.2.2. Condiciones Geológicas.	92
6.2.3. Geología Local de la Ciudad.	93
6.2.4. Estudios topográficos.	94
6.2.5. Usos de suelo.	96
6.2.6. Análisis del sitio de vertimiento.	101
6.2.7. Descripción de los Sistemas e Infraestructura Existentes.	102
6.3. Diseño de tormentas.	103
6.3.1. Cálculo de Hietogramas.	105
6.4. Resultados de la modelación en SWMM.	114
6.5. Tipos de SUDS.	123
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	131
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
9. GLOSARIO	136
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
11. ANEXOS	145
11.1. Foto Mosaicos IGAC	145
11.2. Resumen de Parámetros del Modelo	148

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. RCP según quinto informe del IPCC (AR5). – IDEAM.	65
Tabla 2. Proyección del cambio de la temperatura media global del aire en la superficie para mediados y finales del siglo XXI en relación con el periodo de referencia 1986-2005. – IDEAM.	67
Tabla 3. Parámetros requeridos por SWMM para sub-cuencas. – Autor.	87
Tabla 4. Parámetros requeridos por SWMM para conductos. – Autor.	89
Tabla 5. Parámetros requeridos por SWMM para nodos. – Autor.	91
Tabla 6. Intervalos consecutivos con mayor frecuencia de lluvia de la ciudad de Tunja. – IDEAM.	104
Tabla 7. Relaciones de intensidad-duración-frecuencia. – IDEAM.	105
Tabla 8. Valores de precipitación para tormenta de 6 horas- Periodo de retorno de 5 años. – Autor.	106
Tabla 9. Corrección de Hietograma. – Autor.	107
Tabla 10. Primer escenario de precipitación. – Autor.	108
Tabla 11. Segundo escenario de precipitación. – Autor.	111
Tabla 12. Tercer escenario de precipitación. – Autor.	112
Tabla 13. Parámetros típicos de la zona de estudio. – Autor.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Crecimiento de la población urbana en algunos países del mundo. – Banco Mundial.	18
Figura 2. Hidrograma simulado comparado con datos reales. - Butler.	44
Figura 3. Localización de la ciudad de Tunja en el país. – Alcaldía de Tunja.	45
Figura 4. Perímetro Urbano de la ciudad de Tunja. – SIG Proactiva Aguas de Tunja.	47
Figura 5. Foto mosaico de Tunja en el año 1939. – Autoría propia, basado en foto mosaicos del IGAC.	48
Figura 6. Foto mosaico de Tunja en el año 1978. – Autoría propia, basado en foto mosaicos del IGAC.	49
Figura 7. Foto mosaico de Tunja en el año 1995. – Autoría propia, basado en foto mosaicos del IGAC.	50
Figura 8. Configuración urbana de Tunja en el período 1907-2016. – Autoría propia, actualizado del diagrama de Hidalgo.	51
Figura 9. Redes de alcantarillado Tunja y zonas de cárcavas, año 2016. - SIG Proactiva Aguas de Tunja.	55
Figura 10. Diez años más lluviosos en el mes de Abril, ciudad de Tunja. – IDEAM.	56
Figura 11. Cuadro de horas consecutivas con mayor precipitación en la ciudad de Tunja. – IDEAM.	56
Figura 12. Esquema de complejidad vs incertidumbre en un escenario. – Zurek y Henrichs.	61
Figura 13. Cambio de temperatura media en superficie y cambio de la media porcentual de la precipitación media anual. – IDEAM.	67
Figura 14. Cambios observados en la temperatura media anual en superficie entre	69

	1901 y 2012. – IDEAM.	
Figura 15.	Cambios observados en la precipitación anual en superficie entre 1901 y 2010, y entre 1951 y 2010. – IDEAM.	69
Figura 16.	Temperatura media anual en Colombia en el periodo 1980-2011 y su asociación con eventos El Niño/La Niña. – IDEAM.	71
Figura 17.	Indicador de precipitación anual para Colombia en el periodo 1980-2011 y su asociación con eventos El Niño y La Niña. – IDEAM.	72
Figura 18.	Tendencia de la precipitación acumulada anual para Colombia. – IDEAM.	73
Figura 19.	Escenarios de variación de precipitación para el departamento de Boyacá. – IDEAM.	77
Figura 20.	Modelo conceptual del método empleado por SWMM. – RAS 2015 Título D.	79
Figura 21.	Distritos de Drenaje y Delimitación de la zona Sur-Oriente.– SIG Proactiva Aguas de Tunja.	86
Figura 22.	Zonificación geotécnica de la ciudad de Tunja. - Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana.	93
Figura 23.	Mapa geológico de la ciudad de Tunja zona Sur-Oriental. – POT 2000 Ciudad de Tunja.	94
Figura 24.	Información topográfica disponible de la zona de estudio. - SIG Proactiva Aguas de Tunja	95
Figura 25.	Tratamientos Urbanísticos- MEPOT 2014 Ciudad de Tunja.	97
Figura 26.	Vertimientos al Río Jordán en la ciudad de Tunja, año 2016. – Proactiva Aguas de Tunja.	102
Figura 27.	Curvas IDF estación UPTC Tunja. – IDEAM.	105
Figura 28.	Hietograma para SWMM con una tormenta de 6 horas. – Autor.	110
Figura 29.	Hietograma para SWMM del segundo escenario de precipitación. – Autor.	112
Figura 30.	Hietograma para SWMM del tercer escenario de precipitación. – Autor.	113
Figura 31.	Primer Escenario de precipitación a las 3:15 minutos de la tormenta. –	116

	Autor.	
Figura 32.	Caudales de esorrentía en las descargas al Rio para el 1 evento de precipitación. – Autor.	117
Figura 33.	Segundo Escenario de precipitación a las 2:00 de la tormenta. – Autor.	118
Figura 34.	Caudales de esorrentía en las descargas al Rio Jordán para el 2 evento de precipitación. – Autor.	119
Figura 35.	Tercer Escenario de precipitación a 1 hora de la tormenta. – Autor.	120
Figura 36.	Caudales de esorrentía en las descargas al Rio para el 3 evento de precipitación. – Autor.	121
Figura 37.	N. de Componentes del Sistema Sobrecargados ante los Diferentes Escenarios. – Autor.	122
Figura 38.	Tramos antiguos y nuevos proyectados a construir en el distrito. – Autor.	125
Figura 39.	Drenaje dentro de subcuenca con SUDS. – Autoría propia, modificado de Luis Arias y XP Drainage.	126
Figura 40.	Características del canal verde. - Autoría propia, modificado de XP Drainage.	127
Figura 41.	Tejado de descarga. - Autoría propia, modificado de PWD.	128
Figura 42.	Ubicación de los SUDS. – Autor.	129
Figura 43.	Comportamiento hidráulico del Distrito con SUDS. – Autor.	130

NOMENCLATURA

AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model.
AR5	Fifth Assessment Report.
BMP	Best Management Practices.
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5.
CN	Curve Number.
ENSO	El Niño Southern Oscillation (Fenómeno del niño).
EPA	United States Environmental Protection Agency.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
LID	Low Impact Development.
MAAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente de España.
MCG	Modelos de Circulación Global.
NRCS	Natural Resources Conservation Service (Agencia de Gobierno).
RCP	Representative Concentration Pathways.
REA	Reliability Ensemble Averaging.
SCS	Servicio de Conservación de Suelos.
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.
SWMM	Storm Water Management Model.

RESUMEN

El aumento de la migración de la población rural hacia las zonas urbanas está relacionado directamente con el desarrollo económico, los cambios en la organización de la sociedad, los usos de la tierra y las características culturales de determinada población. Estas situaciones alteran las características del suelo, tornándolos impermeables al paso del agua lluvia y generando mayores volúmenes de escorrentía en eventos de precipitación. Como consecuencia del efecto del cambio climático, cuya tendencia va en aumento de acuerdo al Intergubernamental Panel of Climate Change, las ciudades intermedias, futuros motores de desarrollo, deben prepararse para la creciente escorrentía superficial. El presente trabajo tiene como objetivos realizar la modelación del drenaje pluvial en una ciudad intermedia como Tunja, Boyacá, Colombia, para diferentes escenarios de cambio climático, determinando las consecuencias de los fenómenos descritos, el alcance de esta problemática y la solución de la misma. La estimación de escorrentía y comportamiento del sistema fue determinado a través del modelo Storm Water Managment Model-SWMM desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos a través de parámetros locales de la ciudad; y los escenarios de cambio climático establecidos en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Los resultados obtenidos muestran varias situaciones de riesgo de inundación debido a incrementos en el drenaje pluvial y de igual forma se presentan alternativas de mitigación con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), produciendo resultados y soluciones favorables a las problemáticas obtenidas con el modelo. Esta investigación fue financiada por la Empresa de Proactiva Aguas de Tunja.

ABSTRACT

The increasing migration from the rural to the urban is directly related with the economic development, changes in the organization of the society, the use of soil and the cultural characteristics of a population. These situations alter the soil characteristics and create an impermeabilization to the rain generating a higher level of water runoff in events of high precipitation. As a consequence of climate change, whose tendency is increasing according to the Intergovernmental Panel of Climate Change, the intermediate cities, future development centers, must be prepared for the increasing water runoff. The present work has as goals, the modelling of pluvial drainage in an intermediate city such as Tunja in the province of Boyacá in Colombia under different scenarios of climate change, identifying the consequences of the climate events, their scope and their possible solutions. The runoff and the system behavior was modelled by the software Storm Water Management Model (SWMM) developed by the US Environmental Protection Agency (US-EPA) by means of parameters measured in the study area and several scenarios established by the Third National Communication of Climate Change, developed by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM). The obtained results show several risk situations of flooding because of increases in the pluvial drainage and also alternatives are presented with Urban Systems of Sustainable Drainage (SUDS), producing favorable results and solutions to the problematic of pluvial drainage. This research was funded by “Proactiva Aguas de Tunja”

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de alcantarillado de una ciudad tienen como función principal atender al concepto de saneamiento básico en el que se contemplan las actividades relacionadas con las condiciones básicas de salud que afectan al ser humano. El concepto de los alcantarillados en la sociedad, se remonta a las épocas más antiguas de la civilización, en la construcción de estructuras para el destino de residuos en las culturas Egipcias y Griegas.

En los últimos años se ha venido presentado un fenómeno mundial de migración de la población rural hacia los centros urbanos que debe ir de la mano con nuevas infraestructuras civiles que favorezcan el saneamiento básico, entre estas las redes de alcantarillado. La alteración de las condiciones iniciales del suelo producidas por el rápido desarrollo urbano, trajeron consigo la eliminación de las coberturas vegetales, que fueron remplazadas por zonas endurecidas que poseen una mayor impermeabilidad. Debido a esto, los eventos de precipitación en las zonas urbanizadas se resumen a grandes volúmenes de escorrentía superficial que producen mas inundaciones en comparación con las zonas no urbanizadas que conservan la cobertura vegetal, en donde se producen pequeños caudales de escorrentía superficial gracias a ciertos procesos hidrológicos como la infiltración y almacenamiento subterráneo. Cuando esta problemática se sume a las predicciones de la ciencia sobre las variaciones del clima producidas por el calentamiento global, la situación se magnificará, debido a que los científicos pronostican un aumento gradual de la temperatura para los próximos años, cuyo efecto más perceptible esta en el ciclo hidrológico. Lo anterior, representa drásticos cambios en los patrones de la precipitación del agua produciendo desastres naturales como inundaciones y sequias que ya han cobrado numerosas víctimas mortales y cuantiosas pérdidas económicas a nivel mundial.

Algunos expertos apuntan a que una mejor planificación y gestión del recurso hídrico empieza desde el ordenamiento territorial de las ciudades, en el que se respete y se controle

el fenómeno de urbanización resaltando siempre la importancia de las zonas verdes o permeables en el ciclo hidrológico, además que ser agentes mitigantes de los efectos del calentamiento global. El problema radica en que las grandes ciudades del país, ya cuentan con un ordenamiento territorial en el que se omitieron los factores anteriormente descritos. Por esto, los nuevos esquemas de desarrollo de las ciudades menores deben abarcar estas problemáticas, y estar preparados para controlar entre otras cosas, el proceso de urbanización con todos sus alcances, en conjunto con el cambio climático, para construir territorios adaptados y resilientes al clima en donde se garantice un bienestar en el futuro que se construye hoy.

El presente trabajo, busca evaluar el drenaje urbano de la ciudad de Tunja, a través de la modelación y análisis del comportamiento de la red de alcantarillado pluvial de un sector de la ciudad ante eventos climáticos extremos de posible ocurrencia, extraídos con la ayuda de las comunicaciones nacionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) que operan como herramientas científicas para la toma de decisiones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

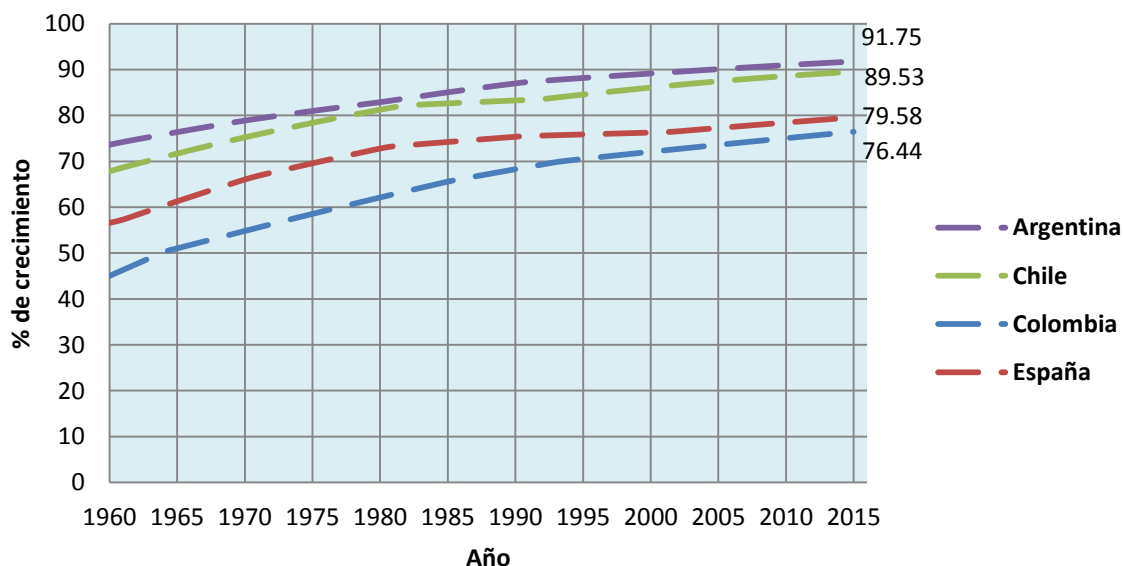
La revisión bibliográfica permite contextualizar hallazgos y estudios previos en los cuales se han trabajado temáticas similares al desarrollo del presente trabajo de investigación.

2.1. Desarrollo Urbano y Drenaje Pluvial.

Hoy en día la mayoría de la población mundial vive en las ciudades. La tendencia mundial actual de urbanización está relacionada directamente con el desarrollo económico y los cambios en la organización de la sociedad, los usos de la tierra, y las características culturales de determinada población. Estos cambios demográficos darán lugar a impactos importantes pero poco conocidos sobre el medio ambiente. En el año 2000 más del 70% de la población de los países desarrollados vivía en las ciudades, en comparación con aproximadamente el 40% de los países en desarrollo. Para el 2030, se espera que la población urbana en los países en desarrollo aumente más del doble, aproximadamente a 4.000 millones, con un aumento estimado de 3 veces la ocupación de la superficie terrestre, mientras que en los países desarrollados podría aumentar hasta en un 20%. Paralelamente a esta expansión urbana global, existe la necesidad de una transición de sostenibilidad hacia una población humana total estable, junto con el aumento de los estándares de vida y el establecimiento de equilibrios a largo plazo entre las necesidades del desarrollo humano y los límites ambientales del planeta. Por lo tanto, un gran desafío a nivel mundial es comprender y predecir como los cambios en la organización social y la dinámica resultante de la urbanización impactará las interacciones entre la naturaleza y sociedad (Bettencourt, Lobo, Helbing, Kuhnert y West, 2006). Durante los años ochenta y noventa, los sistemas productivos y los modelos territoriales y urbanos se han transformado, como consecuencia del aumento de la competencia, el cambio tecnológico, la integración económica y la globalización de los mercados. (Vásquez, 1999). La mayoría de la producción no agrícola en los países desarrollados se produce en áreas metropolitanas, razón principal del porque la actividad económica se aglomera en las ciudades. Esto genera también que las ciudades

sean los principales motores del crecimiento económico (Lucas 1988). En consecuencia, la magnitud del proceso de urbanización afecta el crecimiento y desarrollo de una sociedad conduciendo a la evolución espacial de la producción y la aglomeración de la población en las ciudades (Black y Henderson, 1999). Hoy en día mas y mas personas escogen vivir en las ciudades. Con más de la mitad de la población mundial urbanizada, surge la necesidad urgente de tener una visión integral para el saneamiento básico de las necesidades de la población (Fattahi y Fayyaz, 2009). En la Figura 1, se observa el comportamiento del crecimiento de la población urbana en algunos países.

Figura 1. Crecimiento de la población urbana en algunos países del mundo.



Fuente: Banco Mundial.

Dentro del concepto de saneamiento básico se contemplan aquellas actividades relacionadas con el mejoramiento de las condiciones básicas que afectan a la salud, o sea, el abastecimiento de agua, la disposición de excretas y residuos sólidos. Entre los componentes operativos del saneamiento básico se encuentran: el agua potable, el alcantarillado, la disposición de excretas en el medio rural, el aseo urbano, etc. (Pérez,

Diago, Corona, Espinosa y González, 2011). El reconocimiento de la importancia del saneamiento y su relación con la salud del hombre se remonta a las más antiguas culturas. Por ejemplo, existen evidencias de hábitos sanitarios incluida la presencia de baños, alcantarillado en las construcciones y drenaje en las calles, en las ruinas de una civilización de hace aproximadamente 4.000 años al norte de la India (Rosen 1994). La visión de saneamiento que presentan otros pueblos es igualmente de gran significado histórico como, por ejemplo, la evidencia de la preocupación por el flujo de agua en Egipto; los grandes acueductos y el cuidado por el destino de los residuos en la cultura creto-micénica; y las nociones de ingeniería sanitaria de los Quechuas (Heller, 1997). El creciente ritmo de la urbanización afectará a muchas áreas de la población mundial, el entorno de vida y su acceso a servicios básicos. Los retos para proporcionar servicios básicos de saneamiento juegan una parte esencial de la planificación y gestión del futuro desarrollo urbano. Sin una planificación adecuada, se corre el riesgo de más barrios marginales no planificados y la amenaza potencial que las pequeñas localidades y municipios de hoy en día, se conviertan en las mega ciudades no planeadas que carezcan de buena organización en el mañana. La planificación del saneamiento para las ciudades necesita centrar su atención en las necesidades de todos los habitantes y estratos sociales de determinada población (Lüthi, 2011).

El agua es una necesidad vital. Está presente en todas partes, en todos los ecosistemas y presente en todos los seres vivos. Sin agua, la vida tal como la conocemos, simplemente dejaría de existir. El agua es un recurso que está en constante movimiento y pasa de un estado a otro, lo cual obliga a un consumo racional; gestión compleja y difícil aún en las mejores circunstancias. El agua puede estar en todas partes, pero su uso siempre ha sido limitado en cuanto a disponibilidad, cantidad y calidad (Biswas, 2004). La administración y operación de sistemas de abastecimiento de agua urbana son tareas difíciles que requieren una planificación cuidadosa. Diferentes modelos de optimización han sido desarrollados para cumplir con este desafío y para entender mejor el comportamiento del sistema de

abastecimiento y manejo de agua urbana. Sin embargo, en el desarrollo de las prácticas del manejo, los efectos de las incertidumbres asociadas con la disponibilidad de agua, demanda de agua, operaciones del sistema y requisitos ambientales afectarían significativamente las decisiones de manejo. Por lo tanto, se desea la incorporación y planificación de varias incertidumbres y complejidades dentro de un marco general de gestión de abastecimiento y recolección de agua urbana (Qin y Xu, 2011).

La planificación del diseño de una ciudad y su infraestructura mediante la modelación de flujos de agua lluvia, se ha convertido en una rutina estándar de manera que se puedan minimizar al máximo los posibles daños producidos a la propia ciudad y a las fuentes hídricas que esta posea. Otro objetivo adicional de la modelación previa de las aguas lluvia, es poder minimizar los costos de construcción de la infraestructura para la misma. Los datos de registros de escorrentía y precipitación constituyen la base necesaria para los cálculos hidrológicos urbanos y su respectiva modelación. Los problemas con el manejo del drenaje de aguas lluvia tienen sus orígenes en la concentración de la población en áreas relativamente pequeñas. Debido al fenómeno de urbanización se construyen diferentes áreas destinadas a vivienda y transporte, áreas que se vuelven impermeables al paso del agua. Esto genera un cambio en el ciclo hidrológico; la infiltración y la recarga subterránea de acuíferos disminuyen con este proceso. Las características del flujo de escorrentía cambian debido al transporte de sedimentos y contaminantes, y los aportes de escorrentía aumentan. De esta manera, las características del drenaje urbano cambian no solo dentro de la ciudad sino también en los aportes a las cuencas hídricas aledañas. Debido a la realización de estos procesos, la gestión de las aguas pluviales se orientó únicamente para su aprovechamiento mediante el almacenamiento y uso durante la década de 1970. Luego durante la década de 1980 y 1990 las aguas lluvia pasaron a considerarse como una importante fuente de contaminación debido a que arrastraban sedimentos y contaminantes, y los principales objetivos de la gestión de aguas pluviales se enfocó en la protección de los ecosistemas y el ciclo natural del agua por la introducción de controles de origen local

como la atenuación de flujo y los tratamientos naturales o sistemas biológicos contruidos como estanques, humedales, plantas de tratamientos para la descontaminación, etc. (Niemczynowicz, 1999). Desde esta perspectiva, Cairncross (1899) reconoce la importancia del drenaje pluvial y la disposición de residuos sólidos y resalta el hecho de que el mismo banco mundial y otros bancos de desarrollo regional, a pesar de haber aplicado recursos importantes en esas áreas, han apoyado pocas investigaciones sobre el tema. Considera, por ejemplo, que las técnicas desarrolladas en los últimos 10 años en el abastecimiento de agua y alcantarillado constituyen solo el comienzo de la investigación sobre la tecnología apropiada para esas áreas (Heller, 1997).

2.2. Cambio climático e hidrología urbana.

Hasta hace unos años, era escaso el análisis (Por ejemplo el realizado por Alcamo en 1997) a escala global de los impactos potenciales del cambio climático en los recursos naturales. Muchos aspectos del medio ambiente, la economía y la sociedad dependen de los recursos hídricos; los cambios en el recurso hidrológico tienen el potencial de afectar gravemente la calidad del medio ambiente, el desarrollo económico y el bienestar social. Uno de los principales retos para la humanidad hoy en día, es enfrentar las consecuencias de los cambios acelerados del clima, los cuales tienen impacto en el ambiente, la sociedad y la economía. La ciencia estima que el mundo puede llegar a tener dos grados más de temperatura para el año 2.100 (IDEAM, 2015). El calentamiento global, debido al efecto invernadero, tendrá efectos significativos en el ciclo hidrológico (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 1996). El ciclo hidrológico se intensificará, con más evaporación y precipitación, pero la precipitación extra se distribuirá de forma desigual alrededor del globo terrestre de tal forma que algunas partes del mundo puedan sufrir alteraciones importantes tanto en las épocas húmedas como en las épocas secas. El segundo informe del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) advierte que el calentamiento global conduciría a un aumento tanto de las inundaciones como de las

sequias (Arnell, 1999). Debido a la limitación de las capacidades técnicas, se ha dificultado controlar los eventos extremos de las manifestaciones climáticas que se han producido en los últimos años, por ejemplo la inundación extrema producida por el Río Elbe en 2002 estuvo seguida por una ola de calor y sequias en 2003 en Europa. Tales eventos han desencadenado una conciencia cada vez mayor de los entes gubernamentales administradores del recurso hídrico, para así poder enfrentar los desafíos que conlleva el cambio climático global. Mejorar la percepción de eventos climáticos extremos y el análisis basado en los registros históricos climáticos no nos dice mucho sobre la probabilidad de eventos en el futuro dadas las incertidumbres que produce el cambio climático. Por esto y debido a las condiciones tecnológicas, económicas, institucionales y culturales de la humanidad, la gestión global del agua se enfrenta a grandes desafíos debido al aumento del calentamiento global y cambio climático, generado por que día a día estos factores vienen transformando las condiciones del medio ambiente (Pahl-Wostl, 2006).

El agua, como principal damnificado del cambio climático inicia su ciclo hidrológico por el calor de la radiación solar que evapora el agua presente en el océano y los cuerpos de agua de la superficie terrestre; luego con la ayuda de los vientos esta se mueve a la atmosfera y se condensa para formar nubes; finalmente, cae de nuevo a la superficie de la tierra como lluvia o nieve y se repite el ciclo hidrológico global del agua debido a que los cauces o corrientes originadas siguen los cursos de drenaje hacia los ríos, y estos a su vez a los océanos; Debido a esto, hay una influencia directa entre el calentamiento global y la precipitación. El aumento de la temperatura global conduce a una mayor evaporación y por tanto al secado superficial (Aumentando así la intensidad y duración de las sequias). Por otro lado la capacidad de la retención de agua en el aire aumenta aproximadamente un 7% por 1 °C más de temperatura, lo que conduce a un aumento de vapor de agua en la atmosfera. Por lo tanto las tormentas, ya sean individuales, tropicales, de nieve o ciclones tropicales, tendrán mayor humedad y producirán eventos de precipitación más intensos. Y se observa en general que aunque la ocurrencia de estos eventos sea ocasional, cuando

ocurran serán muy intensos, y esto aumenta el riesgo de inundaciones. Este modelo, es el esquema general del modelo del cambio climático y se proyecta que continúe en el futuro, debido a que el calentamiento global producirá mas precipitaciones que tormentas de nieve, el derretimiento de los polos avanzado aumentará volúmenes de agua en los océanos y se producirá mayor evaporación de los cuerpos de agua globales, que finalmente terminarán en riesgos de inundaciones que aumentarán la probabilidad de ocurrencia de desastres ambientales (Trenberth, 2011).

La seguridad humana ante riesgos ambientales, significa tener protección contra eventos impredecibles que puedan llegar a perturbar o alterar vidas y medios de subsistencia. Pocos recursos naturales tienen una influencia tan crítica para la seguridad humana como lo es el recurso hídrico. Como recurso productivo el agua es el recurso esencial de la vida humana en el mundo. Pero el agua también posee propiedades destructivas, como lo han demostrado las tragedias por tormentas e inundaciones. El estudio para el acceso al agua como insumo productivo y para la protección contra las vulnerabilidades asociadas con la incertidumbre en los flujos de agua es una de las claves del desarrollo humano. Hay grandes desigualdades mundiales en cuanto a la infraestructura que poseen los países para el manejo de aguas pluviales. Pocas personas en esos países son conscientes de cómo las inversiones en infraestructura para el manejo de aguas, generan crecimiento económico y empleo. En los Estados Unidos, el huracán Katrina proporcionó un trágico recordatorio de la importancia de dicha infraestructura. Ese evento fue tan impactante en parte porque la pérdida de vidas y destrucción fueron inesperadas. Por el contrario, gran parte de los países en vía de desarrollo experimentan un déficit en la existencia de esta infraestructura para el manejo de aguas lluvia e inundaciones. La mitigación del riesgo en la gestión del agua a través de sistemas de control de inundaciones y el desarrollo económico en infraestructura ha sido fundamental para el progreso humano en muchos países ricos. Un ejemplo muy importante de esto es Japón, donde las fuertes inversiones post-guerra en infraestructura apoyaron el rápido desarrollo de las hidroeléctricas, el control de las inundaciones y el

regadío para la agricultura. Hasta la Segunda Guerra Mundial, las inundaciones causadas por las fuertes lluvias y tifones tuvieron efectos enormemente perjudiciales sobre la economía Japonesa, con unas pérdidas que superaban el 20% de PIB. Desde 1970 los impactos de las inundaciones nunca han superado el 1% del PIB. La mayor parte de la población de Japón y el 60% de sus activos productivos se encuentran en llanuras bajas, vulnerables a las inundaciones, pero la gestión de la infraestructura del agua ha reducido el riesgo a un costo promedio de alrededor 9 billones de dólares al año. Pero ¿Poseen todos los países desarrollados y en vía de desarrollo un plan de infraestructura de agua pluvial que permita mitigar los impactos anuales producidos por los eventos climáticos? (UNDP, 2006).

La modelación para la predicción de los impactos ambientales de las áreas urbanas sobre las diferentes cuencas hidrográficas y la búsqueda de los métodos más óptimos para la mitigación del riesgo es una nueva área de desafío dentro de la hidrología urbana moderna. Sin embargo, el rendimiento de las soluciones técnicas utilizadas en el diseño de estructuras relacionadas con el agua en una ciudad depende directamente del clima, así como las condiciones sociales, económicas y culturales de la misma. Algunas soluciones tecnológicas pueden ser significativamente útiles y funcionar perfectamente en algunos países, pero aplicadas en diferentes condiciones pueden convertirse en un fracaso total. Toda planificación y desarrollo de las zonas urbanas, el diseño de estructuras artificiales y todas las actividades relacionadas con la gestión del agua en las ciudades deben tener en cuenta las condiciones climatológicas e hidrológicas locales, así como el comportamiento y la interacción con la zona rural de la ciudad ante futuros desarrollos urbanos. Las condiciones hidrológicas, como por ejemplo, el tamaño de las cuencas hidrográficas, la ubicación espacial de la ciudad (dentro de la cuenca) la proximidad a cuerpos de agua divisores (por ejemplo ríos) el tamaño y las características de los cuerpos de agua aledaños, las características de acuíferos, fuentes de agua subterráneas, y el crecimiento de la ciudad entre otras, son prerequisites básicos locales que determinan la ubicación y el desarrollo de

las ciudades en cuanto a hidrología urbana que deben tenerse en cuenta en la planificación para todos los nuevos desarrollos que vaya a tener la ciudad y la cuenca hidrográfica. Dicha planificación debe basarse en datos locales, por tanto la recolección de datos hidrológicos fiables y adecuados es una tarea de vital importancia de los hidrólogos urbanos de todo el mundo. Actualmente se han desarrollado ya varios proyectos para la gestión de aguas pluviales en todo el mundo. Pero ¿Deberían orientarse los modelos de la gestión del agua pluvial a las nuevas zonas y proyectos que se van a urbanizar? O ¿Deberían sustituirse gradualmente todos los sistemas urbanos actuales? (Niemczynowicz, 1999).

2.3. Drenaje Pluvial en Ciudades Intermedias.

De acuerdo a la evolución de la jerarquía del sistema urbano en Colombia, se establece una caracterización rango-tamaño de la estructura del sistema urbano Colombiano, la cual está compuesta por: Una “*Metrópoli Nacional*” conformada únicamente por Bogotá, puesto que en cada uno de los años censales se posiciona como la primera ciudad y la de mayor capacidad de concentración en el país, encabezando a través del tiempo la estructura del sistema urbano. “*Grandes Metrópolis*”: conformadas por Cali, Medellín y Barranquilla; las dos primeras con un tamaño de población muy cercano entre sí, disputan su posición como segunda ciudad del sistema urbano colombiano. Aunque Barranquilla, desde la unidad ciudad-municipio, evidencia un rezago en la concentración de población respecto a Cali y Medellín, no pierde su rango de cuarta ciudad. Cabe resaltar que, con base en la teoría que presenta la función rango-tamaño, la segunda ciudad siempre ha estado en desproporción dentro del sistema urbano, lo que fortalece el papel que tiene Bogotá como primera ciudad. “*Ciudades Metropolitanas Emergentes*”: Conformadas por Cartagena, Cúcuta, Bucaramanga y Pereira. Es importante mencionar que aunque el tamaño de Pereira es superado por municipios como Ibagué e incluso Soledad, su importancia en esta categoría de ciudades radica en su carácter de núcleo metropolitano de un área mayor. “*Ciudades intermedias-pequeñas*”: Constituye el resto de la población base del sistema urbano del

país. Debe anotarse que, como parte de este grupo y durante los últimos diez años, se han configurado entre 35 y 40 municipios nuevos en el país, con una articulación y engranaje funcional menos evidente al sistema urbano del país (León y Ruiz, 2015).

2.3.1. Problemática del Drenaje Pluvial en Europa.

2.3.1.1. España.

España es un país de riesgo frente a los peligros de la naturaleza; algunos de sus territorios ocupan los primeros puestos en la clasificación europea de espacios geográficos con riesgo, que se ha incluido en el informe sobre peligros naturales y tecnológicos en Europa. Esto se debe a la coincidencia de un medio físico complejo y difícil y una población dinámica y creciente que se acumula en gran medida en áreas litorales. En el período 1995-2008 se registraron en España 897 víctimas mortales debido a la acción de los peligros naturales: 70 víctimas al año por término medio. Inundaciones, tormentas y temporales marítimos son los peligros naturales que más víctimas ocasionan en el país. El enorme desarrollo que ha tenido la construcción residencial en el país es una de las causas del incremento de la vulnerabilidad y la exposición ante los peligros climáticos. En las últimas dos décadas se ha construido por encima de lo racionalmente sostenible en España y además algunas de esas edificaciones se han llevado a cabo en zonas de riesgo. Especialmente en áreas expuestas al peligro de inundación, pero asimismo en sectores con riesgo ante sequías, temporales marítimos y deslizamientos (Olcina J, 2009). Toda la problemática anteriormente descrita se agrava en determinadas zonas donde se presentan con relativa frecuencia precipitaciones de corta duración pero de intensidad extrema. Este es el caso de muchas zonas del litoral mediterráneo donde la intensidad de la lluvia correspondiente a una determinada duración y su probabilidad es aproximadamente el doble que la correspondiente a ciudades europeas no mediterráneas. Por ejemplo, para un período de retorno de 10 años y 30 minutos de duración en Montpellier y Barcelona la intensidad de lluvia es superior a los 80 mm/h (Dolz, J y Gomez M, 1994).

En las últimas dos décadas se ha pasado de una carencia de tratamiento del riesgo en los procesos de planificación espacial a la aprobación de normativas que obligan a la inclusión de análisis de riesgo en la documentación necesaria para su desarrollo. Los episodios de inundación han merecido una atención preferente en las políticas de reducción del riesgo puestas en marcha en los territorios europeos. Así, España le apuesta a la ordenación del territorio como medida racional, económica y sostenible para la reducción del peligro de las inundaciones en la escalas menores (regional, departamental y, sobre todo, local) (Olcina J, 2004 y 2009).

2.3.1.2. Europa del Norte.

En muchas ciudades de Suecia, las labores de renovación de los sistemas de tuberías no se hacen con mucha frecuencia, pero se proyectan diferentes labores a futuro para poder realizar renovaciones a las existentes hoy en día. Olsson et al. (2008) propone que la planificación, diseño y funcionamiento de los futuros sistemas de drenaje urbano tengan en cuenta la influencia del cambio climático, en especial los próximos cambios en las intensidades de lluvia ya que estas tendrán un gran impacto en los sistemas de drenaje urbano. Ante esta problemática de la predicción de los cambios de la precipitación, se pueden usar 2 estrategias principales. Una de ellas consiste en realizar una proyección pluvial con la ayuda de datos históricos de precipitación. Algunos autores (Pagliara et al. 1998) encontraron que la máxima duración de precipitación corta anual en Toscana, Italia, ha aumentado desde mediados del siglo XX, mientras que el aumento fue menos pronunciado para eventos de larga duración extrema de lluvia. Arnbjerg-Nielsen (2006) encontró que la intensidad máxima de eventos de 10 minutos tiene un incremento significativo en el este de Dinamarca. Este tipo de tendencias podría proyectarse en un futuro, como hizo por ejemplo Denault et al. (2006) para una cuenca urbana en Columbia Británica, una provincia ubicada en el occidente de Canadá. El uso del software SWMM con las futuras intensidades de lluvia estimadas a partir de tendencias extrapoladas, dio

como resultado un aumento del 100% en las descargas pluviales máximas del diseño hasta el año 2050. La segunda manera es utilizar proyecciones a través del método de downscaling en el que se aplican cambios futuros en la precipitación en una serie histórica. Esta última, proporciona una estimación más completa del comportamiento futuro de la precipitación (Olsson, Berggren, Olofsson y Viklander, 2008).

En el Reino Unido, Evans et al. (2004) encontraron que un aumento del 40% en la intensidad de la lluvia llevará a un aumento en el volumen de inundaciones del 100% y un aumento en el número de edificios dañados del 130%.

Noruega ha sufrido con frecuencia daños causados por inundaciones en las zonas urbanas durante los últimos años. Al igual que otros países del mundo, los sistemas de drenaje urbano de Noruega se enfrentan a retos considerables debido a tres factores principales: El cambio climático, la rápida urbanización y el diseño poco planificado de los sistemas actuales. Las consecuencias entre otras son la insuficiencia de capacidad en los sistemas de alcantarillado existentes, el riesgo de daños por inundaciones y el desbordamiento de alcantarillados combinados. Varios municipios han reportado daños frecuentes y severos en las inundaciones y los desbordamientos de sistemas combinados de alcantarillado en la última década (Milina 1999, König et al. 2002, Nie 2004, Gullaksen 2006, Vevatne et al. 2007, Lindholm 2007, Lindholm et al. 2007, Madsen 2007, Fredrikstad 2007b).

Nie, Lindholm O, Lindholm G y Syversen (2008) evaluaron las posibles consecuencias para los sistemas de alcantarillado causadas por los escenarios actuales y realizando una proyección del cambio climático. El sistema de alcantarillado en la cuenca de Veumdalen, en la ciudad Fredrikstad al sureste de Noruega, se utilizó como estudio de caso y se analizaron las posibles consecuencias de inundaciones, sobrecargas en tuberías y desbordamiento de alcantarillado combinado. Las simulaciones se realizaron para eventos anuales (que produjeron muchas incertidumbres por los largos periodos de tiempo), estacionales y diarios.

2.3.2. Problemática del Drenaje Pluvial en América del Norte.

2.3.2.1. Canadá.

Estudios de caso en diferentes regiones de Canadá indicaron consecuencias significativas para los sistemas de alcantarillado bajo simulaciones de diferentes escenarios artificiales de cambio climático (Watt et al., 2003). En la cuenca urbana de Malvern en Burlington, Ottawa, Marsalek (1977, 1979) supuso que la intensidad de lluvia aumentaría un 15% en comparación con la actual precipitación, de 24,5 mm a 28,5 mm; como consecuencia el volumen de escorrentía aumentaría en 400 m³ y el caudal de descarga aumentaría 0,2 m³/s; como consecuencia de esto, el sistema de alcantarillado de aguas pluviales actual podría no transportar el flujo resultante de esos escenarios y varias tuberías experimentarían sobrecargas, de acuerdo con el modelo realizado en SWMM. En otro estudio de caso en la Cuenca urbana de Central Park en Ottawa, Ontario (Cumming Cockburn 1999), mientras aumentaba la intensidad de la tormenta en un 5%, 10%, 15% y 20%, el número de tuberías que sobrepasaban la capacidad era de 10, 25, 34 y 41, respectivamente, y el porcentaje correspondiente de tubos de sobrecarga fue del 7%, 18%, 25% y 30%. Por tanto se considera que hay una relación aproximadamente lineal entre el aumento de las precipitaciones y el número de tuberías que no responden a las nuevas demandas de caudal.

2.3.3. Problemática del drenaje pluvial en Latino América.

2.3.3.1. Argentina.

De acuerdo al Banco Mundial (2000), Argentina, dentro del contexto mundial, se encuentra entre los 14 países más afectados por catástrofes de inundaciones rurales y/o urbanas, alcanzando pérdidas superiores al 1,1 % del PIB nacional. La frecuencia de ocurrencia de afectaciones importantes por inundaciones de todo tipo es elevada, siendo superior a un evento importante cada diez años. Desde 1957 han ocurrido 12 episodios severos (uno cada

cuatro años), ocasionando muertes y elevadas pérdidas en infraestructura, producción agropecuaria, bienes privados y actividades económicas. Aún hay remanentes de diversos problemas, fundamentalmente aquellos ligados al crecimiento urbano, a la falta de planificación urbana, a la interacción de infraestructuras diversas con los cursos fluviales y al empleo de obras de conducción como única solución al drenaje pluvial. Otro ejemplo de vulnerabilidad, en este caso a las precipitaciones, lo constituye la ciudad de Resistencia. De acuerdo a Pilar y Depettris (2000), en la actualidad lluvias de 25mm en media hora producen anegamientos de calles céntricas, inclusive de las que circundan el edificio municipal. El origen de este problema tal vez se encuentre en el crecimiento explosivo, pero desordenado que sufrió la ciudad en el último cuarto de siglo. Los problemas actuales requieren sin lugar a dudas, la elaboración de importantes obras enmarcadas en un Plan Director de Drenaje Urbano. Sin embargo, sería muy difícil garantizar que estas costosas obras sean eficaces si no se congela la situación actual en lo que respecta al grado de impermeabilización. Con esta finalidad, de acuerdo a lo citado por Pilar y Depettris (2000), el Concejo Municipal de la ciudad de Resistencia aprobó una modificación a la Ordenanza N° 4542, donde en esta nueva Ordenanza N° 5403, introdujo dos nuevos indicadores: el FIS (factor de impermeabilización del suelo) y el FIT (factor de impermeabilización total). Además, según esta nueva ordenanza, todo proyecto nuevo de edificación, debe verificar el impacto cero, entendiendo en este concepto que el pico del caudal generado no se incremente con el aumento de la impermeabilidad del terreno.

En toda la extensión del área Metropolitana de Buenos Aires y su conurbano, el paisaje natural se encuentra seriamente afectado por la mano del hombre. La morfología de la región se halla fuertemente enmascarada y en gran parte modificada por la gran urbanización, alternando las redes originales de drenaje con la canalización y entubamiento de los diversos cursos de agua. Estas alteraciones han modificado totalmente el funcionamiento natural de las cuencas hídricas superficiales. El constante y no planificado crecimiento de la ciudad de Buenos Aires, la falta de inversiones durante más de medio

siglo y la alteración del régimen de precipitaciones, transformaron en obsoleto un sistema de desagües ejemplar para su época. En efecto, en las últimas décadas la ciudad de Buenos Aires se ha inundado con frecuencia generando serios inconvenientes y daños materiales de consideración. Falczuk (2001) cita dos causas básicas asociadas a esta problemática: (a) las crecientes naturales de los cursos de agua que atraviesan la ciudad y los problemas estructurales de la red de desagües, cuya capacidad ha sido superada por la ocupación no planificada de los valles de inundación y (b) los fuertes vientos del sector sudeste que producen un crecimiento del río de la Plata por encima de su media normal, inundando las zonas costeras.

La ciudad de Buenos Aires cuenta con un complejo sistema de desagües que descargan en el río de la Plata. Los sistemas fueron proyectados para una población y densidad habitacional menores a las actuales, considerando una ciudad de edificación abierta, con espacios no impermeabilizados y bajo coeficiente de escorrentía. En la actualidad, el alto porcentaje de superficies impermeables directamente conectadas, la escasa pendiente superficial y la gran extensión de las cuencas hídricas torna complejo el desagüe con ocasión de lluvias intensas.

En síntesis, puede afirmarse que en la ciudad de Buenos Aires a lo largo de su historia existió un manejo de las inundaciones ligado a una concepción del desastre como producto; esto es, como algo que solo puede enfrentarse y solucionarse una vez ocurrido. Sin embargo, los desastres son momentos concretos en los que se pone en evidencia el riesgo en el que vive la población. Cada inundación catastrófica resulta de un proceso continuo, diario, de construcción social del riesgo. En este proceso es fundamental el papel jugado por la gestión urbana vinculada tanto a las inundaciones como a la orientación de la ocupación de territorios que son altamente peligrosos respecto a la inundación (Ambrosino et al. 2004).

2.3.3.2. Chile.

El territorio de Chile comprende un amplio rango de zonas climáticas. Los relieves montañosos dispuestos en sentido longitudinal, cuyas cimas están hacia el sur progresivamente cubiertas de nieve y de glaciares, la actividad sísmica y volcánica, los cambios ambientales derivados de la presión antrópica, alteran las características climáticas zonales controladas por la latitud e incrementan la vulnerabilidad del territorio a la ocurrencia de inundaciones fluviales (Rojas, Mardones, Arumí y Aguayo, 2014).

En Chile, una serie de inundaciones fluviales, relacionadas en su mayoría con eventos ENSO, han dejado víctimas fatales y millones de dólares en pérdidas. Los episodios catastróficos se han concentrado desde la región de Valparaíso al sur. Las inundaciones registradas en los años 2000, 2002 y 2006, dejaron 99.742 damnificados; 272.111 afectados; 11.685 albergados; 26 muertos y 3 personas desaparecidas (Rojas, Martínez y Jaque, 2009).

En los últimos cien años, las soluciones técnicas a los problemas de aguas lluvias urbanas han evolucionado dramáticamente. A principios del siglo XX no se hacía distinción entre las aguas lluvias y las aguas servidas, de manera que la solución consistía en desprenderse de ellas rápidamente, capturándolas y evacuándolas hacia aguas abajo. En muchos casos se desarrollaron soluciones combinadas, mezclando las aguas lluvias y las servidas en el mismo sistema de evacuación. Este enfoque alentó las soluciones basadas en colectores enterrados que permiten el aprovechamiento de la superficie del terreno para otros fines. Así se solucionó simultáneamente la evacuación de aguas servidas y aguas lluvia del centro de Santiago, como uno de los proyectos del centenario de la República (Bertrand, 1908). Este enfoque, orientado a combatir los síntomas y no las causas, fracasó con el crecimiento de las ciudades, generando grandes problemas de aguas abajo de ellas, con muchas soluciones obsoletas e incapaces de hacerse cargo del crecimiento urbano, como tampoco de la contaminación de las aguas lluvias y dificultando el tratamiento de las aguas servidas.

Durante la segunda mitad del siglo XX, muchas ciudades de gran desarrollo reconocieron la necesidad de cambiar el paradigma del drenaje urbano y propusieron un nuevo enfoque, que considera las aguas lluvias como un recurso urbano y enfrenta las causas de los problemas más que los síntomas. Este punto de vista reconoce que es necesario controlar el volumen, los caudales máximos y la contaminación en la fuente, minimizando el cambio hidrológico y las externalidades negativas del proceso de urbanización. Para ello se desarrollaron nuevas estrategias conocidas en EE.UU. como BMP, Best Management Practices (Urbonas y Stahre, 1993), en Francia como Techniques Alternatives (Chocat, 1992), o Técnicas de Gestión de Ecurrimientos Urbanos, TGEU. En Chile se conocen como Técnicas Alternativas, (MINVU DICTUC, 1996). Estas estrategias apuntan a la captura de un volumen de agua lluvia para su tratamiento, en el mismo lugar en que se generan, junto a la aplicación de técnicas y obras que permiten y facilitan la infiltración y el almacenamiento (Fernández, Rivera y Montt, 2004).

2.3.3.3. Perú.

Perú es un país que constantemente se ve enfrentado a desastres naturales que traen como consecuencia pérdidas humanas, desplazamiento y hacinamiento de personas y problemas de salubridad que favorecen la aparición de enfermedades en la población. El fenómeno El Niño o ENSO (del inglés El Niño Southern Oscillation), es un fenómeno climático océano-atmósfera a gran escala, vinculado con un calentamiento periódico de las temperaturas de la superficie marina en todo el ecuatorial central y centro-este del Pacífico, que se manifiesta aproximadamente cada cinco años, entre los meses de diciembre a marzo y tiene como consecuencias el incremento de la temperatura atmosférica; el incremento de las precipitaciones y de la descarga de los ríos y, dependiendo de la intensidad, lluvias torrenciales, inundaciones y deslizamientos de tierra. En algunas regiones de Perú, como la costa norte, se han producido desastres naturales debido a las lluvias extremas e inundaciones. Los episodios de ENSO generan cuantiosas pérdidas en el país; prueba de

esto está en los reportes del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) en 1998, en los que se manifiestan pérdidas por USD 3,5 mil millones (6,2% del PBI), similar a lo ocurrido en el 1982-1983 que ocasionó daños por USD 3,3 mil millones (11,6% del PBI), con un mayor impacto en los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque y La Libertad (Akram et al, 2016).

2.3.3.4. Barranquilla (Colombia).

La ciudad de Barranquilla, Colombia, presenta una de las problemáticas de drenaje pluvial más importantes en el mundo, debido a que cerca de 100 km de la malla vial, incluyendo vías principales, se convierten en ríos urbanos todos los años durante la temporada de lluvia, con caudales entre 30 y 100 m³/s. Un estudio realizado Ávila (2012) presenta un diagnóstico general de la problemática y una discusión sobre algunas de las alternativas de manejo sostenible de drenaje urbano aplicables a las condiciones de la ciudad para el control de caudales pico. En Barranquilla, el sistema de drenaje pluvial lo constituyen las calles por donde circulan los vehículos, por esto, no se cumple con ninguno de los objetivos requeridos en cuanto al manejo pluvial. Aquí, el enfoque de manejo integral de drenaje urbano implica no sólo el manejo de la cantidad de agua y la calidad, sino también la capacidad de adaptabilidad frente al cambio climático del sistema de drenaje que se proyecte para la ciudad. La cuenca oriental, actualmente urbanizada en más del 90%, carece de alcantarillado pluvial. Por esto, la escorrentía superficial fluye sobre las vías con caudales muy peligrosos que ponen en riesgo la vida de las personas y generan daños significativos en la infraestructura y la economía de la ciudad.

El drenaje pluvial en Barranquilla debe ser concebido como un servicio público con una función integral que contemple el manejo de cuencas, canalización, control de contaminación, control de erosión, sistema de prevención y gestión del sistema de drenaje pluvial. Esto implica que debe consolidarse institucionalmente un organismo que, opere, administre y mantenga el sistema de drenaje pluvial de la ciudad.

Entre las soluciones que se plantean se encuentran la canalización y realización de infraestructura hídrica, que aunque es un planteamiento costoso debido a que la mayor parte de la ciudad no posee alcantarillado pluvial, se propone la realización parcial de los tramos que aportan mayor caudal de escorrentía, a través de proyecciones y estimaciones del caudal pico en el punto de concentración de las cuencas mediante el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), con la ayuda de datos de precipitación del IDEAM (Instituto Colombiano de Hidrología y Meteorología) de la estación climatológica cercana a la ciudad. Se propone también el mantenimiento y mejoramiento de condiciones hidrológicas incluyendo un estudio hidrológico en el sitio, que incluya las condiciones originales, el incremento del volumen de escorrentía, el caudal pico generado por la precipitación, las condiciones de calidad de agua esperadas y el diseño del sistema de drenaje que aseguren mantener las condiciones hidrológicas originales o mejores en el sitio. La reducción del volumen de escorrentía y volumen pico de caudal a través de tanques de amortiguamiento, o tecnologías no estructurales, como el aumento de la rugosidad de la superficie o conducción de la escorrentía superficial a jardines especialmente diseñados. La reducción de conexiones directas y aumento del tiempo de retención, para prolongar el recorrido del agua antes de que sea descargada en las calles aumentando la posibilidad de que haya infiltración. Utilizar sistemas de almacenamiento temporal del agua pluvial, para disminuir volúmenes de escorrentía y como última solución finalmente se propone la construcción, recuperación e incremento de zonas permeables como jardines, antejardines, patios y zonas verdes que mejoren el drenaje urbano.

2.3.3.5. Bogotá.

Bogotá está construida con escasas áreas verdes, un factor incidente en este contexto es la escorrentía, que antes del auge de la construcción se infiltraba a través del campo de la sabana de la ciudad. Actualmente escurre por las calles y tejados al alcantarillado pluvial, el cual no se encuentra en capacidad para drenar las aguas lluvias en su totalidad, trayendo

como consecuencia inundaciones que generan problemas sociales y económicos a la población. Los techos verdes cumplen la función de los campos que existían en la ciudad, infiltran parte de la precipitación, y atenúan el caudal que llega al alcantarillado pluvial, evitando la colmatación de los ductos y posterior inundación.

Una de las emergencias más graves presentadas en la capital Colombiana, ocurrió el 23 de marzo de 2015, en donde a causa de las fuertes granizadas, algunos barrios de la ciudad terminaron inundados. En consecuencia, algunos techos de las viviendas ubicadas en zonas que presentan riesgo por inundación se desplomaron, poniendo en riesgo la vida de los habitantes que sufrieron este fenómeno. El SDGRCC (Sistema Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático) reportó dos personas que presentaron hipotermia y una persona con un trauma craneoencefálico severo (El Tiempo, 2015).

La densificación de la ciudad de Bogotá requiere de la implementación de métodos innovadores, para solventar los problemas que se originan con el aumento demográfico y de la construcción que vive actualmente. Los techos verdes proporcionan una mejor calidad del medio ambiente, control de la temperatura, manejo de aguas lluvias, un buen aspecto estético a la edificación y un posible sembradío de plantas o alimentos, características que para la ciudad de Bogotá sería importante implementar en el marco del desarrollo sostenible. (Contreras y Villegas, año desconocido)

2.3.3.6. Palmira (Valle).

El casco urbano de Palmira está atravesado de oriente a occidente por zanjones y acequias (de carácter natural y de riego) y por el río Palmira (conformado a partir de las derivaciones 1 y 2 del Río Nima). La dirección de estos cauces y el crecimiento de la ciudad, los fijaron como las rutas naturales de evacuación de las aguas de escorrentía. Ahora bien, el desarrollo vial y la ocupación de zonas de protección de estos drenajes, han condicionado su capacidad de tránsito de flujo, y ha sido motivo de análisis de varios estudios de drenaje.

Adicionalmente, el problema de inundaciones en algunos sectores de la ciudad, se presentan debido a la falta de capacidad hidráulica de la infraestructura existente para drenar los caudales de escorrentía de los eventos de lluvia, situación que empeora, cuando se presentan eventos de alta precipitación simultáneos, tanto en la zona rural como en la zona urbana que provocan un aumento súbito de los caudales de escorrentía que deben ser evacuados. Paralelamente existe una creciente demanda sobre el sistema de drenaje existente debido a los procesos de construcción y a los proyectos urbanísticos que se están desarrollando al interior del perímetro urbano en grandes vacíos urbanos, que se fueron formando debido a la dinámica poblacional que se dio en la ciudad y la última actualización del POT en el cual se incluyen nuevas áreas de expansión, que incrementaran la exigencia sobre los sistemas y cauces existentes. Como solución a dicha problemática, Martínez (2013) plantea la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), entre los que se encuentran específicamente estanques de detención y canales verdes.

2.4. Modelación del Drenaje Pluvial.

Para llegar a conocer el comportamiento de un sistema es necesario saber cómo responderá este ante una determinada acción. Esto podría hacerse por experimentación con el sistema mismo, pero factores de costos, seguridad y otros hacen que esta opción generalmente no sea viable. A fin de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema real por otro sistema que en la mayoría de los casos es una versión simplificada. Este último sistema es el modelo a utilizar para llevar a cabo las experiencias necesarias sin los inconvenientes planteados anteriormente. Al proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación. Al proceso de diseñar el plan de experimentación para adoptar la mejor decisión se denomina optimización. Si el plan de experimentación se lleva a cabo con el solo objeto de aprender a conducir el sistema, entonces se denomina entrenamiento o capacitación (Trifa, año desconocido).

La simulación debe entenderse como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este modelo con el fin de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema (Shannon, 1975). En otras palabras, el modelado de simulación es una técnica experimental y metodológica aplicada cuyo alcance es el siguiente:

1. Describir el comportamiento de los sistemas.
2. Construir teorías o hipótesis que explican el comportamiento observado.
3. Utilizar estas teorías para predecir el comportamiento futuro o el efecto producido por los cambios en el conjunto de entradas operativas (Centeno, 1996).

Las relaciones hidrológicas que ocurren en una cuenca se pueden estudiar a través de modelos que simplifiquen y representen los distintos fenómenos que suceden al interior de ésta, siendo los modelos matemáticos una herramienta importante y que se ha ido perfeccionando vertiginosamente durante el siglo XX. Así, estos permiten representar un sistema hidrológico por medio de relaciones lógicas y cuantitativas, capaces de ser modificadas para observar cómo el sistema reacciona, permitiendo reproducir sistemas altamente complejos (Pizarro, Soto, Farias y Jordan, 2005).

El propósito de los modelos en el drenaje urbano es representar un sistema de drenaje y su respuesta a diferentes condiciones con el fin de responder preguntas sobre él, como “¿Qué pasaría si...?”. En cierto sentido, las personas han estado modelando los sistemas de drenaje urbano todo el tiempo con el fin de construir sistemas que funcionen con éxito. Por ejemplo, el método racional es un modelo simple de la conversión de la precipitación en escorrentía que puede usarse para observar los efectos probables de diferentes intensidades de lluvia.

Los programas informáticos para el diseño y el análisis del drenaje urbano emergieron en los años 70, pero los modelos para el planteamiento y diseño de sistemas de drenaje urbano

se convirtieron solamente en herramientas estándar de los ingenieros hasta cuando los recursos informáticos estuvieron disponibles. El modelo SWMM (Storm Water Management Model) apareció por primera vez en los EE.UU a principios de los años 70 y ha venido desarrollándose desde entonces. En el Reino Unido, El método del hidrograma TRRL (Transport & Road Research Laboratory en Ingles) usado en 1970 estaba basado en computadoras, pero no había un paquete de software estándar hasta principios de los 80 con la introducción del WASSP (Wallingford Sewer Storm Package), basado en metodologías impuestas por Wallingford (DoE / NWC, 1981).

Generalmente ha habido dos usos principales para los modelos de sistemas de alcantarillado: diseño (para sistemas nuevos) y análisis (para los existentes). En el diseño, las características físicas de un sistema de drenaje propuesto se determinan para que el sistema se comporte de manera satisfactoria cuando se expone a condiciones específicas. En simulación o análisis, los detalles físicos del sistema ya existen, y el usuario que modela está interesado en cómo el sistema responde a condiciones particulares (en términos de caudal y profundidad, capacidad hidráulica y las inundaciones superficiales). El fin, por lo general suele ser el averiguar si el sistema necesita ser mejorado, y si es así cómo la misma herramienta de modelado se puede utilizar tanto para el diseño como para la simulación, pero se ha desarrollado un software especializado para cada uso. Además de los aspectos hidráulicos e hidrológicos, los principales paquetes de modelación de flujo de alcantarillado incluyen interfaces de datos versátiles, compatibilidad con SIG y representación gráfica del sistema y su respuesta a las tormentas.

2.4.1. Herramientas computacionales para modelaciones de drenaje pluvial.

2.4.1.1. SWMM.

El modelo para la gestión del agua lluvia de la agencia de la protección ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency en Ingles) es el modelo de sistema de

gestión de drenaje urbano de mayor escala más conocido en los Estados Unidos. Cubre aspectos hidráulicos de calidad. De los software mencionados a continuación, es el único cuya licencia es libre y gratuita, lo que lo hace diferente frente a otros software Europeos más conocidos que se han desarrollado dentro de organizaciones particulares. Algunas compañías de software comercializan paquetes que vienen integrados con SWMM e interfaces de fácil uso.

SWMM apareció por primera vez a principios de 1970 y después de 30 años de desarrollo el motor computacional se ha vuelto a re formular de una forma mayor que está siendo coordinada por la EPA.

2.4.1.2. Paquetes de Wallingford.

Antes del primer paquete de Wallingford, el método computarizado más común en el Reino Unido era el Método del hidrograma del TRRL. Sin embargo, la primera pieza del “software de modelación” en el Reino Unido, WASSP, fue lanzada a principios de los 80. Los acontecimientos subsiguientes fueron WALLRUS y SPIDA. HydroWorks fue lanzado en los mediados de los años 90, todavía basado en parte en el motor del procedimiento de Wallingford. HydroWorks fue diseñado para ser un modelo completo de sistema de alcantarillado, incluyendo facilidades para la modelación de calidad de agua.

2.4.1.2.1. InfoWorks.

A finales de los 90, Wallingford lanzó InfoWorks que fue una mejora de HydroWorks, con integraciones de SIG (sistema de información geográfica). Se diseñó para integrar la modelación de sistemas con la planificación de urbanización. El desarrollo clave en InfoWorks fue la interfaz de los datos, que simplificó en gran medida la tarea de introducir los datos de tuberías y pozos en el sistema de alcantarillado. InfoWorks también incluye un módulo de calidad de agua y un módulo de control en tiempo real.

2.4.1.3. MOUSE.

El software MOUSE (Modelling of Urban Sewers en inglés) ha sido desarrollado por el Instituto de Hidráulica Danés. Es popular en toda Europa y en muchas otras partes del mundo. El modelo de flujo se basa en un número de módulos, que cubren la escorrentía superficial, modelado hidrodinámico de la red, modelos hidrológicos avanzados para simulación continua, control en tiempo real y simulación hidráulica a largo plazo con análisis estadístico. También tiene un módulo de interfaz SIG.

2.4.1.4. SOBEK.

SOBEK es un software producido por el instituto de investigación WL / Delft Hydraulics, con sede en los Países Bajos. La gama SOBEK cubre diversas aplicaciones de modelado hidráulico. SOBEK-Urban es una herramienta de modelación para sistemas de drenaje urbano, que incluyen módulos que cubren el flujo de agua (modelación hidráulico en tuberías y canales), escorrentía de lluvia y control en tiempo real.

2.4.1.5. SewerGEMS.

Desarrollado por Bentley Systems, permite el trabajo interactivo sobre AutoCAD o ArcGis. Es un modelo también de reciente aparición, y permite unas capacidades muy similares a las de otros presentados anteriormente.

2.4.1.6. InfoSWMM.

Modelo desarrollado por Innovyze, que integra un sistema GIS con SWMM (Universidad Politécnica de Cataluña, 2007).

2.4.1.7. Herramientas computacionales para diseñadores de sistemas.

Hay varios paquetes dirigidos principalmente a los diseñadores de sistemas. La mayoría de los diseños de drenaje son para desarrollos domésticos, comerciales e industriales en los que las áreas tienden a ser relativamente pequeñas y el Método Racional suele ser apropiado. Algunos paquetes de diseño también permiten simular el rendimiento del sistema para su uso en la planificación de áreas de drenaje, pero es más común que los usuarios del modelo lleven a cabo esta función utilizando los otros paquetes de simulación establecidos. Los mejores paquetes de diseño se adaptan a las necesidades de los ingenieros diseñadores, y son altamente automatizados y sensibles. Permiten al diseñador optimizar el sistema rápidamente y revisar el resultado en una pantalla gráfica. El software más popular es producido por la compañía británica Micro Drainage, que incluye un paquete “inteligente” muy fácil de usar llamado WinDes, que permite el ajuste automático y la racionalización del sistema de alcantarillado mientras se está diseñando. WinDes tiene la capacidad de diseñar SUDS, una interfaz de AutoCAD y una herramienta para determinar costos y cantidades. WinDrap es un paquete que se puede vincular a este para la planificación de áreas de drenaje (con énfasis en simulación en lugar de diseño).

2.4.2. Pruebas de los modelos.

Se necesitan verificaciones iniciales de un modelo para asegurarse de que se está comportando satisfactoriamente en términos matemáticos y para eliminar errores evidentes en los datos de entrada. Es necesario comprobar la inestabilidad para una variedad de condiciones extremas. Además, el volumen total que entra en el sistema, o parte del sistema, debe compararse con el volumen total que sale. Dentro de los software mencionados, SWMM es uno de los software que ofrece la posibilidad de verificar errores en el modelo.

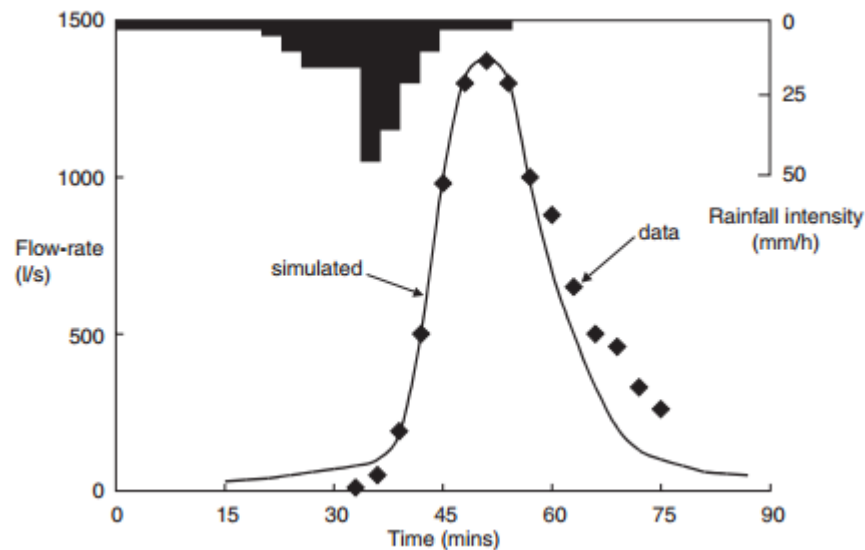
2.4.3. Verificación de los modelos.

En este punto es útil analizar algunas de las terminologías utilizadas durante el proceso de desarrollo y construcción del modelo, en particular la diferencia entre los términos «calibración» y «verificación». Durante la calibración de un modelo, se buscan los valores más apropiados de los diversos parámetros del modelo. En la verificación, los valores de los parámetros del modelo se establecen, se corre el modelo y se comparan dichos valores con variables conocidas (Por ejemplo caudal o datos de escurrimiento conocidos). De este modo, se puede verificar el acierto entre valores calculados y observados. La verificación es estrictamente válida para cierta ubicación en particular y sólo sobre el rango de los datos disponibles.

En la práctica, sin embargo, muchos de los parámetros de entrada no pueden ser determinados precisamente y los datos son sólo aproximados, por lo que es necesario recurrir a valores por defecto que pueden no ser representativos del sitio en cuestión.

Las fuentes principales de incertidumbre en un modelo de alcantarillado incluyen las representaciones matemáticas del modelo, los problemas numéricos, el nivel de detalle, los valores asumidos de los parámetros físicos, los datos de entrada y la definición del estado inicial del sistema. Un estudio (Willems y Berlamont, 1999) ha encontrado que, en una aplicación particular, reemplazar las ecuaciones completas de Saint Venant por un modelo de tubería extremadamente simple hizo una diferencia de menos del 5% con la incertidumbre total. En la figura 2 se observan datos reales de hidrogramas de precipitación vs hidrogramas simulados por un modelo.

Figura 2. Hidrograma simulado comparado con datos reales.



Fuente: Butler.

2.4.4. Modelos Determinísticos.

Algunos de los modelos mencionados anteriormente, SWMM, InfoWorks, MOUSE, entre otros, se basan en relaciones matemáticas para unos parámetros físicos. Todos los modelos implican la simplificación de algún elemento; por ejemplo ningún modelo analiza cada gota de lluvia o cada variación en la superficie de la cuenca. Y son todos son determinísticos; es decir, una combinación de datos de entrada simplificados que darán la misma salida; la aleatoriedad no es considerada en el proceso de cálculo (Butler y Davies, 2000).

2.5. Antecedentes en la Ciudad de Tunja.

Tunja es la Capital del Departamento de Boyacá - Colombia, se encuentra ubicado dentro de la Provincia centro, sobre la cordillera oriental de los Andes a 130 km al noreste de la

ciudad de Bogotá (Alcaldía de Tunja, año desconocido). Dentro del concepto de ciudades intermedias definido por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) están aquellas que tienen más de 100.000 habitantes pero que no llegan al millón. Tunja tiene en la actualidad, según las últimas estimaciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística cerca de 195.496 habitantes.

Figura 3. Localización de la ciudad de Tunja en el país.



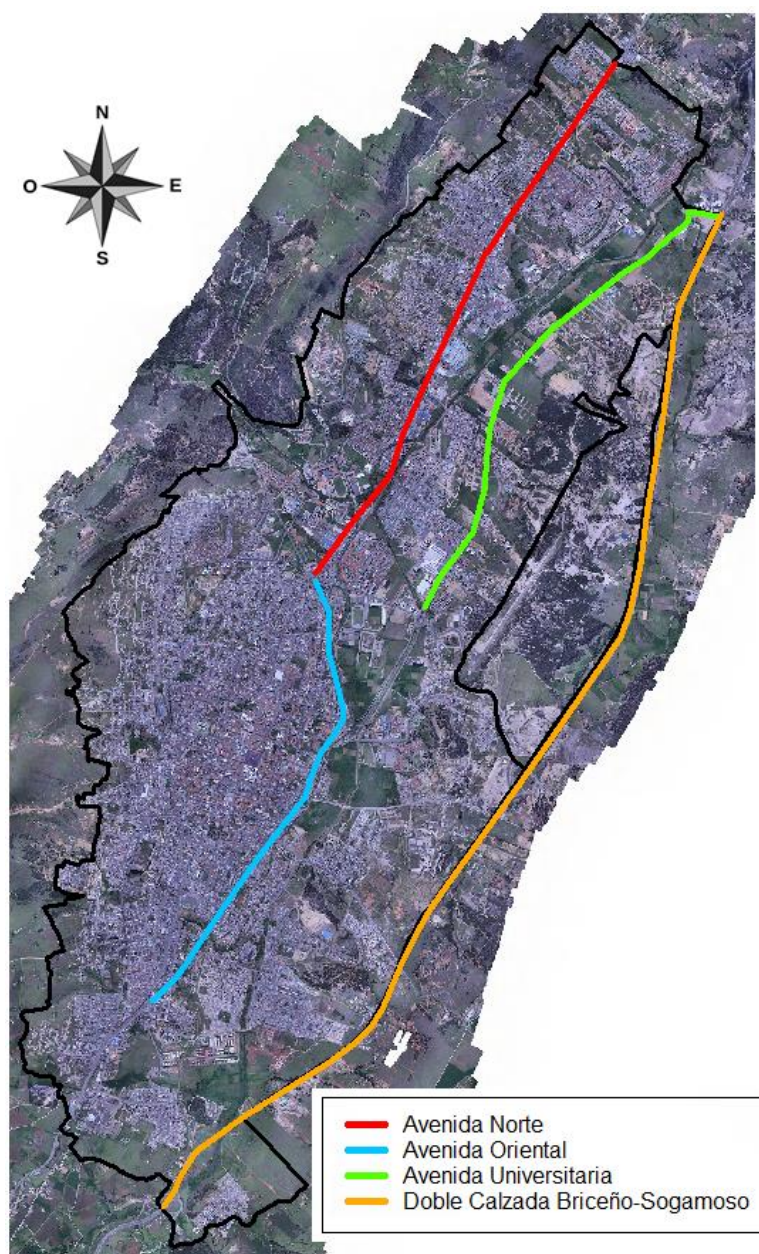
Fuente: Alcaldía de Tunja (En Línea).

2.5.1. Proceso de urbanización de la ciudad.

La ciudad de Tunja tiene un patrón lineal de crecimiento urbanístico, que obedece al condicionante físico impuesto del relieve y la dinámica generada por la vía Central del Norte y avenida oriental al sur, la que a su vez, genera la búsqueda de conectividad entre Bogotá y los centros urbanos de carácter industrial como Duitama y Sogamoso entre otros.

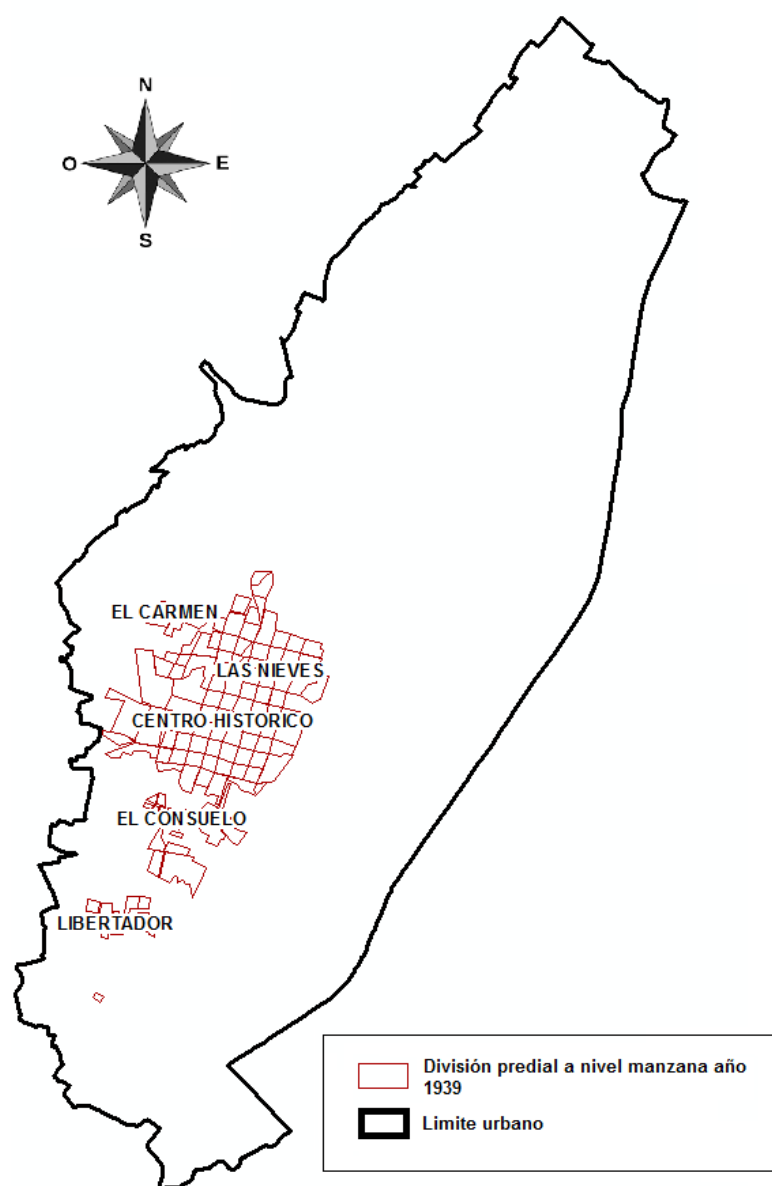
El proceso de configuración espacial de la ciudad de Tunja ha dependido principalmente de las dinámicas y políticas de orden nacional y en menor medida de la generación de proyectos a nivel local. La construcción de vías ha sido el motor del crecimiento discontinuo periférico. En la zona norte el crecimiento se ordena a lo largo de una línea asociada a dos hechos: uno, la construcción de la Avenida Norte (1957) y Carretera a Sogamoso y otro la expansión del perímetro urbano suscitada por la realización de la urbanización Los Muiscas, tal como se menciona en el Plan de Desarrollo Urbano de Tunja en 1976. Por otra parte, la Avenida Universitaria y la variante Tunja de la doble calzada Briceño-Sogamoso, que atraviesa el oriente de la ciudad en el sentido norte-sur, ha generado una tensión para el crecimiento alrededor de ellas en la última década estudiada (Ver figura 4) (Hidalgo, 2008) (IGAC, 2015). La ciudad ha tenido un crecimiento urbanístico de 1509.47 ha según estadísticas desde 1939 a 2013, experimentando un incremento anual aproximado del 3.73% (Ver figuras 5-7).

Figura 4. Perímetro Urbano de la ciudad de Tunja.



Fuente: SIG Proactiva Aguas de Tunja.

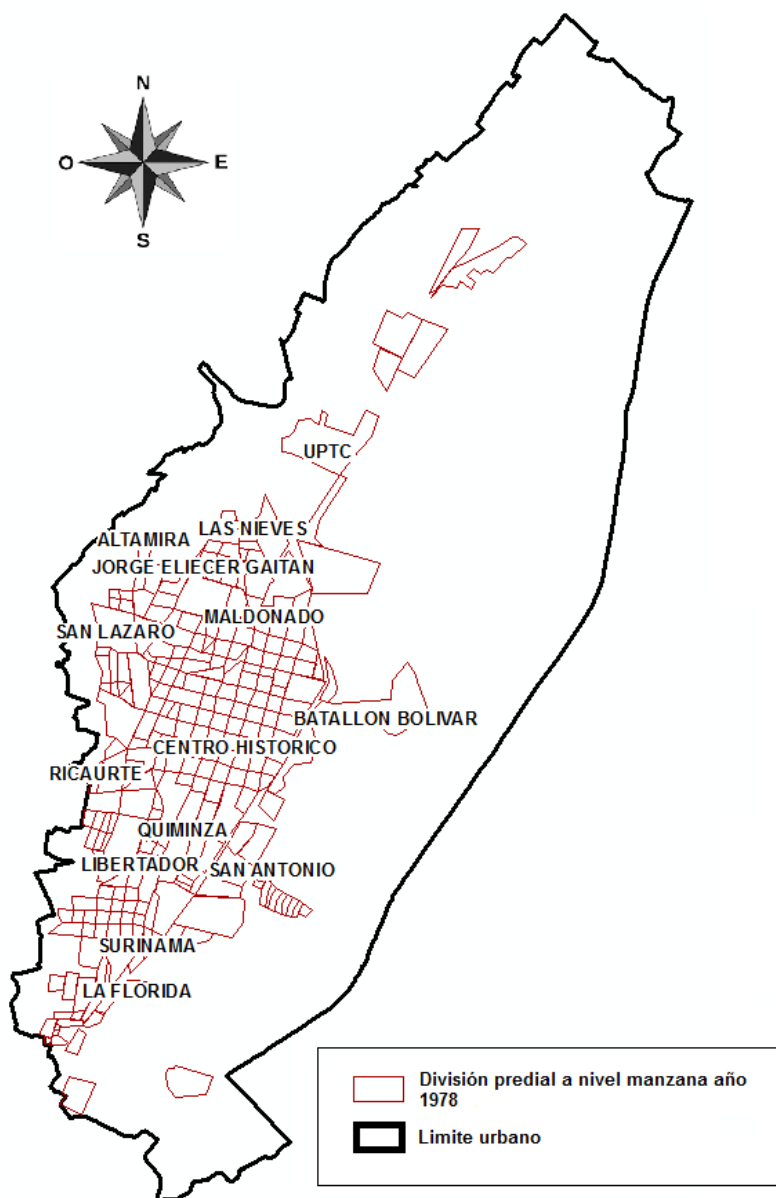
Figura 5. Foto mosaico de Tunja en el año 1939.



Fuente: Autoría propia, basado en foto mosaicos del IGAC.

Para el año 1939 la ocupación urbanística era de 177.53 Ha, con un total de 123 manzanas.

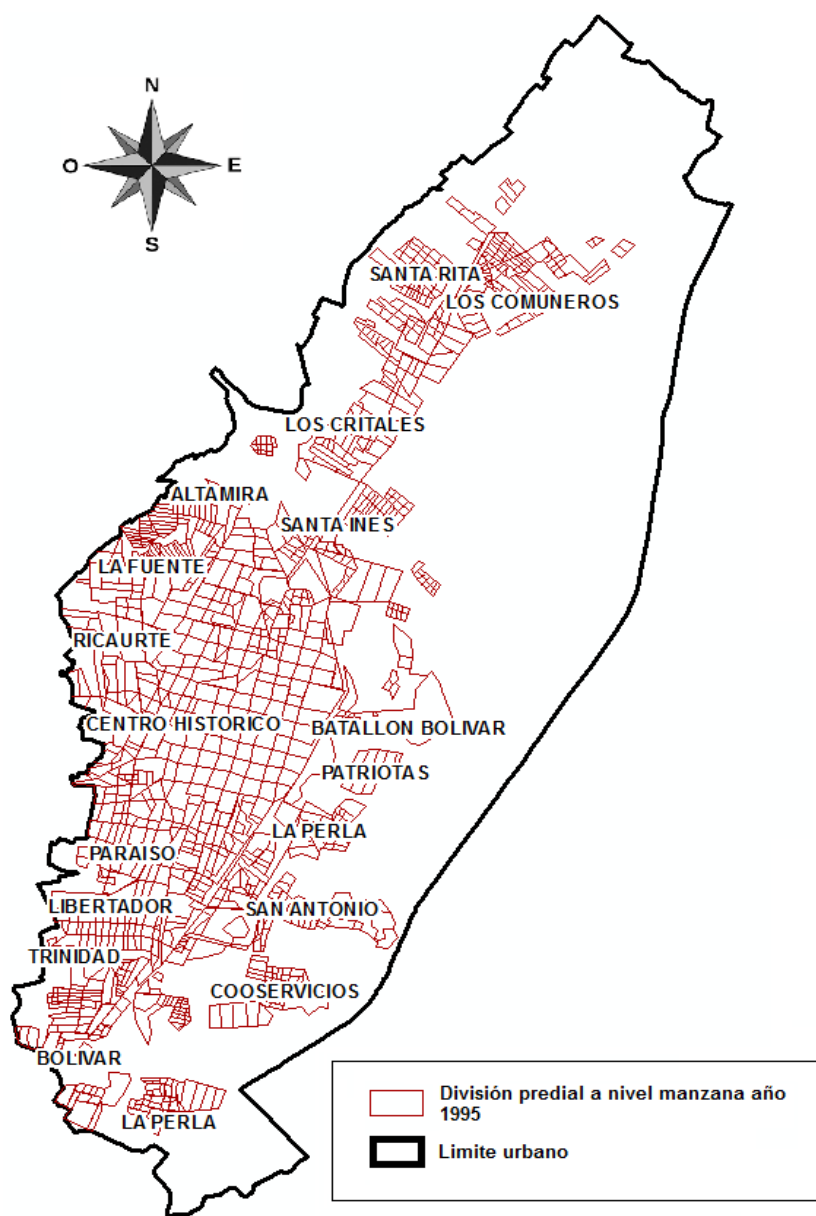
Figura 6. Foto mosaico de Tunja en el año 1978.



Fuente: Autoría propia, basado en foto mosaicos del IGAC.

Para el año 1978 la ocupación urbanística era de 513.72 Ha, con un total de 285 manzanas; respecto a 1939, se presentó un crecimiento urbanístico del 189.37 %.

Figura 7. Foto mosaico de Tunja en el año 1995.

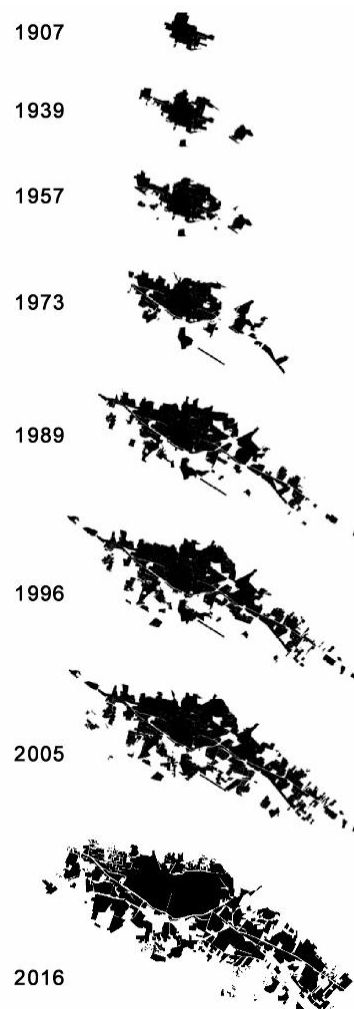


Fuente: Autoría propia, basado en foto mosaicos del IGAC.

Para el año 1995 la ocupación urbanística era de 634.15 Ha, con un total de 1044 manzanas; respecto a 1939, se presentó un crecimiento urbanístico del 257.21 %.

De acuerdo a lo anterior en la ciudad de Tunja se observa un impacto urbanístico significativo sobre el suelo de la ciudad, que se ha venido desarrollando a lo largo de su historia, en la figura 8, se puede observar la configuración urbana de la ciudad a lo largo del tiempo. Hoy en día los futuros desarrollos y modificaciones del suelo están materializados en el Plan de Ordenamiento territorial donde que se establecen los lineamientos de usos de suelo permitidos para cada zona urbana de la ciudad.

Figura 8. Configuración urbana de Tunja en el período 1907-2016.



Fuente: Autoría propia, actualizado del diagrama de Hidalgo.

2.5.2. Sistema de alcantarillado pluvial de la ciudad de Tunja.

El sistema de alcantarillado de la ciudad de Tunja, es en su gran mayoría de tipo combinado (ver figura 9) y comprende las instalaciones destinadas a la recolección y transporte, tanto de las aguas residuales como de las aguas lluvias, que presenta dentro de su composición diversos tipos de materiales, que por la antigüedad y cumplimiento de su vida útil, presentan inconvenientes e irregularidades en su funcionamiento, en especial en épocas de altas precipitaciones y en sectores determinados especialmente por su topografía. En la parte antigua de la ciudad el sistema de alcantarillado que prevalece es de tipo combinado, conllevando a realizar adecuaciones a lo existente porque su independización resulta inviable por costos y trazados de las redes. En el contrato de concesión de aguas de la Alcaldía de Tunja para los servicios de acueducto y alcantarillado N. 132 de 1996 se establece respecto al sistemas de alcantarillado, por tratarse en la actualidad de un sistema unitario (aguas residuales y pluviales), el concesionario será responsable de la operación del conjunto hasta tanto se habiliten las obras previstas de separación del sistema de líquidos residuales del de agua lluvia. A partir de dicha separación el concesionario será solo responsable del sistema de alcantarillado de aguas residuales y el municipio será responsable del sistema de aguas de lluvia o pluviales. Dado que las obras de separación de sistemas están comprendidas en las obras que deben ser financiadas por el Estado. Sin embargo la empresa prestadora del servicio y alcantarillado actualmente ofrece apoyo técnico al municipio de Tunja como asesor en los temas de separación de redes combinadas.

La ciudad de Tunja tiene una configuración geomorfológica típica de ladera la cual induce a la generación de formaciones de origen natural asociadas a procesos erosivos, consecuencia esencialmente a eventos pluviales que durante eras se han verificado en el entorno, y asociado a las consecuencias que se pueden derivar por el fenómeno del cambio climático, en especial, las altas precipitaciones atípicas que se pueden presentar. Estas

formaciones naturales se han dispuesto de acuerdo a las características y régimen del flujo asociado a la precipitación, conformándose así, una red estructural de drenaje natural cuyo nacimiento se ubica en las cumbres de las cadenas montañosas que limitan la cuenca de la ciudad y finalizan en el cauce de los ríos. El proceso hidrogeológico que da origen a este tipo de formaciones se conoce como carcavamiento, el cual explica la dinámica de los zanjones de la ciudad. Estas formaciones transportan las aguas lluvias hasta los cuerpos receptores principales como ríos y quebradas, durante episodios pluviales en la ciudad, debido a su capacidad de conducción proporcional a la intensidad y frecuencia de los mismos. La cuenca de la ciudad tiene esencialmente como eje el río Jordán, el cual, en su curso sur – norte recibe los aportes en evento de precipitación, de los zanjones que en dirección perpendicular al río, se presentan en gran parte de la ciudad de Tunja.

Debido a la falta de planeación urbanística, en la ciudad de Tunja, se ha ocasionado el relleno, la invasión y modificación arbitraria de los zanjones; además de la falta de conciencia y desconocimiento de los habitantes con respecto a la función que cumplen estos, ha generado que en la actualidad muchos de estos elementos ya no existan o se hayan reducido drásticamente, ya que generalmente se vienen realizando rellenos de manera no controlada y sin ningún conocimiento técnico, lo cual acarrea consecuencias tales como deslizamientos, asentamientos e inundaciones en sectores con afectaciones a sus pobladores (Proactiva Aguas de Tunja. SA ESP, año desconocido).

2.5.3. Clima de la ciudad de Tunja.

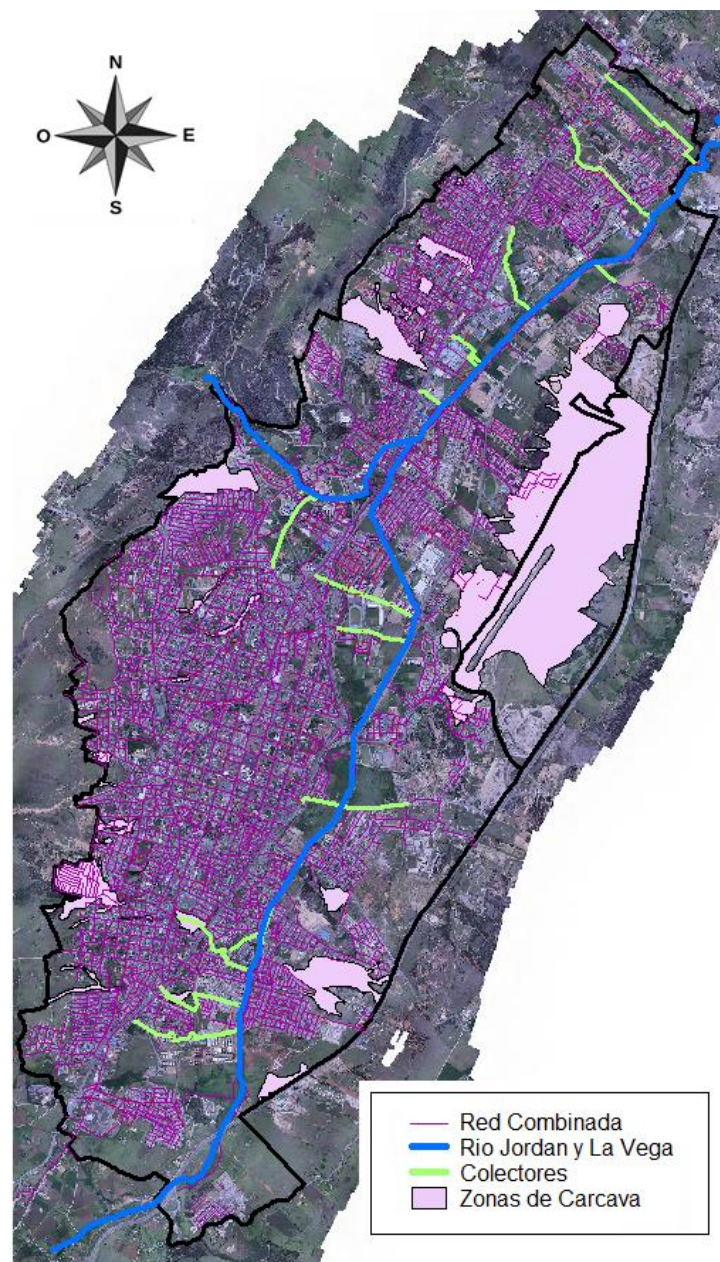
El clima de la ciudad de Tunja es frío. El promedio de lluvia total anual es de 652 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. La temporada seca principal se registra en los meses de Diciembre, Enero y Febrero; en los meses de Julio y Agosto, se registra una temporada seca de mayor intensidad. Las temporadas de lluvia se extienden desde finales de Marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de Diciembre. En los meses secos de

principio y final de año, llueve alrededor de 5 a 9 días/mes; en los meses de mayores lluvias el primero y segundo semestre, puede llover entre 12 y 19 días/mes. La temperatura media mínima anual es de 8.7°C aproximadamente, la temperatura media anual es de aproximadamente 13.1 °C y la temperatura media máxima es de 18.3 °C. El sol brilla cerca de 4 horas diarias en los meses lluviosos, pero en los meses secos, la insolación oscila alrededor de las 7 horas diarias/día (Atlas Climatológico de Colombia, 1981-2010).

De acuerdo con registros de la estación meteorológica del IDEAM localizada en la ciudad los meses más lluviosos son Abril y Octubre registrándose el pico máximo de Abril en el año 2012 con 303.3 mm (Ver figura 10).

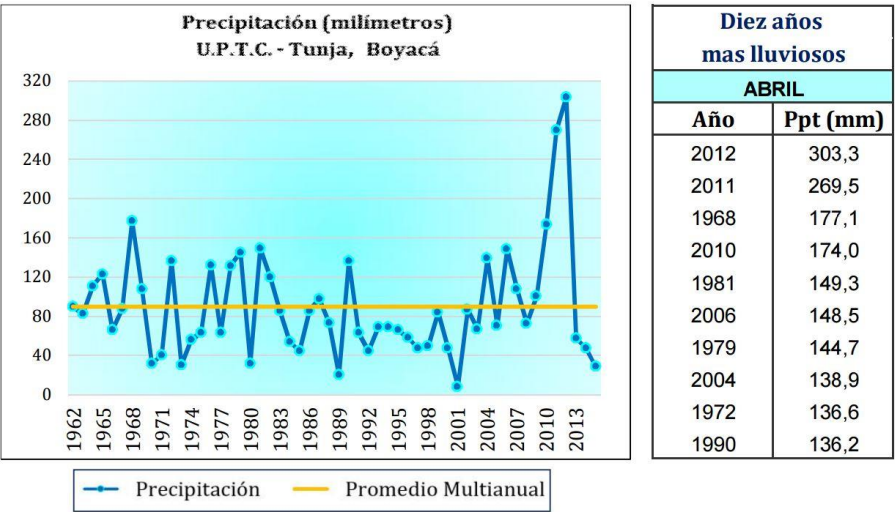
La precipitación horaria indica que en general se presentan lluvias nocturnas, con mayor intensidad entre las 15:00 y las 18:00, como se observa en la figura 11.

Figura 9. Redes de alcantarillado Tunja y zonas de cárcavas, año 2016.



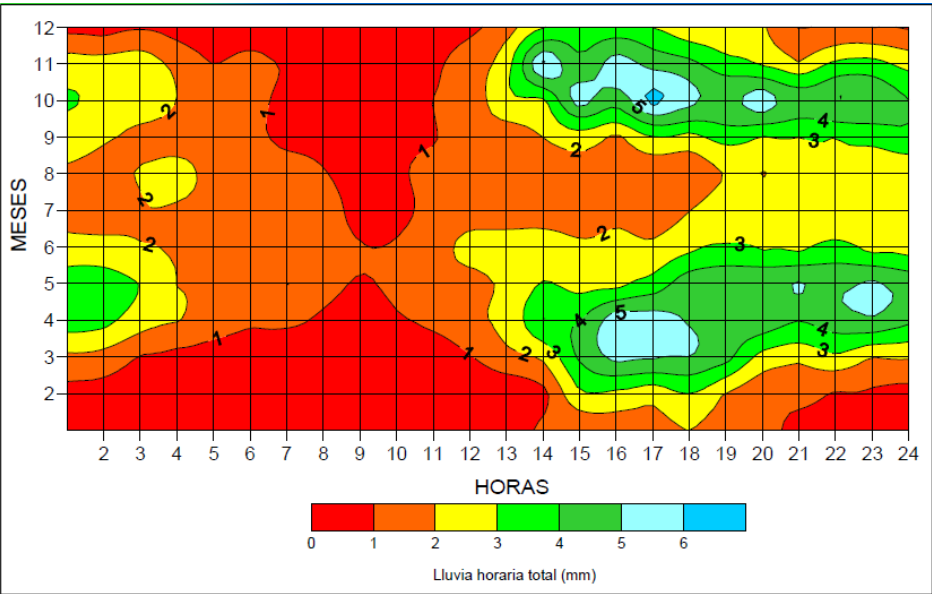
Fuente: SIG Proactiva Aguas de Tunja.

Figura 10. Diez años más lluviosos en el mes de Abril, ciudad de Tunja.



Fuente: IDEAM.

Figura 11. Cuadro de horas consecutivas con mayor precipitación en la ciudad de Tunja.



Fuente: IDEAM.

3. DEFINICION DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

Con el aumento de la migración de la población rural hacia las zonas urbanas se produce un fuerte impacto medioambiental y surge la necesidad de adaptar las acciones de saneamiento básico según los requerimientos de la población. Así como también garantizar el abastecimiento y recolección del agua como recurso y fuente principal de vida. El efecto de la urbanización produce una reducción de la vegetación y por tanto una alteración del estado inicial del globo terrestre; esto ocasiona un aumento de la impermeabilidad del suelo que sumado a eventos de precipitación producen un aumento de la escorrentía en las ciudades. El problema se magnifica cuando se pone en contraste con la problemática mundial del calentamiento global, debido a que se estima un aumento en las intensidades de la precipitación que aunque sean eventos ocasionales, ocurrirán en una magnitud mayor y que aumentará cada vez más para algunas regiones de la tierra. Por esto, la planificación de las ciudades toma cada vez más importancia en el ámbito de la prevención de desastres ante eventos naturales impredecibles que puede causar el recurso hídrico debido a que no todos los países poseen una organización para la gestión de aguas pluviales.

Las actuales ciudades intermedias como Tunja, serán las futuras grandes ciudades del país debido al fenómeno de la urbanización presentado en los últimos años; por lo tanto se debe contemplar una planificación o reforma integral de los sistemas de alcantarillado pluvial esquematizando una visión hacia el futuro, que permita considerar las posibles variaciones del cambio climático en la problemática de las inundaciones en zonas urbanas ante eventos de precipitación, que presentan hoy en día las grandes ciudades del País, para finalmente atender al concepto de saneamiento básico, bienestar social y equilibrio en el ciclo hidrológico del agua.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General.

Evaluar el efecto del cambio climático en la respuesta de los sistemas de drenaje pluvial en una ciudad intermedia como Tunja.

4.2. Objetivos Específicos.

4.2.1. Determinar los efectos de eventos climáticos extremos en los parámetros de drenaje pluvial en la ciudad de Tunja.

4.2.2. Estimar mediante modelos matemáticos los volúmenes de esorrentía generados en un sector de la ciudad de Tunja bajo diferentes eventos pluviales.

4.2.3. Identificar posibles estrategias para disminuir el impacto negativo que generarían los eventos climáticos extremos sobre los sistemas de drenaje pluvial en la ciudad de Tunja.

5. METODOLOGÍA

5.1. Método 1. Análisis del cambio climático.

La temperatura y la precipitación son dos variables que marcan las tendencias de cambio climático inducidas tanto por factores naturales como por los cambios que han generado las actividades humanas en el planeta. En Colombia, se está haciendo un seguimiento riguroso a estas dos variables desde que se organizó en 1969 el Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología (SCHM) con el aval de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el cual reordenó y planificó el desarrollo de la red básica nacional. De esta manera, se consolidó una red hidrometeorológica compuesta por diferentes tipos de estaciones que miden la precipitación, la temperatura, el viento, los niveles de los ríos, entre otras variables. Desde entonces y ajustándose a los cambios institucionales que transformaron el SCHM en el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), el cual en 1993 se transformó en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se han seguido midiendo constantemente las variables meteorológicas a través de sensores ubicados en este tipo de estaciones sobre todo el territorio nacional. En cada estación se cuenta con colombianos que miden el volumen de agua que cae cada día y el máximo y mínimo en las temperaturas. Estos datos, son un acervo de información y conocimiento, con los cuales hoy se puede analizar el pasado, para poder generar escenarios a futuro. Gracias a la medición de estas variables el IDEAM ha elaborado diferentes estudios acerca del comportamiento a futuro de estas 2 variables en el país, ajustándose a los lineamientos propuestos por el Panel Intergubernamental sobre cambio Climático (IPCC). A continuación se describen los conceptos para la generación de escenarios de cambio climático y posteriormente la metodología usada por el IDEAM, para la proyección del comportamiento de estas 2 variables.

5.1.1. Marco conceptual de Escenarios de Cambio Climático.

5.1.1.1. Forzamiento Radiativo.

Un forzamiento Radiativo es un cambio impuesto en el balance Radiativo de la Tierra. Como concepto general, un forzante Radiativo en clima significa cualquier cambio en la radiación (calor) entrante o saliente de un sistema climático. Un forzante positivo tiende a calentar el sistema (más energía recibida que emitida), mientras que uno negativo lo enfría (más energía perdida que recibida). Puede deberse a cambios en la radiación solar incidente, a incrementos en la concentración de especies activas radiativas como gases efecto invernadero y aerosoles, o a cambios en las propiedades reflectivas superficiales del planeta. El forzamiento Radiativo es medido por el cambio en el flujo neto, es decir en la vertical, en algún nivel específico en la atmósfera en respuesta a una perturbación.

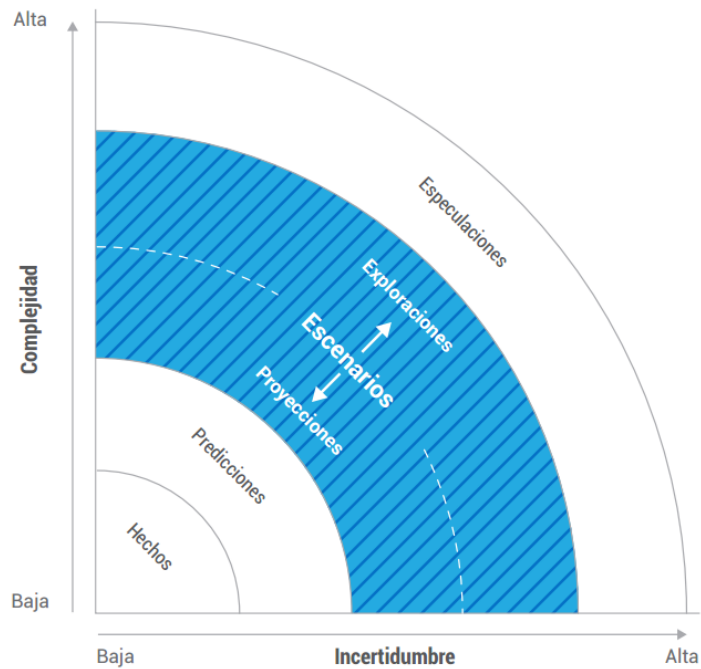
5.1.1.2. Escenarios de Cambio Climático.

Un escenario es una descripción estimable sobre cómo puede desarrollarse el futuro. Esta descripción está basada en un conjunto de variables y supuestos sobre fuerzas y relaciones de cambio claves, que pueden originar un convincente posible estado futuro sobre algo. Los escenarios son una de las principales herramientas de la investigación prospectiva, la cual permite estimar con anticipación lo que ocurrirá si se presentan cada uno de los eventos modelados.

Los escenarios se constituyen en poderosas herramientas de apoyo a la gestión, ya que permiten a los responsables de la toma de decisiones de hoy (presidente, gobernadores, empresarios, inversionistas, directivos, investigadores), bajo algunos supuestos veraces y científicamente soportados, enfrentar la complejidad y la incertidumbre, y aproximarse a la manera de cómo podría ser el futuro, de modo que pueda anticiparse a los potenciales hechos que se desarrollarían en un lugar determinado, utilizando la planificación, los

proyectos y las inversiones. En la figura 12 se observa el Esquema de complejidad vs incertidumbre en un escenario.

Figura 12. Esquema de complejidad vs incertidumbre en un escenario.



Fuente: Zurek y Henrichs.

La construcción de escenarios da la posibilidad de tomar decisiones mediante la proyección del futuro en caso de que lo que se observa no sea lo deseado, además motivar y orientar al planificador y a los responsables de la elaboración de las políticas públicas de hoy en día, a tomar las decisiones que permitan cambiar o prepararse para las posibles situaciones generando un mejor futuro alternativo.

Así mismo, permiten que si la proyección del futuro observada es positiva y deseable, de igual manera influya en la toma de decisiones para planificar y así alcanzar ese futuro proyectado. Bajo este contexto, un Escenario de Cambio Climático es la representación del

clima que se observaría bajo una concentración determinada de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera en las diferentes épocas futuras (En este caso para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100). El objetivo de trabajar con Escenarios de Cambio Climático no es predecir el futuro climático, sino evaluar un amplio espectro de posibilidades respecto al posible comportamiento del clima en el futuro y entender las incertidumbres asociadas, con el fin de orientar decisiones robustas que permitan anticiparse a los posibles hechos y generar desde hoy un accionar eficaz que permita introducir los cambios sociales, ambientales, económicos y políticos necesarios para no llegar a la situación proyectada de un futuro desfavorable (IDEAM, 2015).

5.1.1.3. Modelos de Circulación General (MCGs).

La principal herramienta de la que se dispone para la prospección del clima en los próximos años (décadas) son los Modelos de Circulación General (MCGs). A partir de las ecuaciones primitivas de la dinámica atmosférica, estos modelos simulan los flujos de energía, masa y cantidad de movimiento que tienen lugar entre la Atmósfera y el Océano. Mediante integración temporal de dichos flujos se obtienen simulaciones de la evolución del estado de la atmósfera.

Los MCGs presentan una capacidad notable para simular la circulación general atmosférica y los fenómenos asociados a ella. El problema surge cuando se quiere trabajar a escalas menores, donde los fenómenos locales no son recogidos correctamente por los MCGs y las variables especialmente en superficie, no se aproximan a los valores observados. Estas limitaciones se deben en gran parte, 1) a que los modelos no recogen correctamente la topografía específica de cada región y por tanto omiten ciertos fenómenos locales de gran importancia, y 2) que al parametrizar ciertos fenómenos se está suponiendo que estos se comportan de igual manera en todas las regiones cuando no tiene por qué ser así.

Se hace por tanto necesario extraer, de la información más fiable aportada por los MCGs (información de baja resolución, y preferentemente de atmósfera libre), la información requerida por los modelos que analizan el impacto (información de alta resolución -local-, en superficie). Ese proceso se denomina downscaling o regionalización.

Existen dos maneras de realizar el downscaling:

- 1) Downscaling estadístico: basado en relaciones empíricas entre variables a gran escala (procedentes de los MCGs) y variables de alta resolución (en superficie).
- 2) Downscaling dinámico: se basa en un incremento de la resolución en la zona de estudio, mediante una técnica de “zoom” o mediante la introducción de un modelo de Área Limitada (LAM).

5.1.1.4. Ensamble de modelos Climáticos Globales.

Un ensamble de modelos climáticos globales, o ensamble multimodelo, corresponde a la combinación individual de un conjunto de modelos climáticos. Esta combinación da como resultado un conjunto de proyecciones para una variable dada, que cubren los futuros más probables. Se hacen ensambles multimodelo para intentar reducir la incertidumbre asociada a las proyecciones y conocer su rango alrededor de la media del ensamble. Cuantificar estas incertidumbres en la proyección de escenarios climáticos futuros sirve para evaluar el impacto que estos escenarios tendrán y han sido un punto crítico identificado por la comunidad científica, dada su utilidad en la evaluación de diversos temas.

5.1.1.5. Quinto Informe de Evaluación-AR5.

Los principales productos del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) consisten en Informes de Evaluación, Informes Especiales, Guías Metodológicas y Documentos Técnicos. Cada informe del IPCC va acompañado de un

Resumen para responsables de políticas, que se publica en todos los idiomas oficiales de las Naciones Unidas. Tales resúmenes reflejan los conocimientos más recientes en la materia, y están redactados de manera comprensible para los no especialistas (IPCC, 2004). Se considera que los Informes de Evaluación constituyen los principales informes que prepara el IPCC, por su carácter global y profundo sobre el estado del conocimiento científico, técnico y socioeconómico del cambio climático, sus causas, sus potenciales impactos y las estrategias de respuesta. Actualmente el último informe publicado corresponde al Quinto Informe de Evaluación (Fifth Assessment Report: AR5), en cuatro partes durante 2013-2014 (MAAMA, 2013). En este informe los grupos desarrolladores de modelos climáticos han ejecutado la quinta fase del proyecto de inter-comparación de las simulaciones de los escenarios de Cambio Climático (Coupled Modeling Inter Comparison Project 5, CMIP5) (Taylor et al. 2012). El proyecto CMIP5 incluye simulaciones a largo plazo del clima del siglo XX y proyecciones para el siglo XXI e incluso hasta el siglo XXIII, además de simulaciones a corto plazo centradas en las últimas décadas. Hoy día existen poco más de 40 grupos internacionales de modelación, todos con modelos acoplados Océano-Atmósfera (AOGCM) y algunos de los grupos están corriendo “Earth System Models”, los cuales incluyen además de la Atmósfera y el Océano, la vegetación y ciclo de carbono interactivo (IPCC 2013). Estos modelos son la única herramienta disponible para poder hacer una proyección climática futura y solamente grandes instituciones como universidades, centros meteorológicos y de investigación en clima han desarrollado este tipo de modelos; aunque sus desarrollos están sujetos a las necesidades e intereses de cada institución en particular.

5.1.1.6. RCPs.

En el quinto informe realizado por el IPCC (AR5), se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión llamados RCP (Representative Concentration Pathways-RCP por sus siglas en ingles), que se centran en las emisiones antropogénicas y representan el Forzamiento Radiativo total calculado para el año 2100 respecto al año 1750 que oscila entre 2.6 y 8.5 vatios por metro cuadrado (W/m²). Se podría decir que el RCP2,6

representa un escenario de mitigación, el RCP4,5 y RCP6,0 son escenarios de estabilización y el RCP8,5 corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero.

Es importante tener en cuenta que los RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas, es decir cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. Esto difiere de los escenarios utilizados en los informes anteriores del IPCC (escenarios A1, A2, B1, B2 utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación-AR3 y AR4), cada uno de los cuales asumía una línea evolutiva determinada (por ejemplo el A1 representaba un mundo de crecimiento económico muy rápido, con una población mundial alcanzando su nivel más alto a mitad de siglo para luego disminuir y una rápida introducción de tecnologías nuevas más eficaces, mientras que el B2 representaba a la sostenibilidad económica, social y ambiental, con una población creciendo continuamente y con niveles medios de desarrollo y cambios tecnológicos menos rápidos). Los RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono (Banco Interamericano de desarrollo, 2013). En resumen, en la tabla 1 se describen los 4 RCPs con sus respectivas características, Forzamiento Radiativo en W/m², equivalente de CO² atmosférico en partes por millón (ppm), anomalía de la temperatura en °C y la trayectoria que representa cada escenario teniendo en cuenta el año 2.100 como periodo de referencia.

Tabla 1. RCP según quinto informe del IPCC (AR5).

Escenario	Forzamiento Radiativo (w/m2)	CO _{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura (°C)	Trayectoria
RCP8.5	8.5	>1370	~4.9	2100, en aumento
RCP6.0	6.5	850	~3	Estabilización después de 2100

RCP4.0	4.5	650	~2.4	Estabilización después de 2100
RCP2.6	2.6	490	~1.5	Picos antes de 2100 y después declina

Fuente: IDEAM.

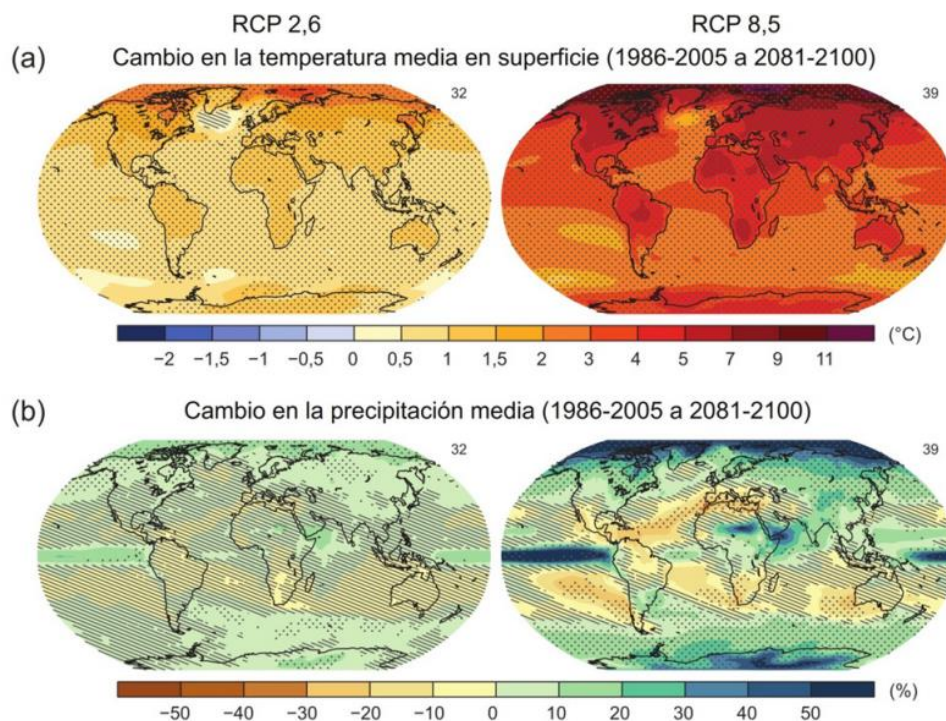
Los RCP ofrecen un punto de partida para nuevas investigaciones. Sin embargo, es importante reconocer sus usos y sus límites. No son ni predicciones ni recomendaciones políticas, pero fueron elegidos para asignar una amplia gama de resultados climáticos. Los RCP no pueden ser tratados como un conjunto coherente de lógica interna, pues por ejemplo, el RCP8.5 no puede ser usado como un escenario referente de «no-política» climática con respecto a los otros RCP, pues cada uno de ellos contiene una serie de suposiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas diferentes.

5.1.2. Escenarios de Cambio Climático Global.

De acuerdo a la información dada en el Quinto informe del IPCC (AR5) para finales del siglo XXI es probable que la temperatura global en superficie sea superior en 1.5°C con respecto a la del período entre 1.850 y 1.900 para todos los RCPs, salvo el RCP2.6. Es probable que esa temperatura sea superior en 2°C para los escenarios RCP6.0 y RCP8.5, y más probable que improbable que sea superior en 2°C para el escenario RCP4.5. El calentamiento continuará después de 2.100 en todos los escenarios RCP, excepto para el RCP2.6.

Los cambios que se pueden producir en el ciclo global del agua, en respuesta al calentamiento durante este siglo, no serán uniformes. Se acentuaría el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, con excepciones regionales (Figura 13b).

Figura 13. Cambio de temperatura media en superficie y cambio de la media porcentual de la precipitación media anual.



Fuente IDEAM.

Los cambios estimados en las temperaturas medias globales para los distintos RCP se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Proyección del cambio de la temperatura media global del aire en la superficie para mediados y finales del siglo XXI en relación con el periodo de referencia 1986-2005.

Escenario	2046-2065		2081-2100	
	Media	Rango Probable	Media	Rango Probable
RCP2.6	1.0	0.4-1.6	1.0	0.3-1.7
RCP4.5	1.4	0.9-2.0	1.8	1.1-2.6

RCP6.0	1.3	0.8-1.8	2.2	1.4-3.1
RCP8.5	2.0	1.4-2.6	3.7	2.6-4.8

Fuente: IDEAM.

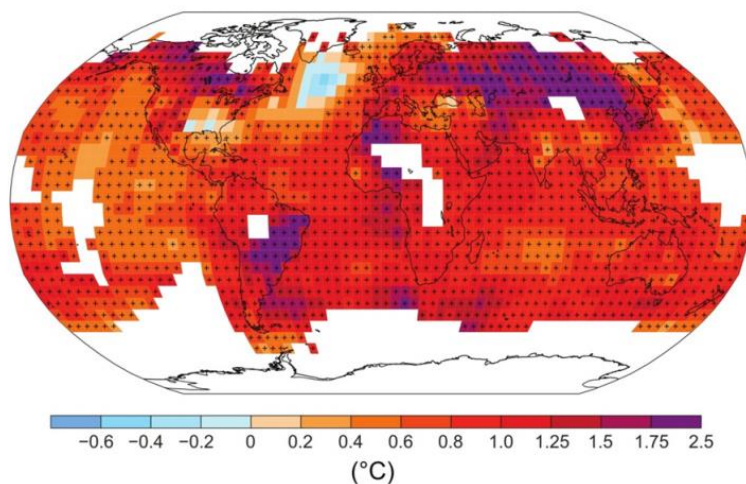
Así mismo el IPCC (2013) informa que:

- En la mayoría de las regiones habrá más episodios relacionados con extremos de altas temperaturas y menos relacionados con extremos de bajas temperaturas.
- Las olas de calor serán más frecuentes y tendrán mayor duración. Los fríos invernales extremos continuarán ocurriendo ocasionalmente.
- En algunas áreas aumentará la frecuencia, intensidad y/o cantidad de precipitaciones fuertes.

5.1.3. Variación de la Temperatura y precipitación en Colombia.

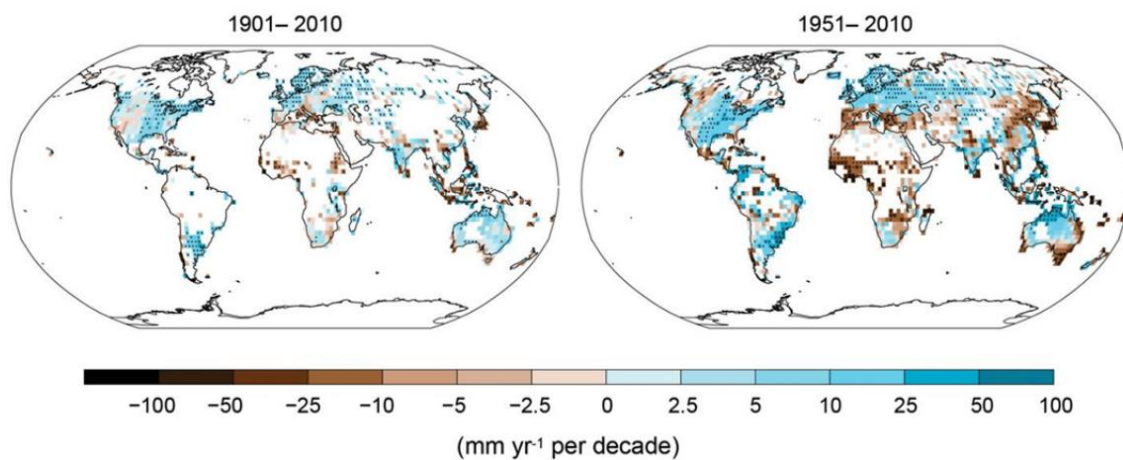
De acuerdo a las observaciones globales, para Colombia se han presentado aumentos de temperatura media en superficie entre 0.4°C y 1°C durante el periodo 1901 y 2012 (Figura 14). Mientras que para la precipitación, no se observan cambios significativos en el periodo 1901- 2010; sin embargo, al considerar el periodo 1951-2010, se aprecian incrementos para el norte y centro del país del orden de 10% y 50% (Figura 15).

Figura 14. Cambios observados en la temperatura media anual en superficie entre 1901 y 2012.



Fuente: Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia.

Figura 15. Cambios observados en la precipitación anual en superficie entre 1901 y 2010, y entre 1951 y 2010.



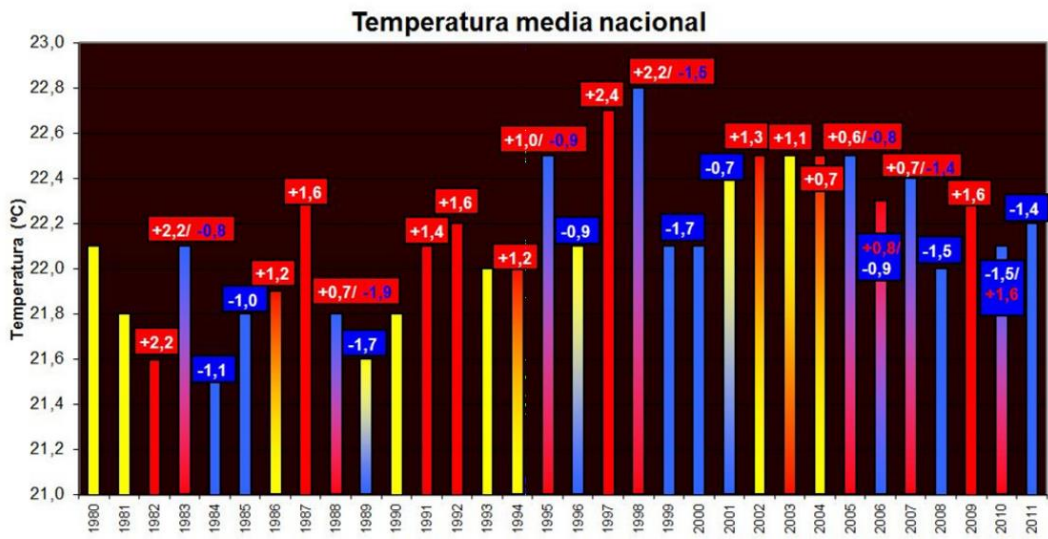
Fuente: Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia.

Con base en estudios nacionales (Benavides et. al., 2011; Benavides y Rocha, 2012; Ruiz et. al., 2012) se ha observado que:

- La temperatura media superficial presenta una tendencia al aumento entre 0.5°C y 1.3°C en el periodo 1.971-2.010, siendo el más caluroso el último decenio y el año más caliente 1.998, con un promedio en la temperatura media nacional de 23,74°C.
- El comportamiento de la temperatura media en el país está muy relacionado con la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña. Es así, que cuando ocurren fenómenos El Niño fuertes, se presentan notables incrementos en la temperatura media anual en el país. De los diez años más calientes durante el periodo 1.960-2.011, ocho estuvieron bajo la influencia de El Niño. Mientras que, cuando se presentan fenómenos de La Niña, las temperaturas medias en el país disminuyen también en forma notoria. Los años más fríos en el país, durante el periodo 1.995 a 2.011, estuvieron bajo la influencia de La Niña (1996, 1999, 2000, 2008, 2010 y 2011) (Figura 16).
- La temperatura máxima y mínima presentan en general tendencia al aumento, lo cual conlleva a que los días y las noches sean más calientes en extensas áreas del país
- La precipitación presenta un aumento generalizado, destacándose la zona noroccidental del país (Figura 18).
- De los años más lluviosos en el país durante el periodo 1.970-2.011, el 2.010 ocupa el primer lugar, seguido de los años 2.011, 1.999, 2.008 y 1.984. Los dos primeros años con más altas precipitaciones en el país coinciden con los que se presentaron a nivel global. Además, de los 15 años más lluviosos en el país en este periodo, 14 estuvieron bajo la influencia del fenómeno de La Niña (Figura 17).

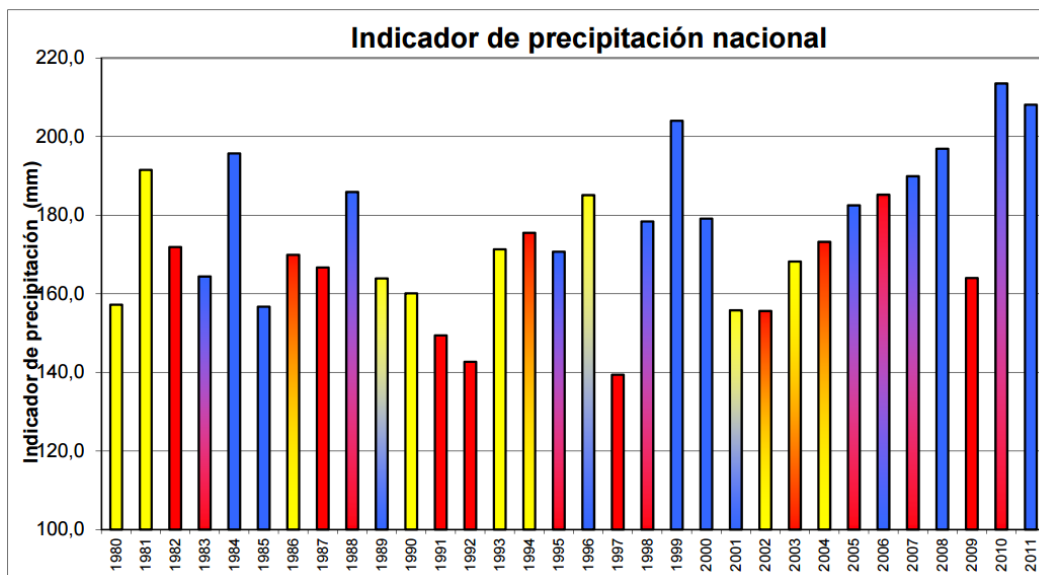
- Los años con menores precipitaciones en el país en ese mismo periodo fueron:
1.997,1.992, 1.991, 1.976 y 1.977.

Figura 16. Temperatura media anual en Colombia en el periodo 1980-2011 y su asociación con eventos El Niño (en rojo) y La Niña (en azul).



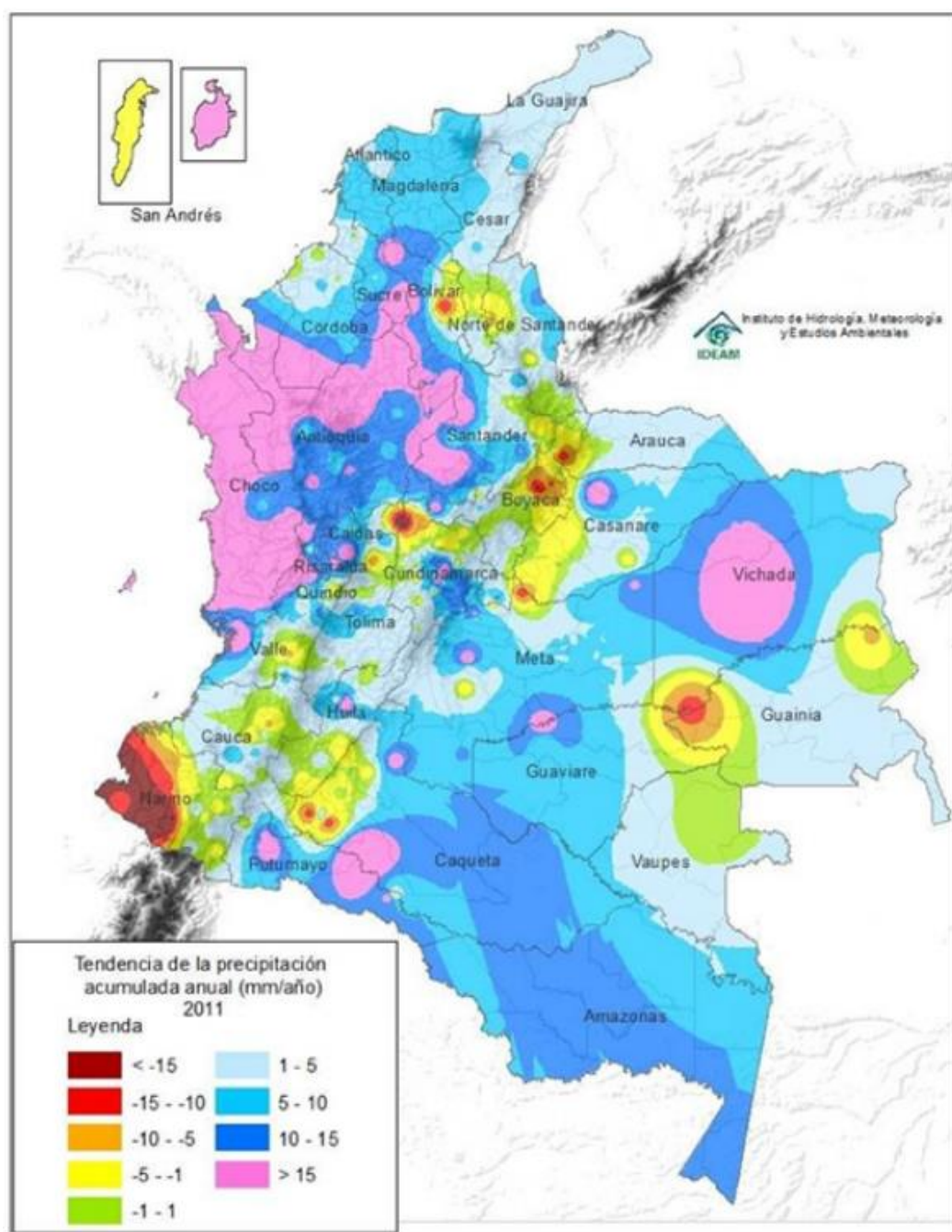
Fuente: IDEAM.

Figura 17. Indicador de precipitación anual para Colombia en el periodo 1980-2011 y su asociación con eventos El Niño (en rojo) y La Niña (en azul).



Fuente: IDEAM.

Figura 18. Tendencia de la precipitación acumulada anual para Colombia.



Fuente: IDEAM.

5.1.4. Escenarios de Cambio Climático en Colombia.

Desde hace más de una década, el IDEAM viene desarrollando modelos dinámicos y estadísticos reconocidos a nivel global, para la generación del clima a lo largo del siglo XXI, los que permiten calcular posibles cambios de las variables meteorológicas con respecto al clima actual. Los resultados de los nuevos escenarios de Cambio Climático por Departamentos para 2011-2100 para las variables de precipitación y temperatura se establecen en el último informe vigente que corresponde a la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático; este informe se basa en la descripción de los RCP así como también en el ensamble multimodelo y multiescenario que permite promediar las respuestas de los diferentes RCP en cada uno de los periodos de tiempo considerados (2011-2040; 2014 -2070 y 2071-2100) de modo que se constituyan en herramientas sencillas que, sin perder su poder científico, apoyen la toma de decisiones nacional y regional.

Los escenarios de cambio climático para Colombia, siguen las rutas metodológicas propuestas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) en su quinto informe de evaluación (AR5) del año 2013. Para su desarrollo, los científicos del IDEAM tomaron los 16 modelos globales que mejor representan el clima de referencia de Colombia (1976-2005) y que modelan la temperatura y la precipitación hasta el año 2100. Estos modelos fueron regionalizados con métodos estadísticos con el fin de proyectarlas en el contexto nacional.

Por estándares internacionales del IPCC, el periodo comprendido entre 1976 y 2005 ha sido adoptado como el clima de referencia; es decir, la representación del estado actual del clima frente al que se compara cualquier escenario futuro. Este periodo fue seleccionado ya que corresponde a un tiempo en el que existe una robustez estadística en los datos observados.

5.1.4.1. Metodología y determinación de los Escenarios Climáticos futuros en Colombia.

Para la generación de los escenarios se realizó el inventario de los MCG disponibles en la base de datos de la quinta fase del proyecto CMIP5 (Taylor et al. 2012) para las variables de temperatura (media, máxima y mínima) y precipitación a escala mensual. Se descargaron los datos para el periodo histórico 1976-2005 y para el periodo futuro, 2011-2100, de cada uno de los RCP. Los datos observados que se usaron corresponden al mismo periodo histórico (1976-2005). Para el caso de las temperaturas (media, máxima y mínima) se trabajaron los datos de 333, 306 y 276 estaciones meteorológicas respectivamente y para precipitación 1072, distribuidas a lo largo del territorio Colombiano. Los escenarios de cambio climático se generaron para cada una de las estaciones meteorológicas, razón por la cual fue necesario obtener los datos de los modelos en esos puntos de rejilla. Estos últimos se obtuvieron con respecto al punto más cercano a la coordenada geográfica de la estación, tanto para los datos históricos como para los de cada RCPs.

Para obtener resultados a partir de dichos modelos globales en el contexto nacional y regional, se realizó un ensamble multimodelo con el método Ensamble Promedio de Fiabilidad Conjunta (“Reliability Ensemble Averaging” REA Method, por sus siglas en inglés) (Giorgi and Mearns, 2001). Éste es un método para combinar las salidas de los modelos de circulación general teniendo en cuenta dos criterios. El primero de ellos es un criterio de desempeño, el cual se basa en la capacidad de los modelos para reproducir diferentes aspectos del clima presente. En este sentido el modelo que tenga la mejor representación del periodo de referencia tiende a ser el más confiable en las simulaciones de cambio climático. El segundo criterio, denominado de convergencia, está basado en los cambios simulados a través de los modelos para un mismo escenario de emisiones, es decir que una mayor convergencia hacia el futuro entre los modelos implica mayor confiabilidad en la señal encontrada. Este método permite calcular el promedio, el rango de

incertidumbre y la fiabilidad colectiva de las proyecciones de cambio climático regionales de diferentes conjuntos de simulaciones de los modelos con base en los dos criterios anteriores. Con los datos obtenidos mediante el método de ensamble REA, finalmente se procedió a representarlos cartográficamente, aplicando metodologías de interpolación espacial con ayudas de coberturas como la topografía, el uso del suelo y herramientas computacionales entre ellas ArcGIS 10.2.2 (Armenta, Dorado, Rodríguez y Ruiz, 2014).

De acuerdo a las proyecciones globales, para Colombia se presentarían aumentos de temperatura media en superficie entre 1.0°C y 1.5°C bajo el RCP2.6 y entre 3.0°C y 4.0 °C bajo el RCP8.5 para el periodo 2081-2100 con respecto al periodo 1986-2005. Para el mismo periodo y bajo el RCP2.6, la precipitación presentaría aumentos entre 0 y 10% en el Pacífico y disminuciones para el resto de país entre 0 y 10%, mientras que bajo el RCP8.5 se esperarían aumentos en el Pacífico y sur del país entre el 0 y 10% y disminuciones en la parte norte entre el 0 y 10%. (IDEAM, 2015).

5.1.5. Escenarios de Precipitación en el Departamento de Boyacá.

Las estimaciones realizadas por el IDEAM, se regionalizaron a nivel departamental. Para el caso del departamento de Boyacá, en promedio no se presentarán grandes aumentos, excepto en un núcleo asociado a la provincia Centro, Oriente y Márquez en donde el cambio podrá estar entre el 20 y el 40% para el año 2100 (Figura 19).

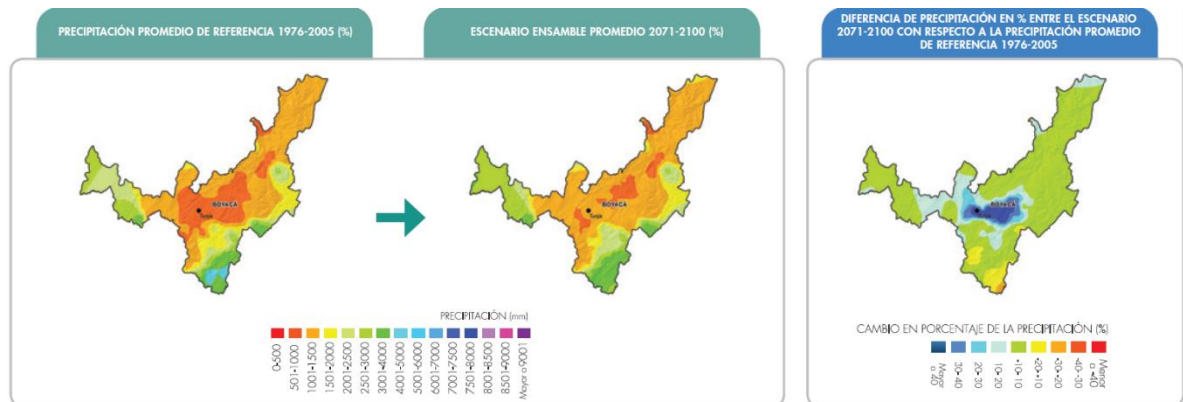
Para el periodo comprendido entre 2011-2040 se estiman cambios de la precipitación en general del 5.84%; para el periodo comprendido entre 2041-2070 se estima un cambio del 3,69%, y finalmente para el periodo de 2071-2100 se estima un aumento de 3,19% en precipitaciones.

5.1.6. Escenarios de Precipitación para la Ciudad de Tunja.

Para el caso específico de la ciudad de Tunja, se espera que la precipitación aumente un 30% aproximadamente en periodo 2071-2100, respecto a 1976-2005.

Para la ciudad de Tunja se esperan 3 escenarios de aumento comprendidos entre los años 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100; como los porcentajes de cambio que se mencionaron anteriormente están establecidos a escala Departamental se realizó una ponderación de esos porcentajes y se realizó la distribución del 30% esperado para la ciudad de Tunja para cada escenario. Finalmente se obtuvo un aumento aproximado del 14% en el periodo 2011-2040, 9% en 2041-2070 y finalmente 7% en 2071-2100.

Figura 19. Escenarios de variación de precipitación para el departamento de Boyacá.



Fuente: IDEAM.

5.2. Método 2. Estimaciones de Escorrentía.

De acuerdo a lo estipulado en el apartado 4.4.2 del RAS en su título D “Para los sistemas de todos los niveles de complejidad, cuando sea obligatorio el uso de modelos para la generación de hidrogramas, se recomienda utilizar el método desarrollado e implementado

en el programa SWMM (Rosman, 2004) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, EPA)”.

5.2.1. Descripción de la Fase de Modelación con SWMM.

El Storm Water Management Model (SWMM, por sus siglas en ingles) de la EPA es un modelo dinámico de simulación de precipitación, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema dispuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Así mismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

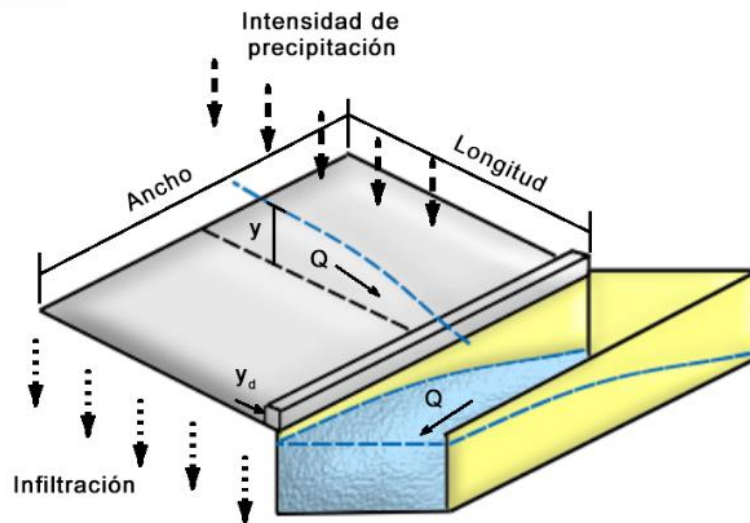
El modelo SWMM se implementó para analizar el drenaje urbano de la ciudad de Tunja, debido a las recomendaciones que sugiere el RAS, y debido a que el funcionamiento y procesamiento matemático que emplea el modelo se asemejan al comportamiento operativo del sistema de alcantarillado actual de la ciudad de Tunja.

5.2.1.1. Escorrentía.

Con el fin de aplicar el método del SWMM, es necesario idealizar cada una de las cuencas de drenaje que llegan a cada uno de los sumideros del sistema de recolección y evacuación de las aguas lluvias, en forma tal que ésta asemeje un canal rectangular caracterizado por una pendiente y coeficiente de rugosidad constantes (EPA, 2005).

En la figura 20 se muestra modelo conceptual del método empleado por SWMM en el que la intensidad de la precipitación cae sobre toda el área del canal hipotético y parte del agua sale del canal como tasa de infiltración. La altura representa la altura de un canal rectangular hipotético de cresta ancha al final, con el objetivo de simular el fenómeno de estancamiento de agua que produce la precipitación que cae en la cuenca.

Figura 20. Modelo conceptual del método empleado por SWMM.



Fuente: RAS 2015 Titulo D.

Donde y_d es la profundidad de almacenamiento de la cuenca, si la cuenca posee estancamientos, y es el nivel de agua en la hipotética cuenca para cada paso de tiempo, y Q es el caudal de escorrentía directa.

5.2.1.2. Infiltración

La infiltración es el fenómeno por el cual el agua de lluvia penetra la superficie del terreno de los suelos no saturados de las áreas permeables de la cuenca. SWMM permite seleccionar tres modelos diferentes de infiltración:

a) Modelo de infiltración de Horton:

Este modelo indica que todo suelo presenta una capacidad de infiltración inicial y final, y además tiende a alcanzar la condición de infiltración definitiva con una tasa de decaimiento particular.

b) Modelo de infiltración propuesto por el SCS (NRCS)

Este método fue desarrollado por el entonces Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (U.S. Soil Conservation Service, SCS) actualmente conocido como el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos (U.S. Natural Resources Conservation Service -NRCS); permite determinar la precipitación efectiva producida por un evento de lluvia. El método asigna un número de curva (CN) característico de cada tipo de suelo de la cuenca, dependiendo de sus características de permeabilidad.

c) Modelo de infiltración de Green y Ampt

Este modelo asume la existencia de un frente húmedo brusco (sharp wetting front) en el suelo que separa el suelo con un determinado contenido inicial de humedad del suelo completamente saturado de la parte superior.

El modelo de infiltración propuesto por el SCS (NRCS), presenta inconsistencias y un grado de precisión inferior en la predicción de caudales picos de descarga en comparación con el modelo de Green y Ampt; sin embargo, el modelo es válido siempre y cuando los valores locales del Número de Curva sean precisos (Eli y Lamont, 2010). Como la ciudad de Tunja carece de dichos estudios habría que asumir valores teóricos que causarían posiblemente inconsistencias con ese modelo. Por tal razón se empleó el modelo de Green Ampt para el estudio de caso.

5.2.1.3. Modelo Hidráulico de Transporte.

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos en SWMM está representado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio (es decir, las ecuaciones de Saint Venant). El usuario de SWMM puede seleccionar el nivel de sofisticación con que desea resolver estas ecuaciones. Por ello existen tres modelos hidráulicos de transporte:

a) Modelo de Flujo Uniforme (Steady State Routing).

El modelo de flujo uniforme es la forma más simple de representar el comportamiento del agua en el interior de los conductos. Para ello se asume que en cada uno de los incrementos de tiempo de cálculo considerados, el flujo es uniforme. De esta forma, el modelo simplemente traslada los hidrogramas de entrada en el nudo aguas arriba del conducto hacia el nudo final del mismo, con un cierto retardo y cambio en el aspecto del mismo. Este tipo de modelo hidráulico no puede tener en cuenta el almacenamiento de agua que se produce en los conductos, los fenómenos de resalto hidráulico, las pérdidas a la entrada y salida de los pozos de registro y el flujo inverso o los fenómenos de flujo presurizado. Este modelo solo puede utilizarse en sistemas ramificados, donde cada uno de los nudos tiene únicamente una única línea hacia la que vierte sus aguas (a menos que el nudo sea un divisor en cuyo caso requiere de dos tuberías de salida). Este modelo de análisis es insensible al incremento de tiempo seleccionado y únicamente es apropiado para realizar análisis preliminares utilizando simulaciones continuas de escalas de tiempo grandes (EPA, 2005).

b) Modelo de la Onda Cinemática (Kinematic Wave).

Este modelo hidráulico de transporte resuelve la ecuación de continuidad junto con una forma simplificada de la ecuación de cantidad de movimiento en cada una de las conducciones. Esta última requiere que la pendiente de la superficie libre del agua sea igual a la pendiente de fondo del conducto. El caudal máximo que puede fluir por el interior de un conducto es el caudal a tubo lleno determinado por la ecuación de Manning. Cualquier exceso de caudal sobre este valor en el nudo de entrada del conducto se pierde del sistema o bien puede permanecer estancado en la parte superior del nudo de entrada y entrar posteriormente en el sistema cuando la capacidad del conducto lo permita. El modelo de la onda cinemática permite que tanto el caudal como el área varíen tanto espacial como temporalmente en el interior del conducto. Esto origina una cierta atenuación y retraso en los hidrogramas de salida respecto de los caudales de entrada en los conductos. No obstante, este modelo de transporte no puede considerar efectos como el resalto hidráulico, las pérdidas en las entradas o salidas de los pozos de registro, el flujo inverso o el flujo presurizado, así como su aplicación está restringida únicamente a redes ramificadas. Si algunos de los efectos especiales mencionados con anterioridad no se presentan en el sistema o no son significativamente importantes en el mismo el modelo de la onda cinemática es una alternativa suficientemente precisa y eficiente para el modelo de transporte con tiempos de simulación largos (EPA, 2005).

c) Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave).

El modelo de transporte de la Onda Dinámica (Dynamic Wave Routing) resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nudos. Con este tipo de modelo de transporte es posible representar el flujo presurizado cuando una conducción cerrada se encuentra completamente llena, de

forma que el caudal que circula por la misma puede exceder del valor de caudal a tubo completamente lleno obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad del agua en los nodos excede el valor máximo disponible en los mismos. Este exceso de caudal bien puede perderse o bien puede generar un estancamiento en la parte superior del nudo y volver a entrar al sistema de saneamiento posteriormente. El modelo de transporte de la Onda Dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, el flujo inverso y el flujo presurizado. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nudos y los caudales en las conducciones puede aplicarse para cualquier tipo de configuración de red de saneamiento, incluso en el caso de que contengan nudos con múltiples divisiones del flujo aguas abajo del mismo o incluso mallas en su trazado. Se trata del método de resolución adecuado para sistemas en los que los efectos de resalto hidráulico, originados por las restricciones del flujo aguas abajo y la presencia de elementos de regulación tales como orificios y vertederos, sean importantes. El precio que generalmente es necesario pagar por el empleo de este método es la necesidad de utilizar incrementos de tiempo de cálculo mucho más pequeños, del orden de 1 minuto o menos. Durante el cálculo, SWMM reducirá automáticamente el incremento de tiempo de cálculo máximo definido por el usuario si es necesario para mantener la estabilidad numérica del análisis.

Para lograr la obtención de resultados más precisos, las características y parámetros del sistema de drenaje de la ciudad de Tunja demandan el uso del modelo de la onda dinámica.

5.3. Método 3. Sistemas urbanos de drenaje sostenible.

El desarrollo de bajo impacto (Low Impact Development, por sus siglas en inglés), es un sistema de elementos que integran la infraestructura urbana creados para preservar los procesos naturales de drenaje de aguas lluvia, de manera que contribuyan al manejo de

inundaciones, mejoramiento de la calidad del agua, reducción de problemas urbanísticos de contaminación y favorecimiento de la recarga de acuíferos. (EPA, 1999)

El desarrollo de bajo impacto o desarrollo urbano sostenible engloba un conjunto de técnicas específicas referidas al drenaje urbano conocidas como SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) en el Reino Unido, BMPs (Best Management Practices) en Estados Unidos o Mejores Prácticas de Control (MPC) en los países hispano parlantes (Jiménez, 1999).

Los principios de los SUDS se centran en conseguir soluciones de gestión integrada del ciclo del agua, directamente ligadas a la protección medioambiental de las aguas receptoras. Los objetivos de los SUDS incluyen:

- a) Preservar la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas.
- b) Respetar el régimen hidrológico natural de las cuencas, reduciendo volúmenes de escorrentía y caudales punta procedentes de zonas urbanizadas, con la ayuda de elementos de retención en origen y minimizando áreas impermeables.
- c) Integrar la gestión y el tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje, minimizando el coste de las infraestructuras de drenaje al mismo tiempo que aumenta el valor del entorno.
- d) Reducir la demanda de agua potable, realizando una gestión integral de los recursos hídricos al fomentar la reutilización en origen tanto de aguas pluviales como grises (Perales M y Sara, 2008).

Como alternativa a la problemática del cambio climático en la ciudad de Tunja se planteó la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible, analizando el comportamiento de estos a través de la modelación en SWMM.

6. RESULTADOS

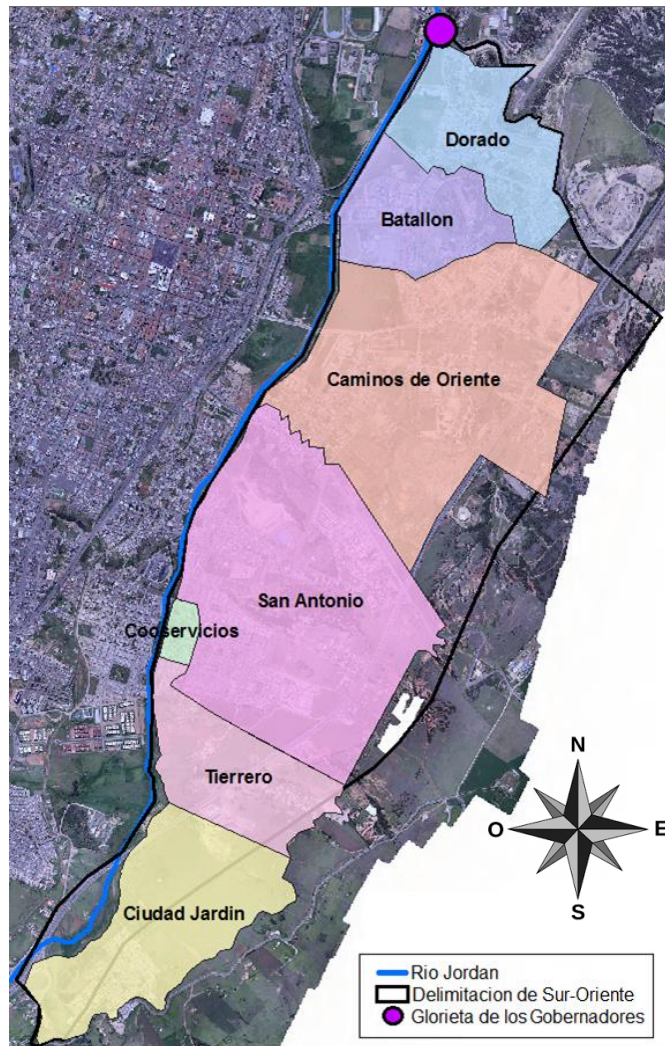
6.1. Procedimiento en el modelo SWMM.

La ciudad de Tunja está dividida en 4 zonas, nor oriente, nor occidente, sur oriente y sur occidente. Para la realización de la modelación, se analizó la zona Sur-Oriental, que limita de norte a sur desde la glorieta de los gobernadores hasta el barrio Ciudad Jardín y de occidente a oriente desde el Río Jordán, hasta el corredor vial sub urbano (300m. hacia el oriente desde la doble calzada) como se observa en la figura 21. La zona sur-oriental se encuentra sub dividida en 7 distritos de drenaje (De acuerdo al SIG de PROATIVA S.A. ESP): Dorado, Batallón, Caminos de Oriente, San Antonio, Cooservicios, Tierrero de oriente y Ciudad Jardín, de los cuales se analizó el distrito Caminos de Oriente debido a que aún no se ha urbanizado totalmente y se puede realizar una planificación previa que comprende también el diseño de colectores de acuerdo al análisis de los caudales de escorrentía aportados. Además de esto, el distrito se está planificando para que su sistema de alcantarillado sea separado. Dentro de las características particulares del distrito se tienen en general áreas urbanizadas y áreas urbanizables no urbanizadas cubiertas por vegetación que representan una permeabilidad diferente y por tanto un aporte de escorrentía diferente. Se encuentran también algunas zonas de cárcavas y zonas protegidas por el ordenamiento territorial de la ciudad que representan zonas en las cuales no se podrá llevar a cabo ningún proyecto civil que pueda alterar la permeabilidad del suelo y por tanto alterar también los aportes de escorrentía.

También se contempló analizar el corredor vial suburbano que abarca 300 m. desde la doble calzada hacia el oriente, debido a la potencialidad de urbanización que tiene dicha zona y debido a que las características geomorfológicas de la ciudad hacen que las aportaciones de escorrentía se vean dispuestas en el río Jordán. Además de esto las normativas vigentes establecen que la empresa debe suministrar servicios de acueducto y alcantarillado en dicha área. Las áreas de los diferentes distritos de drenaje son menores a

80 ha, por tanto es posible usar el metodo racional que emplea el software SWMM, para determinar la escorrentia resultante de los diferentes escenarios pluviales.

Figura 21. Distritos de Drenaje y Delimitacion de la zona Sur-Oriente.



Fuente: SIG Proactiva Aguas de Tunja.

6.1.1. Parámetros requeridos por EPA SWMM para la modelación.

En las siguientes tablas se describen cada uno de los parámetros necesarios para realizar la modelación y el procedimiento realizado para poder determinar cada uno:

Tabla 3. Parámetros requeridos por SWMM para sub-cuencas.

PARÁMETROS PARA SUB-CUENCAS.		
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	OBTENCIÓN
Área	Área de drenaje en ha. cada subcuenca de drenaje se caracteriza por tener propiedades similares y que estén conjuntas en determinada área ej. Una área que presente la misma pendiente y las mismas características del suelo (ha).	Parámetros determinado a través de la orto fotografía georreferenciada que posee el SIG de la empresa Proactiva Aguas de Tunja en la que es posible realizar este tipo de medidas de manera exacta.
Width (Ancho)	Anchura característica del flujo debido a la escorrentía superficial (m o ft).	Se calculó dividiendo el área total de la subcuenca entre la máxima longitud de la misma. Esta longitud máxima es la distancia que habrá entre el punto más alejado de la descarga y la propia descarga.
% Slope (% Pendiente)	Pendiente media de la subcuenca, en % .	Parámetro determinado a través de un Modelo de elevación Digital, que posee el SIG de la empresa Proactiva Aguas de Tunja y a través de herramientas de cálculo de ArcGis.
% Impervious (Impermeabilidad)	Porcentaje de la subcuenca cuyo suelo es impermeable.	Para los predios que aún no están urbanizados se tuvo en cuenta los tratamientos de suelo mencionados en el numeral anterior. Tomándose un valor del 92% para áreas que tengan usos dotacionales permitidos y 80% para el resto de usos de suelo. Para los predios ya urbanizados, se realizó una medición (a través de la orto fotografía) del área impermeable para cada sub-cuenca.
N-Impervious (Manning N, Impermeable)	Coefficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable de la subcuenca.	Valores teóricos, suministrados en el manual del modelo EPA SWMM.

N-Pervious (Manning N, Permeable)	Coeficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable de la subcuenca.	Valores teóricos, suministrados en el manual del modelo EPA SWMM.
Dstore-Impervious (Profundidad de almacenamiento impermeable)	Altura de la subcuenca de drenaje del área impermeable, que pueda almacenar y producir estancamiento del agua (mm).	Valores teóricos, suministrados en el manual del modelo EPA SWMM.
Dstore-Pervious (Profundidad de almacenamiento permeable)	Altura de la subcuenca de drenaje del área permeable, que pueda almacenar y producir estancamiento del agua (mm).	Valores teóricos, suministrados en el manual del modelo EPA SWMM.
% Zero-Impervious (% Área impermeable sin depresiones)	Porcentaje del área impermeable que no presenta alturas o depresiones que puedan almacenar y causar estancamientos.	Parámetros observados en campo, que en su mayoría fue del 100% debido a las nivelaciones que se realizan cuando en la construcción de nuevas obras civiles.
Subarea Routing (Flujo entre subareas)	Selección del modelo interno de transporte de escorrentía entre las áreas permeable e impermeable.	Se eligió el parámetro "OUTLET" debido a que representa que la escorrentía fluye desde ambas áreas (Impermeable y permeable) directamente hacia la descarga.
Percent Routed (% Escorrentía transportada)	Porcentaje de escorrentía transportado entre subcuencas.	Se determinó como 100% en todos los casos debido a las condiciones de cada sub-cuenca.
Infiltration (Modelo de infiltración)	Parámetros del modelo de infiltración.	Se utilizó el modelo de Green Ampt. El área de estudio se encuentra ubicada en la formación tilatá, que está compuesta principalmente por arcillas arenosas. Los valores teóricos para el modelo de infiltración se tomaron del RAS 2015 en su título D.
Groundwater (Aguas subterráneas)	Parámetros de flujo de aguas subterráneas.	No aplica para las condiciones del modelo.
Snow Pack (Capa de nieve)	Parámetros para el análisis de deshielo de nieve.	No aplica para las condiciones del modelo.

LID Controls (Controles de Desarrollos de bajo impacto)	Controles para el análisis de Desarrollos de bajo impacto.	Valores teóricos tomados de artículos de investigación.
Land Uses (Usos del suelo)	Asignación de los usos del suelo de la subcuenca (Únicamente para el cálculo de contaminantes en escorrentía).	No aplica para las condiciones del modelo.
Initial Buildup (Acumulación inicial)	Almacenamiento inicial de contaminantes en la subcuenca.	No aplica para las condiciones del modelo.
Curb Lenght (Longitud de anden)	Longitud de anden (m) (Únicamente para el cálculo de contaminantes en escorrentía).	No aplica para las condiciones del modelo.

Fuente: Autor.

Tabla 4. Parámetros requeridos por SWMM para conductos.

PARÁMETROS PARA CONDUCTOS.		
Parámetro	DESCRIPCIÓN	OBTENCIÓN
Shape (Forma)	Geometría de la sección transversal del conducto.	Parámetros observados en campo o en el catastro de redes del SIG (Para conductos ya existentes), y definido por resultados del modelo (Para conductos nuevos).
Max. Depth (Profundidad máxima)	Profundidad de la sección transversal (m).	Parámetros observados en campo o en el catastro de redes del SIG (Para conductos ya existentes), y definido por resultados del modelo (Para conductos nuevos).
Lengh (Longitud)	Longitud del conducto (m).	Parámetros calculado a través de mediciones de la orto fotografía.
Rough Ness (Rugosidad)	Coefficiente de Manning n del conducto.	Valores teóricos observados en el manual del usuario del modelo EPA SWMM.
Inlet Offset (Desnivel de entrada)	Altura del conducto sobre el fondo del nudo (pozo) inicial para modificar la pendiente del conducto (m).	No aplica para el modelo, debido a que no se requieren cambios en la pendiente del conducto.
Outlet Offset (Desnivel de salida)	Altura del conducto sobre el fondo del nudo (pozo) final para modificar la pendiente del conducto (m).	No aplica para el modelo, debido a que no se requieren cambios en la pendiente del conducto.
Initial Flow (Caudal inicial)	Caudal inicial en el conducto (Unidades de caudal).	No aplica para el modelo, debido a que no se va a evaluar ese tipo de condiciones.
Máximum Flow (Caudal máximo)	Caudal máximo permitido durante el modelo hidráulico, aplica para simulaciones de la onda dinámica (Unidades de caudal).	No aplica para el modelo, debido a que no se va a evaluar ese tipo de condiciones.

Entry Loss Coefficient (Coeficiente de pérdidas de energía en la entrada del conducto)	Coeficiente de pérdidas de energía a la entrada del conducto.	Valores despreciados debido a las condiciones del modelo.
Exit Loss Coefficient (Coeficiente de pérdidas de energía en la salida del conducto)	Coeficiente de pérdidas de energía a la entrada del conducto.	Valores despreciados debido a las condiciones del modelo.
Average Loss coefficient (Coeficiente de pérdidas de energía distribuidas a lo largo de la longitud del conducto)	Coeficiente de pérdidas de energía distribuidas a lo largo de la longitud del conducto.	Valores despreciados debido a las condiciones del modelo.
Seepage Loss rate (Perdidas por infiltración en el conducto en mm/h)	Valores de infiltración a lo largo del conducto (mm/h).	No aplica para las condiciones del modelo.
Flap gate (Compuerta anti retorno)	Compuerta anti retorno para prevenir el flujo inverso.	No aplica para las condiciones del modelo.
Culvert Code (Código de culvert)	Código para definir la sección transversal en caso de que sea un box culvert, los conductos designados como box culvert son verificados continuamente (durante el modelo de la onda dinámica) para verificar si cumplen con el control de entrada definido por la Administración Federal de Autopistas.	No aplica debido a que la normativa Colombiana de vías es diferente.

Fuente: Autor.

Tabla 5. Parámetros requeridos por SWMM para nodos.

PARÁMETROS PARA NODOS (POZOS)		
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	OBTENCIÓN
Inflows (Aportes)	Aportes externos de agua u otros compuestos que se recogen en la conexión (Unidades de caudal).	No aplica para las condiciones del modelo.
Treatment (Tratamiento)	Tratamiento de eliminación de contaminantes generado en el nodo.	No aplica para las condiciones del modelo.
Invert Elevation (Cota de fondo)	Cota de fondo del nodo (m).	Parámetros determinado a través del catastro de redes del SIG (Para nodos ya existentes), y definido por resultados del modelo (Para nodos nuevos).
Max. Depth (Profundidad máxima)	Profundidad máxima del pozo (m).	Parámetros determinados a través de los resultados del modelo.
Initial Depth (Nivel inicial)	Nivel inicial de agua en el nodo (m).	No aplica para las condiciones del modelo.
Surcharge Depth (Altura de sobrepresión)	Valor de la altura piezométrica por encima del nivel máximo en el nodo a partir del cual ocurre el fenómeno de inundación (m).	No aplica para las condiciones del modelo.
Ponded Área (Área de inundación)	Área en la parte superior del nodo sobre la que se produce el fenómeno de inundación (m ²).	No aplica para las condiciones del modelo.

Fuente: Autor.

6.2. Características Físicas de la Zona de Estudio.

6.2.1. Estudios Hidrológicos.

Para la estimación del caudal de diseño de los sistemas de alcantarillado pluvial, el RAS 2015 en su título D, numeral 2.2.2.1 establece que se debe contar con información de las curvas intensidad- duración-frecuencia de las estaciones cercanas al proyecto, la distribución temporal de las precipitaciones (duración de las lluvias) de la zona, y las características de los cuerpos receptores en cuanto a crecientes máximas, caudales mínimos y niveles máximos y mínimos.

La ciudad de Tunja dispone de una estación meteorológica instalada por el IDEAM en 1962 que se encuentra a una elevación de 2690 m.s.n.m. sobre la latitud 5.5430775 y

longitud -73.360813055556 y realiza mediciones de diferentes parametros meteorologicos como brillo solar, evaporacion, humedad relativa, nubosidad, precipitacion, punto de rocío, recorrido del viento, rosa de los vientos, temperatura, tension del vapor y velocidad del viento. El IDEAM realizó la elaboracion de una curva IDF a partir de 29 años analizados. Esta información se encuentra desactualizada debido a que se ha venido presentado un incremento de las precipitaciones causado por diferentes factores como el cambio climatico, el fenomeno de urbanizacion, entre otros. Por tanto, se realizó un analisis y correccion a las intensidades de precipitacion mas recientes.

Para la distribucion temporal de las precipitaciones, el IDEAM realizo un analisis de las precipitaciones horarias en Colombia en el periodo 1971-2000, en la que se analizan varias estaciones metereologicas del país. Para el caso de la ciudad de Tunja, se realizó el analisis a la estacion UPTC, en donde se entregan los escenarios de horas consecutivas con mayor precipitacion relacionándolo en periodos de 6, 3 y 1 hora, y las horas del dia con mas frecuencia de ocurrencia de lluvia.

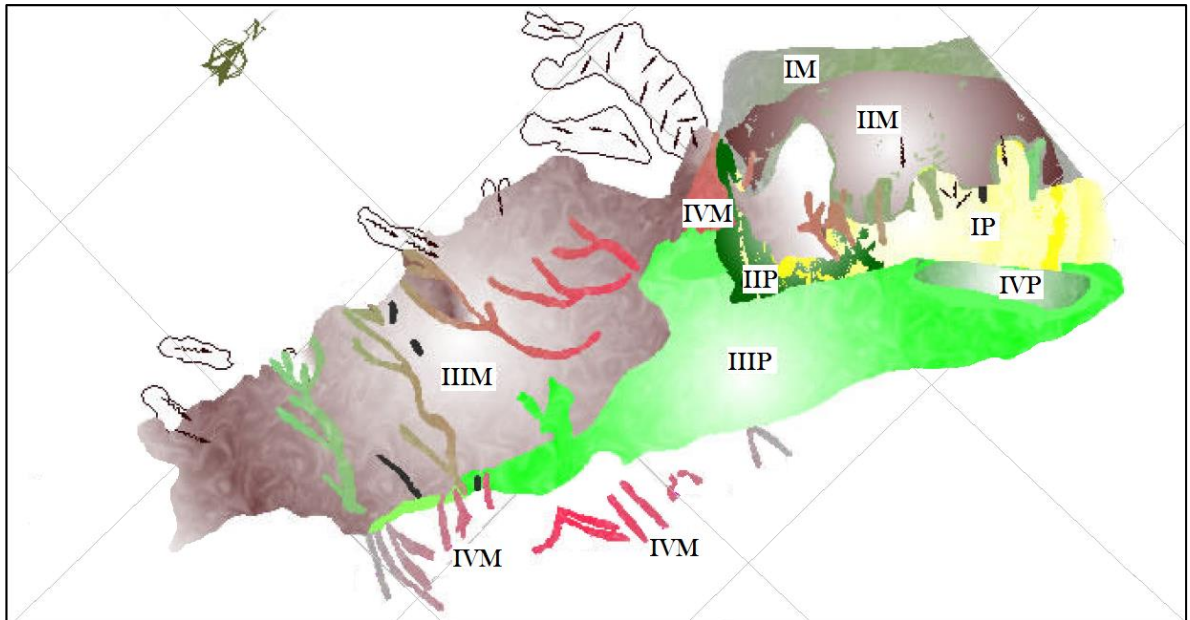
6.2.2. Condiciones Geológicas.

Respecto a los estudios realizados sobre las condiciones geológicas y amenazas sísmicas de la ciudad se observa un gran número de cárcavas en el área urbana, las cuales presentan tamaños relativamente grandes y compuestos por materiales que generan una preocupante susceptibilidad a fenómenos inducidos por sismos. La amenaza más directa reside en el aumento de rellenos antrópicos, que no solo preocupan por su presencia sino por el hecho de que sobre estos se ha venido construyendo (Forero y Pinto, 2011).

En otro estudio realizado por el Instituto Geofísico Universidad Javeriana en el año 2000, se establece la zonificación geotécnica de la ciudad de Tunja (Ver figura 22), en la que particularmente para la zona sur oriente de la ciudad se presentan suelos categorizados

como suelos de baja capacidad portante, inestables y de baja compacidad “IVM” en cuanto a la zona montañosa que se encuentran localizados sobre el eje de las cárcavas.

Figura 22. Zonificación Geotécnica de la ciudad de Tunja.



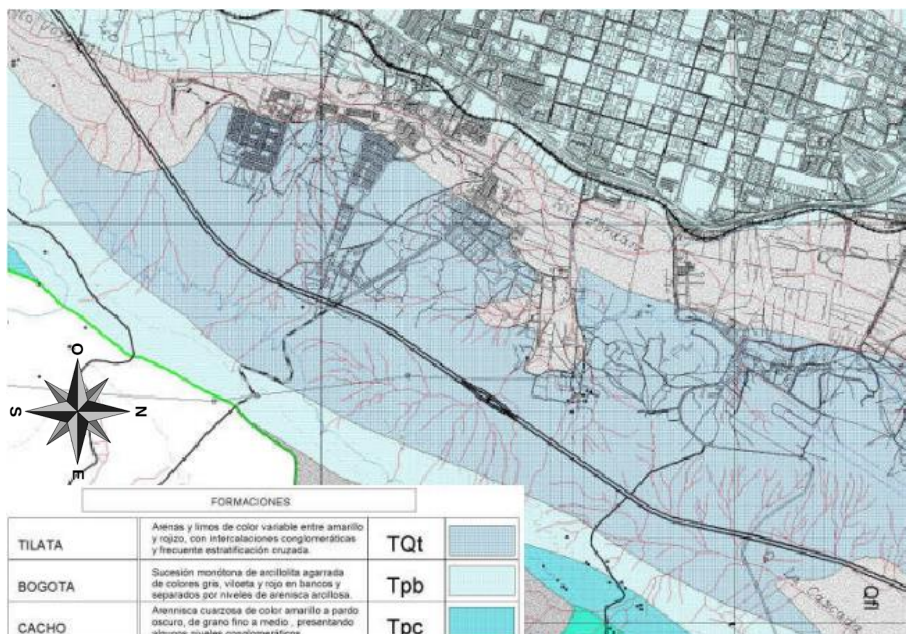
Fuente: Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana.

Debido a lo anterior, se descartan que todos los diseños y estructuras de drenaje pluvial propuestos crucen sobre las zonas identificadas como susceptibles a fenómenos de remoción en masa como lo son las cárcavas de la ciudad (Ver figura 9).

6.2.3. Geología Local de la Ciudad.

La zona de estudio se encuentra localizada sobre la formación Tilatá, que se caracteriza principalmente por presentar un carcavamiento severo y profundo en material arcilloso color blanco y con niveles de cantos rodados de poco diámetro y arenas, presentando un espesor de aproximadamente 70m en el área (Rodriguez, Sanchez y Sainea, 2013). Lo anterior se encuentra plasmado en la figura 23:

Figura 23. Mapa geológico de la ciudad de Tunja zona Sur-Oriental.



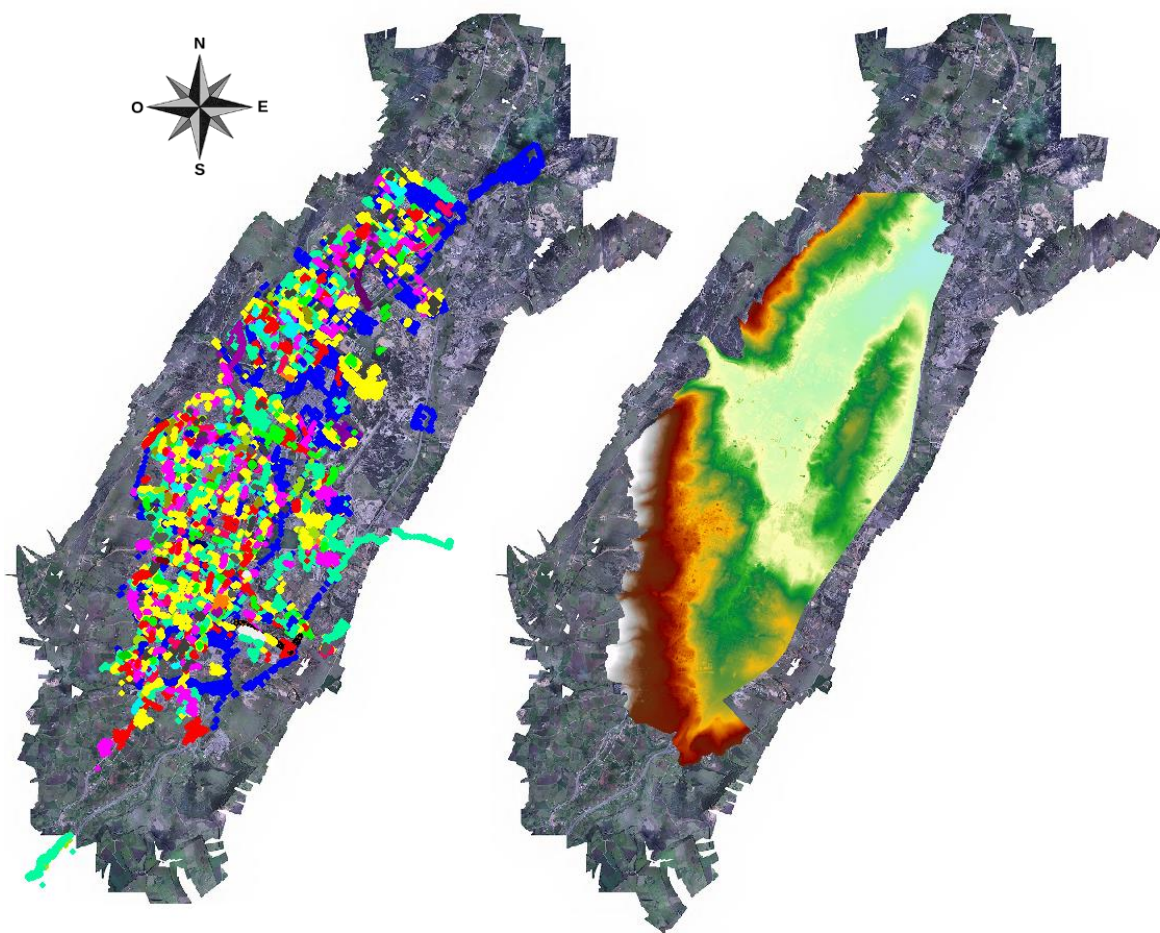
Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial 2000, Ciudad de Tunja.

6.2.4. Estudios topográficos.

En cuanto a información topográfica, la empresa Proactiva Aguas de Tunja, cuenta con un gran volumen de información topográfica en el SIG, alimentada por el área de topografía de la empresa que abarca gran parte de la zona de estudio. Para los lugares que no poseen información topográfica, se cuenta con una orto fotografía y un modelo de elevación digital que abarca la totalidad de la ciudad que aunque posee un pequeño margen de error, es una base que complementa la información topográfica.

En la figura 24, se presenta el mapa con los puntos de color (izquierda), los cuales representan los datos topográficos alimentados por el área de topografía de toda la ciudad, el mapa de la derecha muestra el modelo de elevación digital capturado por un dron.

Figura 24. Información topográfica disponible de la zona de estudio.



Fuente: SIG Proactiva Aguas de Tunja.

6.2.5. Usos de suelo.

Como se menciono anteriormente, la ciudad de Tunja ha estado inmersa en un continuo proceso de urbanizacion a lo largo del tiempo, que debe ser tenido en cuenta para poder determinar los efectos en la escorrentia urbana debido a los cambios de los patrones del suelo. El ordenamiento territorial de la ciudad de Tunja en su más reciente modificación, establece los tratamientos urbanisticos que puede recibir el suelo y se mencionan a continuacion:

6.2.5.1. Tratamientos Urbanísticos.

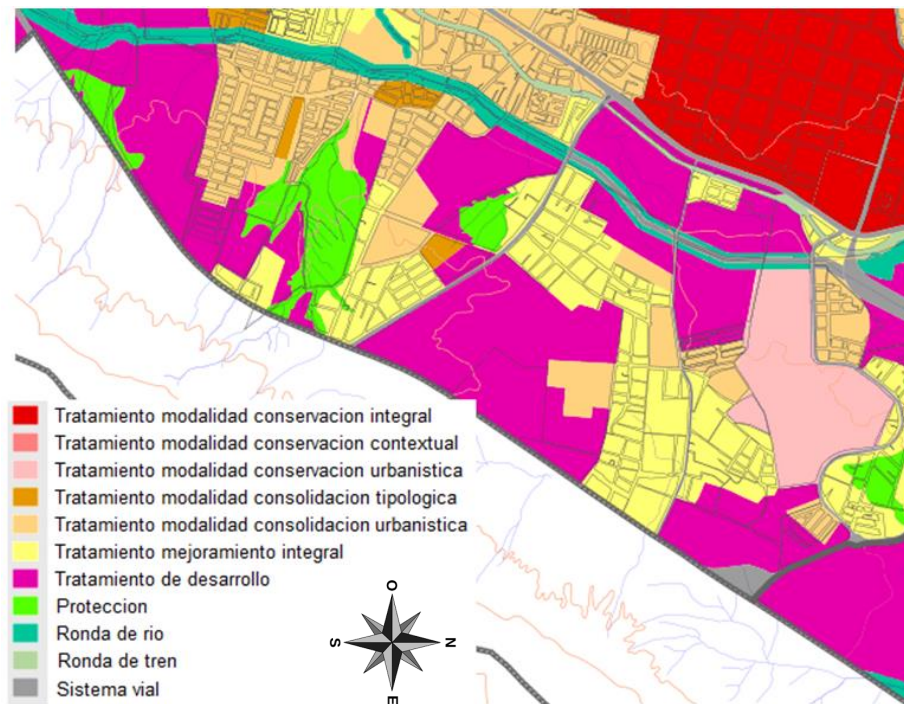
Los tratamientos constituyen las orientaciones para la realización de actuaciones urbanísticas como parcelar, urbanizar o construir, así como para la inversión en espacio público, aplicables a cualquier sector del suelo urbano de acuerdo a criterios de homogeneidad urbana, con el fin de diferenciar los manejos urbanísticos y los derechos y obligaciones de los propietarios (De acuerdo a lo establecido en el decreto 0241 de 2014 Alcaldía de Tunja).

Para la zona suroriental se establecen los siguientes tratamientos, conforme a la figura 25.

6.2.5.1.1. Tratamiento de conservación: Las zonas de tratamiento urbanístico de conservación tienen como objetivo proteger el patrimonio urbanístico y arquitectónico de la ciudad, en la ciudad se refiere al tratamiento aplicado al centro histórico y a edificaciones singulares de especial relevancia urbanística o arquitectónica, este se subdivide a su vez en 4 tipos:

- a) Conservación integral: Corresponde al nivel 1 de intervención definido en el Plan especial de manejo y protección (PEMP), con el mismo alcance y sobre los mismos inmuebles; los mismos valores, el mismo tipo de obra y las mismas instancias competentes.

Figura 25. Tratamientos Urbanísticos.



Fuente: Modificación excepcional del plan de Ordenamiento Territorial 2014, Ciudad de Tunja.

- b) Conservación de tipo arquitectónico: Corresponde al nivel 2 de intervención definido en el PEMP; con el mismo alcance y sobre los mismos inmuebles; los mismos valores y el mismo tipo de obra.

- c) Conservación contextual: Corresponde al nivel 3 de intervención definido en el PEMP, con el mismo alcance y sobre los mismos inmuebles; los mismos valores y el mismo tipo de obra.
- d) Conservación urbanística: Corresponde a las unidades morfológicas con tejidos residenciales o dotacionales de tipo extensivo en donde existe una unidad urbanística homogénea y equilibrada.

6.2.5.1.2. Tratamiento de consolidación: El tratamiento urbanístico de consolidación tiene como objetivo garantizar la permanencia de las cualidades espaciales de ocupación, altura y volumetría; el uso y la función urbana de las piezas, y el aprovechamiento económico que sustenta su localización, los tratamientos de conservación se subdividen en:

- a) Conservación tipológica: Se refiere a las zonas con tejidos residenciales o especializados, con calidad urbanística o en proceso de urbanización, en los cuales se deben mantener esas condiciones y permitir la modernización interna o ampliación moderada de los tipos edificatorios.
- b) Consolidación urbanística; Se aplican en las zonas con tejido medio localizado en torno de los tejidos centrales o en las zonas localizadas en la zona subcentral, en donde la densificación es un instrumento para la permanencia de los usos residenciales y un medio para la consolidación de las cualidades urbanísticas.

6.2.5.1.3. Tratamiento de mejoramiento integral: El tratamiento de mejoramiento integral tiene como objetivo definir las áreas de aplicación y las condiciones urbanísticas, normativas y de gestión, necesarias para su intervención. Una vez superadas las limitaciones urbanísticas las unidades morfológicas con esta asignación de tratamiento se podrán integrar al tratamiento de consolidación, modalidad consolidación urbanística.

6.2.5.1.4. Tratamiento de desarrollo: El tratamiento de desarrollo se refiere a terrenos urbanizables no urbanizados localizados en suelos urbanos y de expansión, con el fin de garantizar su correcta inserción en el modelo de ordenamiento.

6.2.5.1.5. Protección: El tratamiento de protección está destinado a zonas protegidas por diversas ocupaciones cuyo espacio debe ser estrictamente respetado y no admite tratamiento o modificación alguna, incluye las rondas de río.

Solo el 10% aproximadamente del área total de la zona suroriental está contemplada como zona de protección por la MEPOT, es decir que la mayoría de la zona es una zona cuyo tratamiento del suelo permite realizar construcciones que alteren las condiciones de permeabilidad del suelo, generando así aportes de escorrentía que deben recibir su adecuado tratamiento.

Para cada tipo de tratamiento del suelo existe un uso de suelo urbano asignado en el que se reglamenta el tipo de actividad permitida en determinado espacio de suelo, de la siguiente manera:

- a) *Tratamiento modalidad conservación urbanística:* El uso de suelo principal admite actividad residencial, permitiendo vivienda unifamiliar, bifamiliar o trifamiliar, vivienda unifamiliar, bifamiliar o trifamiliares en serie y vivienda unifamiliar en agrupación. Como uso complementario admite locales comerciales que no excedan el 30% de la superficie del piso 1 de cada vivienda.
- b) *Tratamiento modalidad consolidación tipológica:* El uso de suelo principal admite actividad residencial, permitiendo vivienda unifamiliar o bifamiliar, vivienda multifamiliar en serie con zócalo comercial, vivienda unifamiliar en agrupación, vivienda multifamiliar en agrupación y edificio multifamiliar. Como uso complementario admite actividad comercial para la construcción de locales comerciales para el consumo de alimentos y estaciones de servicio en donde existen

a la adopción del POT/Modificación o sobre la malla arterial. Como uso restringido para actividad industrial, admite locales industriales anexos; y bodegas y talleres industriales en donde existían a la aprobación del POT/Modificación. Como uso restringido admite actividad dotacional permitiendo construcciones para el sector de educación, salud y bienestar social cultural de escala local (máx. 2000 m2).

- c) *Tratamiento modalidad consolidación urbanística:* Los usos de suelo principales de esta zona admiten actividades de comercio, industria y dotacional, permitiendo centros comerciales, grandes superficies comerciales, plazas de abastecimientos de mercado, complejos y parques empresariales, plantas industriales, complejos industriales, deporte y esparcimiento, educación, salud, y transporte. Como uso complementario admite actividad comercial para locales para el consumo de alimentos, locales y bodegas comerciales, y servicios de mantenimiento y servitecas. Como uso restringido admite actividad comercial para estaciones de servicio en donde existen a la adopción del POT/Modificación o sobre la malla arterial.
- d) *Tratamiento de mejoramiento integral:* El uso de suelo principal admite actividad residencial, permitiendo vivienda unifamiliar, bifamiliar o trifamiliar y vivienda unifamiliar, bifamiliar o trifamiliar en serie. Como uso complementario admite actividad comercial para construcción de locales para el consumo de alimentos y locales y bodegas comerciales. Como uso restringido admite actividad industrial para locales industriales anexos y bodegas y talleres industriales en los elementos de la malla arterial.
- e) *Tratamiento de desarrollo:* El uso de suelo principal admite actividad residencial, comercial y de servicios, e industrial; permitiendo viviendas VIS (Vivienda de interés social) y VIP (vivienda de interés social prioritaria) que deberán cumplir con las condiciones de áreas mínimas de lote establecidas en el cuadro de tipologías

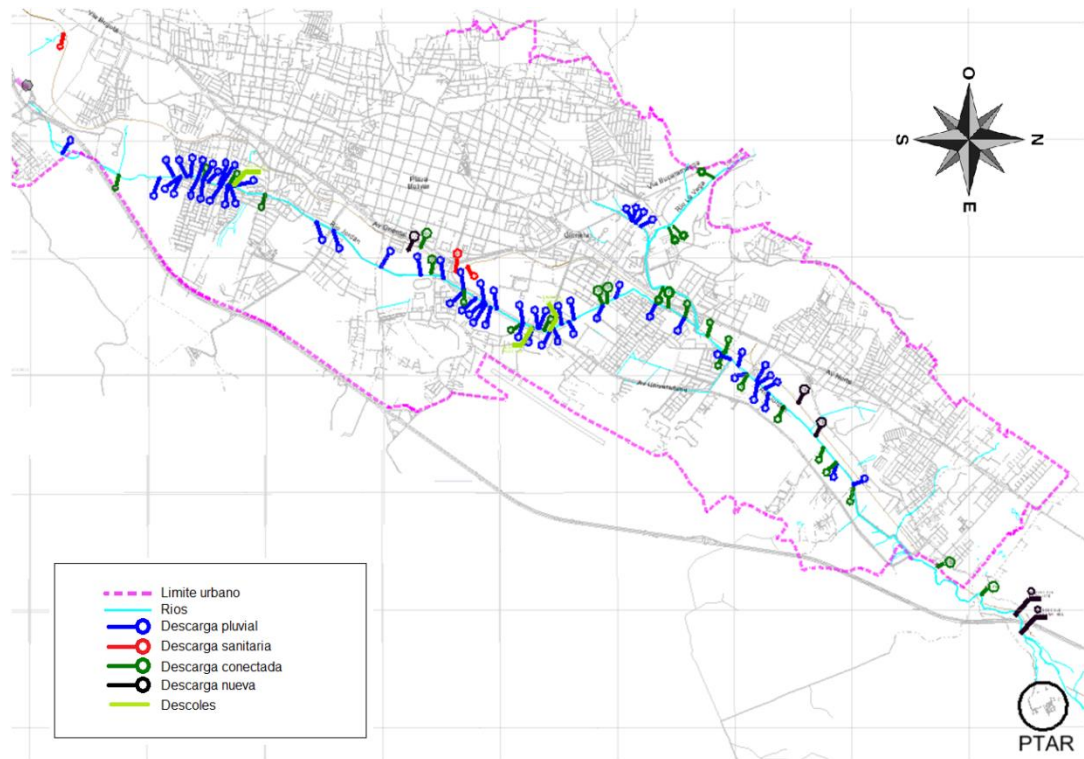
edificatorias de la vivienda del artículo 67 del Decreto Municipal N°. 241 de 2014 para uso residencial. En cuanto a comercio y servicios se puede implantar esta tipología dedicatoria en el tratamiento de desarrollo siempre y cuando cumpla con las condiciones de localización establecida para los diferentes usos comerciales y de servicios establecidos en el cuadro de tipologías edificatorias de los usos comerciales y de servicios descritas en el artículo 67 del Decreto Municipal N°. 241 de 2014. Y el uso industrial se puede localizar en el tratamiento de desarrollo solo como local industrial anexo y cumpliendo las condiciones normativas establecidas en el cuadro de tipologías arquitectónicas de los usos industriales del artículo 67 del Decreto Municipal N°. 241 de 2014. Como uso complementario admite la actividad dotacional siempre y cuando se cumplan las condiciones normativas establecidas en el artículo 60 del Decreto Municipal N°. 241 de 2014.

Adicionalmente a esto, el ordenamiento territorial exige la construcción de zonas verdes para la recreación y espacios comunales, de aproximadamente el 20% de su área neta construible para todos los usos de suelo excepto el dotacionales. En usos dotacionales esta área debe ser del 8%. Esto representa cambios en el porcentaje de permeabilidad que solicita SWMM como parámetro para la modelación.

6.2.6. Análisis del sitio de vertimiento.

Actualmente el cuerpo receptor de aguas pluviales de la ciudad de Tunja es el río Jordán debido a la conformación geomorfológica de la ciudad. De acuerdo al PSMV al mes de septiembre del año 2016 el río Jordán contaba con 58 descargas pluviales distribuidas a lo largo del eje del río como se observa en la figura 26:

Figura 26. Vertimientos al Río Jordán en la ciudad de Tunja, año 2016.



Fuente: Proactiva Aguas de Tunja.

6.2.7. Descripción de los Sistemas e Infraestructura Existentes.

La ciudad está dispuesta de diferentes estructuras de paso (Box Culvert) a lo largo de la doble calzada, cuyo fin es transitar el cauce de las aguas pluviales localizadas hacia el oriente ya que la conformación geomorfológica sinclinal de la ciudad tiende a drenar el agua de las laderas hacia el eje central de la ciudad que es el río Jordán.

Con el fin de realizar un aprovechamiento de los box culvert y demás estructuras de paso, fue necesario realizar un recorrido por la zona de la doble calzada, en el que se realizaron

mediciones de diámetros y longitudes para así evaluar sus capacidades hidráulicas en la modelación. De las diferentes visitas a campo, se concluyó que las diferentes estructuras se encuentran en buen estado, y pueden utilizadas en el modelo junto con las soluciones y diseños que se planteen.

Para los sumideros y estructuras encargadas de la captación de aguas o corrientes superficiales generada en las vías, también se realizó un reconocimiento en campo en el que se evaluó únicamente el estado de los principales sumideros localizados en puntos críticos que presentan antecedentes de inundaciones.

6.3. Diseño de tormentas.

Para introducir los valores de los eventos de precipitación, SWMM dispone de 3 diferentes formatos “Intensity” o histogramas, que son valores medios de la intensidad medidos en mm/h, “Volume” o pluviograma que representa el volumen lluvia recogido durante un intervalo registrado en mm o pulgadas, o “Cumulative” o pluviograma acumulado que representa la precipitación acumulada recogida desde el inicio de la lluvia en mm o pulgadas. Para la ciudad de Tunja se cuenta oficialmente con información de curvas IDF suministradas por el IDEAM (Ver figura 27), en las que se remplazaron los valores de determinado periodo de retorno por un hietograma mediante el método de bloques alternos (Alternating Block Method, Chow et al. 1994). El RAS 2015-Título D, recomienda en su apartado 4.3.2 criterios para definir los periodos de retorno para el diseño de eventos de precipitación de acuerdo a las características del área de drenaje. Para la ciudad, que presenta tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 ha, se recomienda un periodo de 5 años.

Una vez seleccionado el periodo de retorno, se definieron las duraciones de los eventos de precipitación de acuerdo al análisis de las precipitaciones horarias realizado por el IDEAM, en el que se establecieron las horas consecutivas con mayor precipitación y las horas y meses en que se presentan con mayor frecuencia los eventos de precipitación en la ciudad.

De acuerdo a la figura 11 que contiene el cuadro de horas consecutivas con mayor precipitación en la ciudad de Tunja, se determina que los meses más lluviosos son abril y octubre y que las horas de lluvias más frecuentes se dan en las noches, la información de intensidad de precipitación suministrada en el gráfico, se encuentra desactualizada debido a los años que fueron analizados para su realización y que no comprende un ajuste del cambio climático global. Sin embargo constituye una buena base para analizar el comportamiento de la precipitación (más no la intensidad) en la ciudad debido a la cantidad de años históricos analizados.

En la tabla 6, se presenta el cuadro de horas consecutivas con mayor precipitación, en el que se relacionan los periodos de 1, 3 y 6 horas con su respectivo porcentaje. Debido a la poca variación entre los periodos, se concluye que en la ciudad se presentan los 3 tipos de tormentas con igual frecuencia; caso opuesto a otras ciudades del país como Bogotá en la que las tormentas suelen caer en periodos cortos (1hora) y presentarse con mayor intensidad, lo que ocasiona el colapso de la red pluvial. Por tanto para el estudio de caso de Tunja se analizaron las 3 duraciones de tormentas para diferentes valores totales de precipitación de acuerdo al análisis del cambio climático.

Tabla 6. Intervalos consecutivos con mayor frecuencia de lluvia de la ciudad de Tunja.

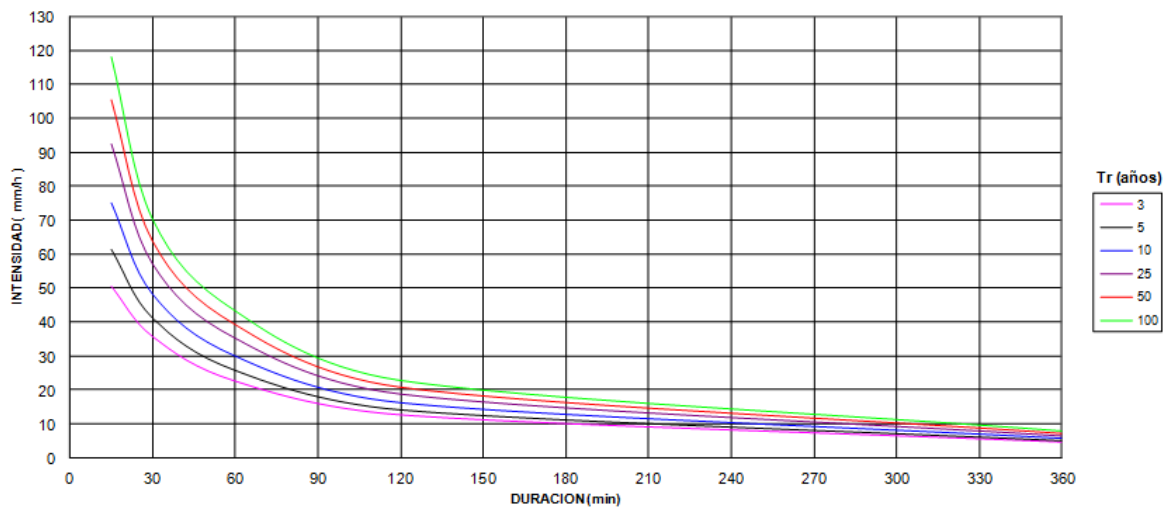
HORAS	% 6 H	% 3 H	% 1 H
15:00	6		
16:00	6.6		
17:00	6.9	6.9	
18:00	6.9	6.9	6.9
19:00	6.7	6.7	
20:00	6.1		
TOTAL	39.2	20.4	6.9

Fuente: IDEAM.

6.3.1. Cálculo de Hietogramas.

Con los valores de un periodo de retorno de 5 años de las curvas IDF mostradas en la figura 27. Se obtuvieron los valores de la intensidad expresados cada 15 minutos en un intervalo total de 6 horas. Para los valores de los intervalos en los que no hay registros se realizó una interpolación lineal, y se calculó el valor total de precipitación en cada intervalo como se observa en la tabla 8.

Figura 27. Curvas IDF estación UPTC Tunja.



Fuente: IDEAM.

Tabla 7. Relaciones de intensidad-duración-frecuencia.

DURACION	PERIODO DE RETORNO (años).					
Minutos	3	5	10	25	50	100
15	50.3	61.3	75.0	92.3	105.2	118.0
30	35.5	41.1	48.1	57.0	63.6	70.1
60	22.4	25.7	29.9	35.2	39.1	43.1
120	12.5	14.1	16.2	18.8	20.7	22.6
360	4.5	5.0	5.7	6.5	7.1	7.7

Fuente: IDEAM.

Tabla 8. Valores de precipitación para tormenta de 6 horas- Periodo de retorno de 5 años.

Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	I (mm/h)	P (mm)= t * I	I ΔP I
15	0.25	61.3	15.33	15.325
30	0.5	41.1	20.55	5.225
45	0.75	33.4	25.05	4.500
60	1	25.7	25.70	0.650
75	1.25	22.8	28.50	2.800
90	1.5	19.9	29.85	1.350
105	1.75	17	29.75	0.100
120	2	14.1	28.20	1.550
135	2.25	13.53	30.45	2.245
150	2.5	12.96	32.41	1.961
165	2.75	12.39	34.08	1.677
180	3	11.83	35.48	1.392
195	3.25	11.26	36.58	1.108
210	3.5	10.69	37.41	0.823
225	3.75	10.12	37.95	0.539
240	4	9.55	38.20	0.255
255	4.25	8.98	38.17	0.030
270	4.5	8.41	37.86	0.314
285	4.75	7.84	37.26	0.598
300	5	7.28	36.38	0.883
315	5.25	6.71	35.21	1.167
330	5.5	6.14	33.76	1.452
345	5.75	5.57	32.02	1.736
360	6	5.0	30.00	2.020
P total (mm)				49.700

Fuente: Autor.

En seguida se realizó un ajuste de los valores de la precipitación siguiendo 2 pasos. El primero consistió en realizar un ajuste al valor máximo histórico de lluvia presentado en 20 años que corresponde a un valor de precipitación total de 56.4 mm y obedece a la lluvia presentada el 22 de Abril de 2012, que tuvo como consecuencias fuertes daños en el sector

norte de la ciudad causando el colapso del puente peatonal de la UPTC y grandes pérdidas materiales por la magnitud de las inundaciones, de la siguiente manera:

Tabla 9. Corrección de hietograma.

Intensidad curva IDF IDEAM			Intensidad corregida			
Valor de precipitación de 49.7 mm			Lluvia máxima histórica: 56.4 mm			
Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	I ΔP I	% Variación	Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	P corregida
15	0.25	0.10	0.00	15	0.25	0.11
30	0.5	0.31	0.01	30	0.5	0.36
45	0.75	0.60	0.01	45	0.75	0.68
60	1	0.82	0.02	60	1	0.93
75	1.25	1.11	0.02	75	1.25	1.26
90	1.5	1.35	0.03	90	1.5	1.53
105	1.75	1.45	0.03	105	1.75	1.65
120	2	1.68	0.03	120	2	1.90
135	2.25	1.96	0.04	135	2.25	2.23
150	2.5	2.25	0.05	150	2.5	2.55
165	2.75	4.50	0.09	165	2.75	5.11
180	3	15.33	0.31	180	3	17.39
195	3.25	5.23	0.11	195	3.25	5.93
210	3.5	2.80	0.06	210	3.5	3.18
225	3.75	2.02	0.04	225	3.75	2.29
240	4	1.74	0.03	240	4	1.97
255	4.25	1.55	0.03	255	4.25	1.76
270	4.5	1.39	0.03	270	4.5	1.58
285	4.75	1.17	0.02	285	4.75	1.32
300	5	0.88	0.02	300	5	1.00
315	5.25	0.65	0.01	315	5.25	0.74
330	5.5	0.54	0.01	330	5.5	0.61
345	5.75	0.25	0.01	345	5.75	0.29
360	6	0.03	0.00	360	6	0.03
Total (mm)		49.70	100%	Total (mm)		56.4

Fuente: Autor.

El segundo paso consistió en realizar un ajuste a la lluvia de 56.4 mm resumido en la tabla 10, de acuerdo a los escenarios de cambio climático global suministrados por el IDEAM, que aunque el RAS sugiere no hacerlo, pone en consideración y a criterio del diseñador tener en cuenta un margen de seguridad lo suficientemente robusto haciendo uso de la información brindada por el IDEAM. Para esto se tuvo en cuenta que los sistemas de recolección y evacuación de aguas lluvia deben proyectarse para 30 años para el caso de Tunja (RAS 2015-Título D, Numeral 2.3.1), y que se estima que para los mismos 30 años el aumento de la precipitación en la ciudad de Tunja sea de aproximadamente el 14 % (Tercera comunicación nacional de cambio climático, IDEAM 2015).

Tabla 10. Primer escenario de precipitación.

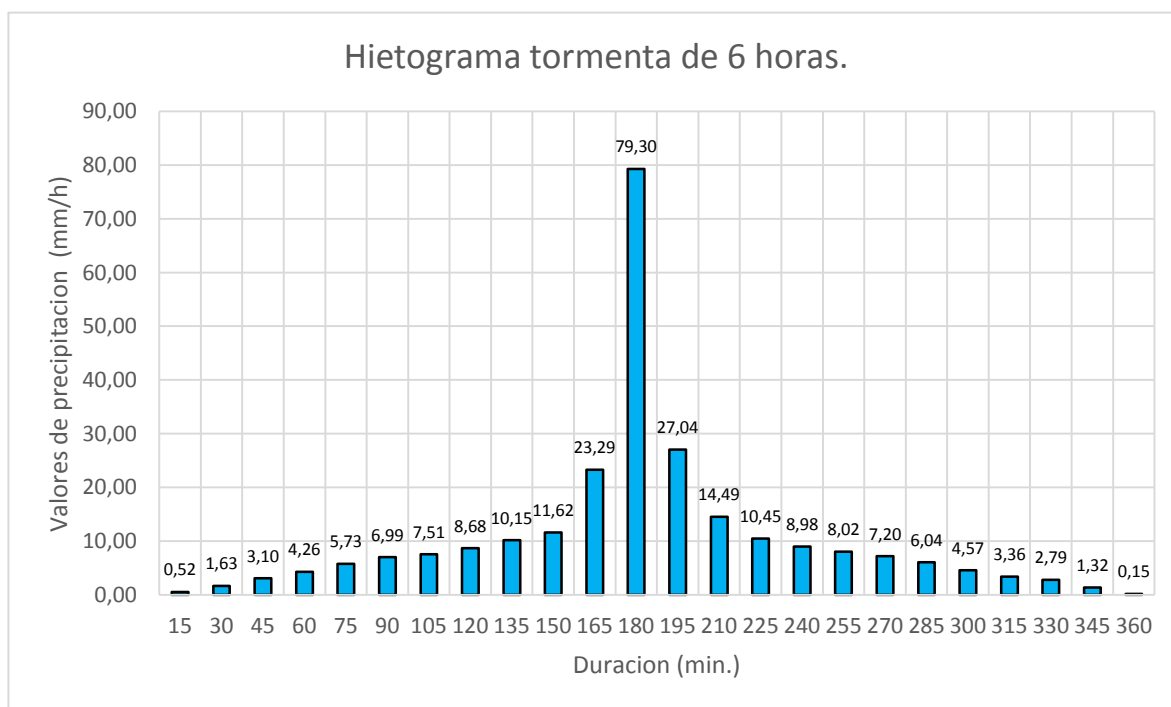
Intensidad corregida			Intensidad corregida para el escenario de cambio de precipitación de + 14%			
Valor de precipitación de 56.4 mm						
Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	I ΔP I	% Variación	Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	P corregida
15	0.25	0.11	1.14	15	0.25	0.13
30	0.5	0.36	1.14	30	0.5	0.41
45	0.75	0.68	1.14	45	0.75	0.77
60	1	0.93	1.14	60	1	1.07
75	1.25	1.26	1.14	75	1.25	1.43
90	1.5	1.53	1.14	90	1.5	1.75
105	1.75	1.65	1.14	105	1.75	1.88
120	2	1.90	1.14	120	2	2.17
135	2.25	2.23	1.14	135	2.25	2.54
150	2.5	2.55	1.14	150	2.5	2.90
165	2.75	5.11	1.14	165	2.75	5.82
180	3	17.39	1.14	180	3	19.83
195	3.25	5.93	1.14	195	3.25	6.76
210	3.5	3.18	1.14	210	3.5	3.62
225	3.75	2.29	1.14	225	3.75	2.61
240	4	1.97	1.14	240	4	2.25
255	4.25	1.76	1.14	255	4.25	2.01
270	4.5	1.58	1.14	270	4.5	1.80
285	4.75	1.32	1.14	285	4.75	1.51

300	5	1.00	1.14	300	5	1.14
315	5.25	0.74	1.14	315	5.25	0.84
330	5.5	0.61	1.14	330	5.5	0.70
345	5.75	0.29	1.14	345	5.75	0.33
360	6	0.03	1.14	360	6	0.04
Total (mm)		56.40		Total (mm)		64.30

Fuente: Autor.

En seguida se realizó la distribución por el método de Bloques Alternos, de tal manera que en el centro se ubica la precipitación registrada en los 15 minutos más lluviosos. A su derecha, se ubica la precipitación registrada en el 2° intervalo más lluvioso. A la izquierda, la registrada en el 3° intervalo más lluvioso, a la derecha el 4°, etc. Como se observa en la figura 28.

Figura 28. Hietograma para SWMM con una tormenta de 6 horas.



Fuente: Autor.

Como se mencionó anteriormente y debido a las características de precipitación de la ciudad de Tunja, se realizó un análisis para las 3 duraciones típicas de tormentas de la ciudad (6 horas, 3 horas y 1 hora).

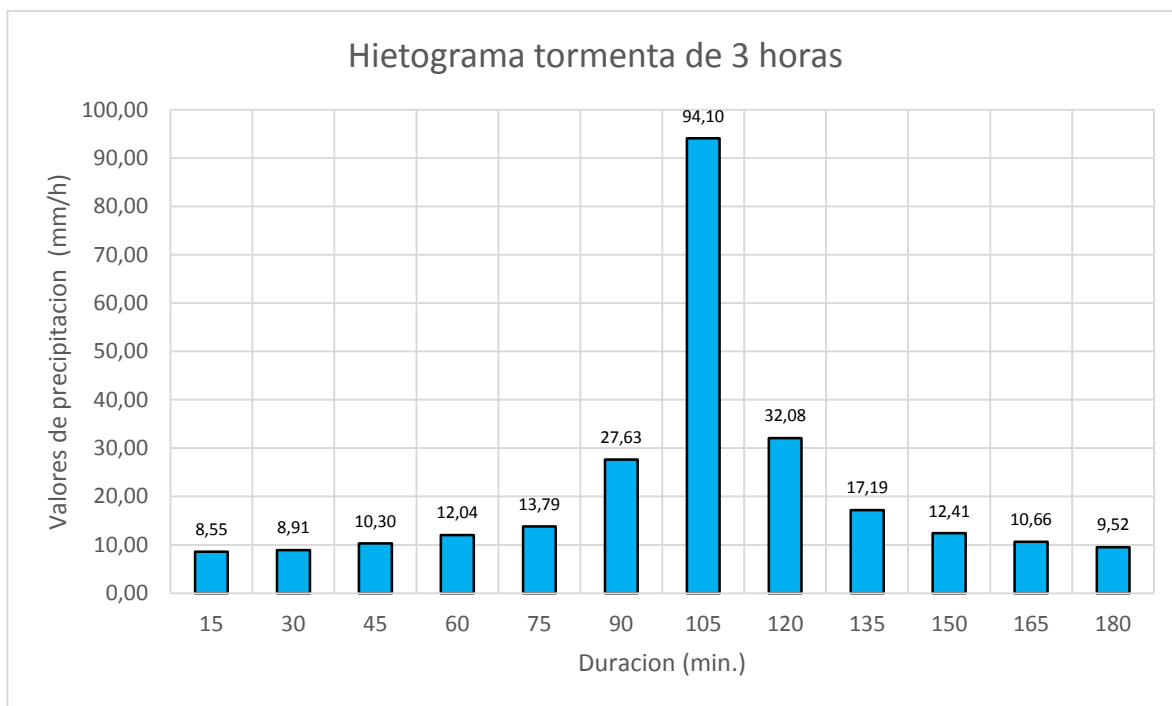
Como el valor estimado de la precipitación será de 64.3 mm, se distribuirá de tal manera que se planteen 3 escenarios diferentes, el primero, un valor de 64.3 mm precipitado para una tormenta de 6 horas (Tabla 10, Figura 28), el segundo el mismo valor precipitado pero para una tormenta de 3 horas (Tabla 11, Figura 29) y el tercero igual valor precipitado para una tormenta de solo 1 hora (Tabla 12, Figura 30).

Tabla 11. Segundo escenario de precipitación.

Intensidad para lluvia de 3 horas			Intensidad corregida para el escenario de cambio de precipitación de + 14%			
Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	I ΔP I	% Variación	Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	P corregida
15	0.25	1.58	0.03	15	0.25	2.14
30	0.5	1.65	0.03	30	0.5	2.23
45	0.75	1.90	0.04	45	0.75	2.57
60	1	2.23	0.05	60	1	3.01
75	1.25	2.55	0.05	75	1.25	3.45
90	1.5	5.11	0.11	90	1.5	6.91
105	1.75	17.39	0.37	105	1.75	23.53
120	2	5.93	0.12	120	2	8.02
135	2.25	3.18	0.07	135	2.25	4.30
150	2.5	2.29	0.05	150	2.5	3.10
165	2.75	1.97	0.04	165	2.75	2.66
180	3	1.76	0.04	180	3	2.38
Total (mm)		47.53	100%	Total (mm)		64.30

Fuente: Autor.

Figura 29. Hietograma para SWMM del segundo escenario de precipitación.



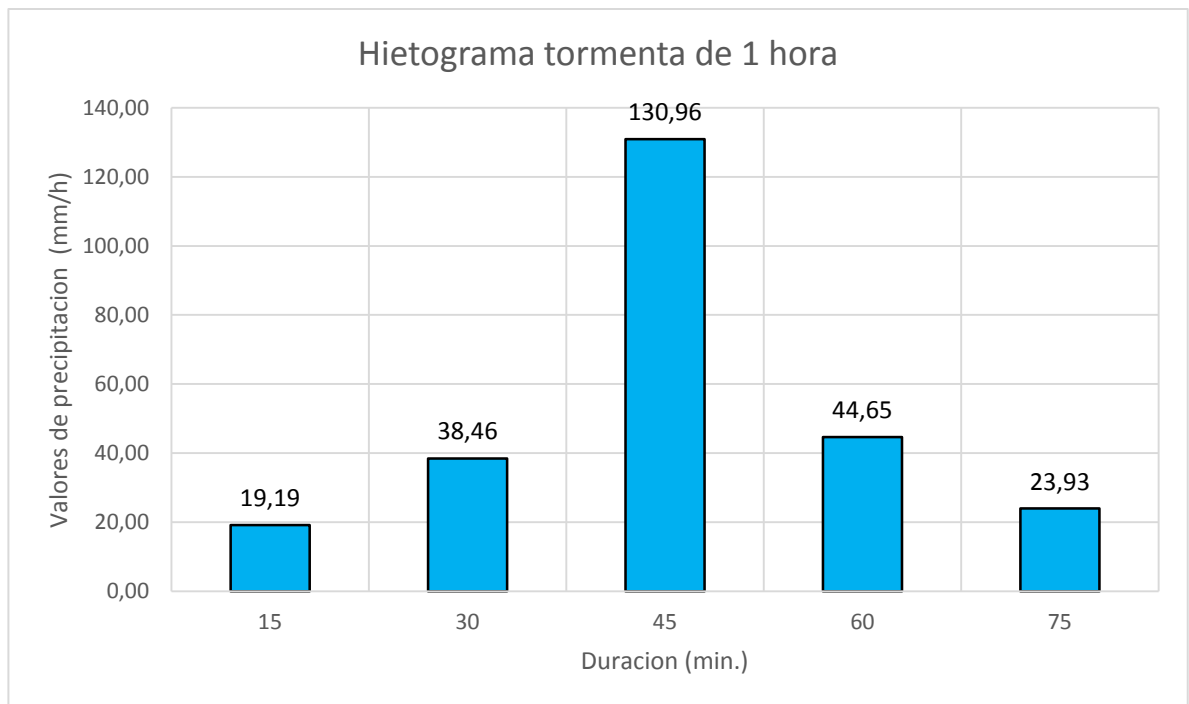
Fuente: Autor.

Tabla 12. Tercer escenario de precipitación.

Intensidad para lluvia de 1 hora			Intensidad corregida para el escenario de cambio de precipitación de + 14%			
Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	I AP I	% Variación	Duración (t) en min.	Duración (t) en h.	P corregida
15	0.25	2.55	0.07	15	0.25	4.80
30	0.5	5.11	0.15	30	0.5	9.61
45	0.75	17.39	0.51	45	0.75	32.74
60	1	5.93	0.17	60	1	11.16
75	1.25	3.18	0.09	75	1.25	5.98
Total (mm)		34.15	100%	Total (mm)		64.30

Fuente: Autor.

Figura 30. Hietograma para SWMM del tercer escenario de precipitación.



Fuente: Autor.

Al introducir los valores de los hietogramas SWMM interpreta que el valor de la lluvia introducida es constante a lo largo del intervalo especificado, para el resto de tipos de series temporales SWMM realiza una interpolación que permite estimar los valores en instantes de tiempo intermedios a los introducidos.

6.4. Resultados de la modelación en SWMM.

Los criterios mediante los cuales fueron definidos las subcuencas, estan basados de acuerdo a la base predial de la ciudad de Tunja, asi se trató de analizar al detalle cada predio de acuerdo al punto de descarga o conexión pluvial de acuerdo a los liniamientos del area de Desarrollo Urbano de la empresa Proactiva Aguas de Tunja y tambien se definieron bajo criterios de su tratamiento de suelo respectivo de acuerdo al ordenamiento territorial de la ciudad. El resumen de las propiedades de las subcuencas del distrito se encuentra en el Anexo 11.2. Resumen de Parametros del Modelo.

Dentro de los parámetros típicos de la modelación se encuentran los siguientes:

Tabla 13. Parámetros típicos de la zona de estudio.

Parámetro	Características
Tipo de suelo (Para el modelo de infiltración)	Formación geológica con presencia en su mayoría de Arcillas y arenas.
Tipo de suelo (condiciones superficiales)	Área urbana típica. Con áreas impermeables típicas de hormigón (Coef. manning $n=0.012$) y áreas permeables típicas de hierba corta (Coef. manning $n=0.15$).
Rango de altura medio de la zona de la modelación	2700 m.s.n.m. a 2774 m.s.n.m.
Material de las tuberías	PVC con una rugosidad Manning (n) de 0.008.
Conformación típica de la ciudad	Ciudad que posee una arquitectura y urbanismo colonial, cuyas calles están formadas de calles y carreras con un tamaño de manzanas aproximado de 120 m.
Índice de ocupación de acuerdo al ordenamiento	80 % de Ocupación posible en todos los usos de suelo, excepto el uso dotacional que permite el 92 %.
Secciones típicas de los conductos.	Tuberías con geometría típica circular.

Secciones típicas de box	Box culvert con geometría típica rectangulares.
Rango de pendientes de las áreas	Pendientes entre 0.5-11 con una media aproximada de pendientes de 2 %.
Rango de pendientes de tuberías	Pendientes entre 0.29% y 10%.

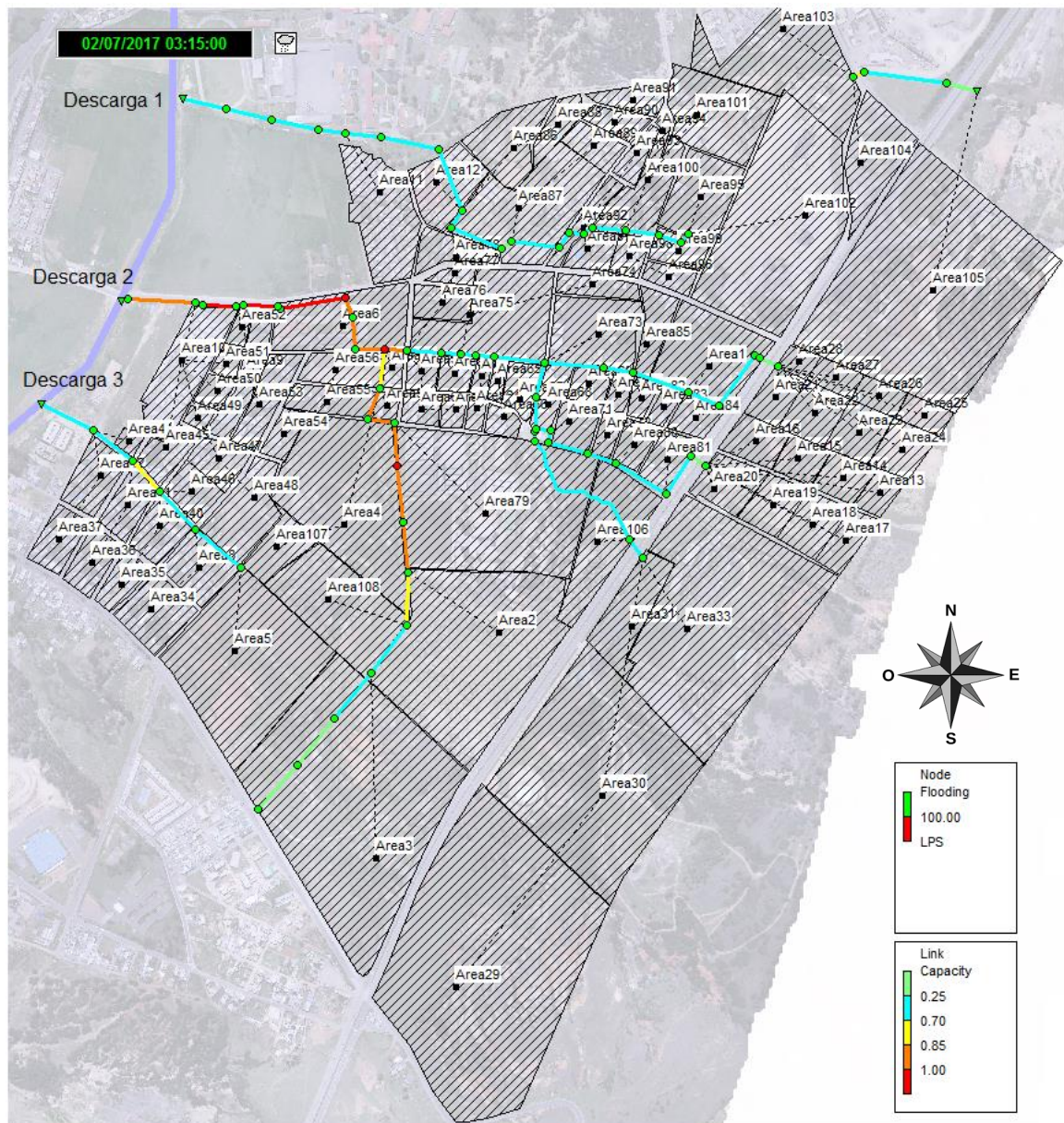
Fuente: Autor.

La información al detalle de cada elemento implementado en el modelo (Pozos, Subcuencas y tuberías) se encuentra en el Anexo 11.2. Resumen de Parametros del Modelo.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de los diferentes escenarios de la modelación (Figuras 31, 33 y 35). Se evaluó como parámetro principal la profundidad hidráulica en las tuberías y capacidad de los pozos en la hora pico (3 h para el primer escenario, 2h para el segundo y 1h para el primer escenario) donde más se producen lluvias para determinar si se producen inundaciones.

Los valores denominados “*Link Capacity*” de 25%, 70%, 85% y 100% corresponden a la profundidad hidráulica de las tuberías y están representados por un color, siendo 85% el valor máximo permitido por el RAS 2015 (Titulo D, numeral 3.3.8). De igual manera la capacidad de los pozos “*Node flooding*” está representada por colores, siendo el color rojo el valor límite correspondiente al 100% de la capacidad del pozo. El distrito se caracteriza por tener tramos antiguos y tramos nuevos que se planean construir, como se observa en la figura 38. Además, la disposición de agua de escorrentía se descarga en 3 colectores pluviales principales que descargan al río diferentes puntos, y los valores totales calculados de escorrentía se representarán como el caudal que descarga cada uno de ellos al río Jordán. La descarga número 4 no fue analizada debido a que esta fuera del límite urbano, y no descarga sobre el Río Jordán.

Figura 31. Primer Escenario de precipitación a las 3:15 minutos de la tormenta.



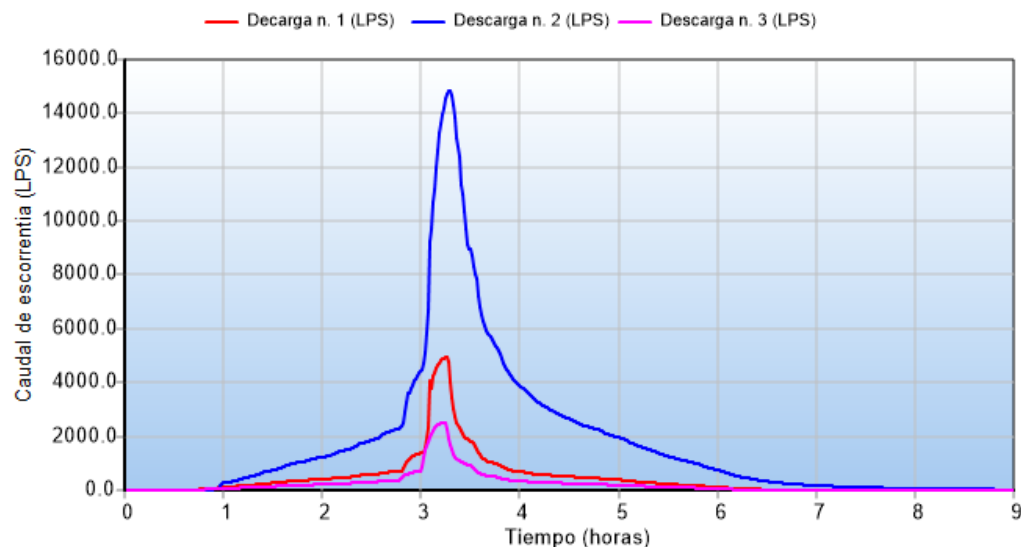
Fuente: Autor.

En el primer escenario se observa que las de tuberías planteadas y ciertos tramos de las actuales no cumplen con los parámetros normativos del RAS respecto a la profundidad hidráulica de los colectores y en ciertos pozos se sobrepasa la capacidad total del 100%, lo

que se asocia con inundaciones en el área. Esto demuestra que las redes antiguas y algunas de las propuestas, no están en condiciones de soportar las características del primer escenario de precipitación.

En la figura 32 se observa el comportamiento del caudal de escorrentía que pasa por los 3 vertidos o descargas a diferentes horas de la modelación, presentándose los caudales pico a la 3 horas y 20 minutos aproximadamente del evento de precipitación. La descarga numero 1 presenta un caudal pico de 4945.27 LPS, la descarga 2 un caudal pico de 14865.64 LPS y la descarga 3, un caudal pico de 2531.41 LPS.

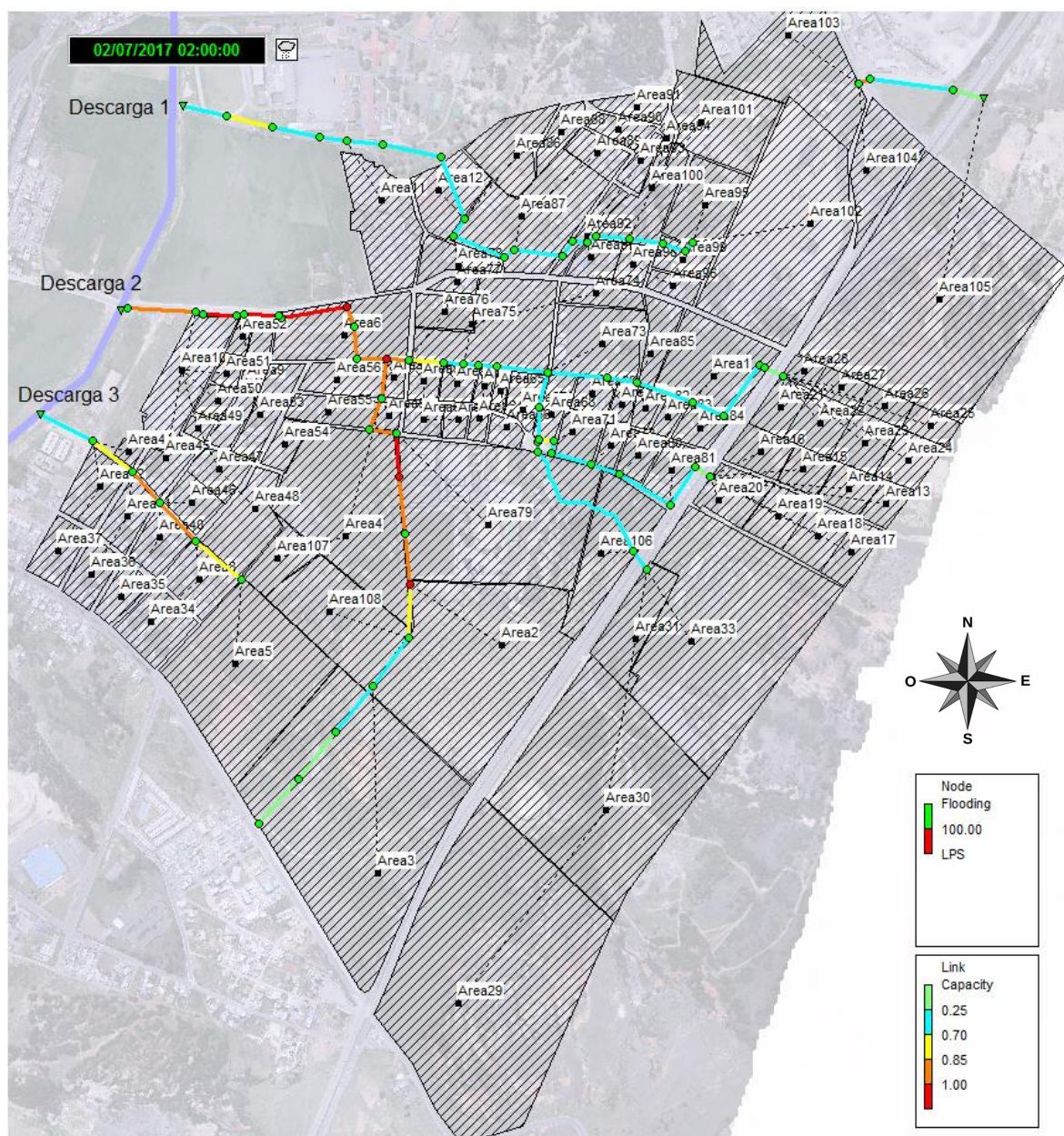
Figura 32. Caudales de escorrentía en las descargas al Rio para el 1 evento de precipitación.



Fuente: Autor.

El volumen total de aportes de escorrentía es de 14074 m³ para la descarga numero 1, 57205 m³ para la descarga numero 2 y 7214 m³ para la descarga numero 3. Aportando un caudal total al rio Jordán de 78493 m³. La saturación de pozos y tuberías produciría un caudal de escorrentía que fluiría por las calles de aproximadamente 1990 m³.

Figura 33. Segundo Escenario de precipitación a las 2:00 de la tormenta.

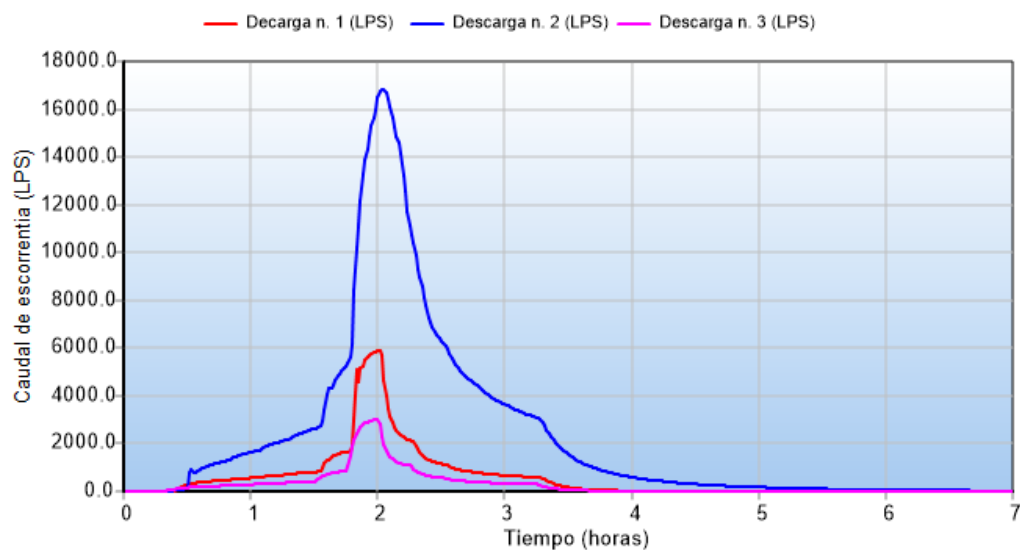


Fuente: Autor.

En el segundo escenario, que corresponde a la misma cantidad de lluvia en menor tiempo, se observa que la profundidad hidráulica de las tuberías va aumentando, al igual que la

capacidad máxima de más pozos. En la figura 34 se observa el comportamiento del caudal de escorrentía que pasa por los 3 vertidos o descargas a diferentes horas de la modelación, presentándose los caudales pico aproximadamente a las 2 horas del evento de precipitación aproximadamente, la descarga 1 presenta un caudal pico de 5887.88 LPS, la descarga 2 un caudal pico de 16812.75 LPS y la descarga 3 un caudal pico de 3002.34 LPS.

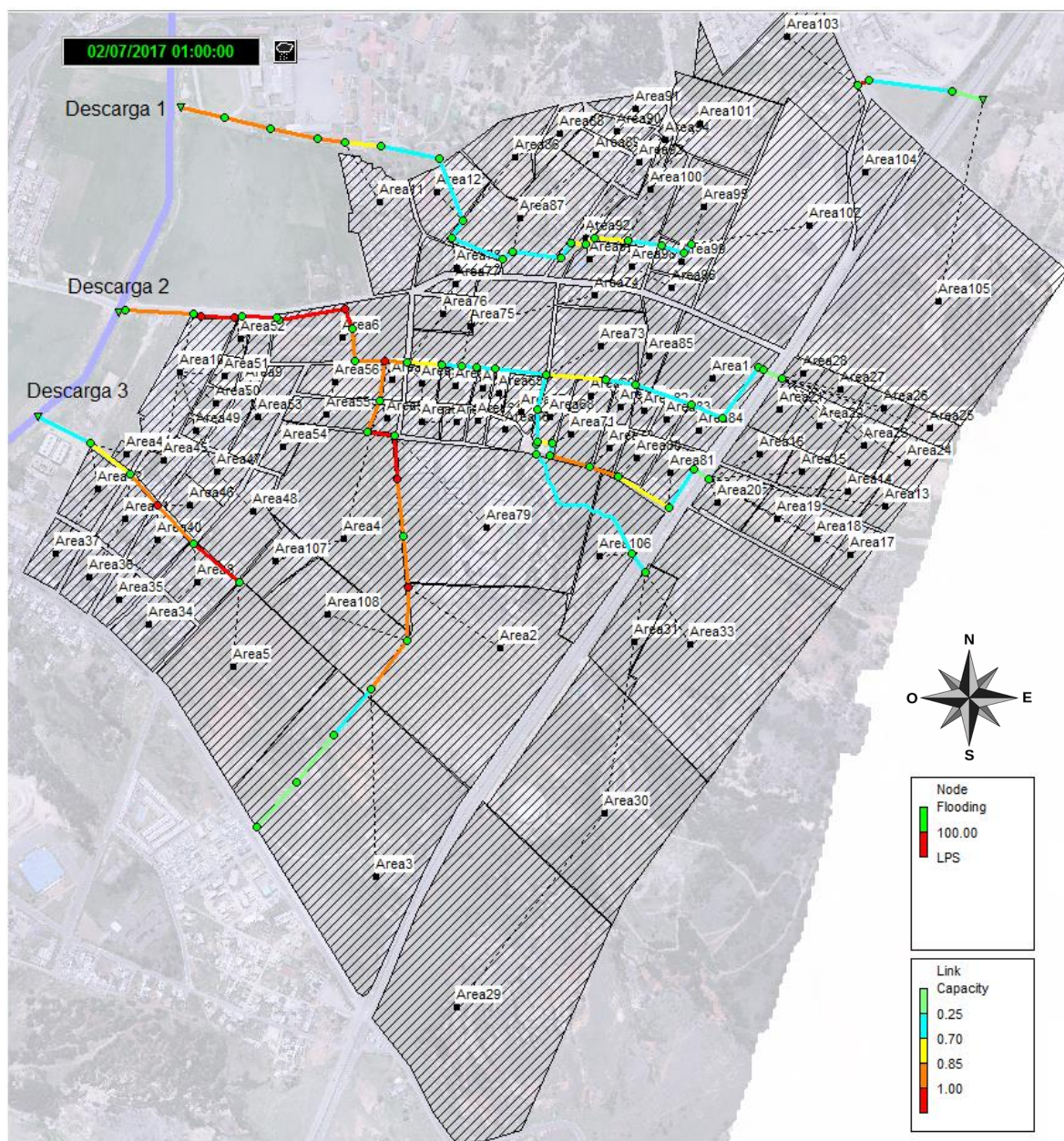
Figura 34. Caudales de escorrentía en las descargas al Rio Jordán para el 2 evento de precipitación.



Fuente: Autor.

El volumen total de aportes de escorrentía es de 14192 m³ para la descarga número 1, 57998 m³ para la descarga número 2 y 7275 m³ para la descarga número 3. Aportando un caudal total al rio Jordán de 79465 m³. Y un caudal de aproximadamente 8721 m³ correspondiente al caudal que rebosaría del sistema por la saturación de pozos y tuberías.

Figura 35. Tercer Escenario de precipitación a 1 hora de la tormenta.

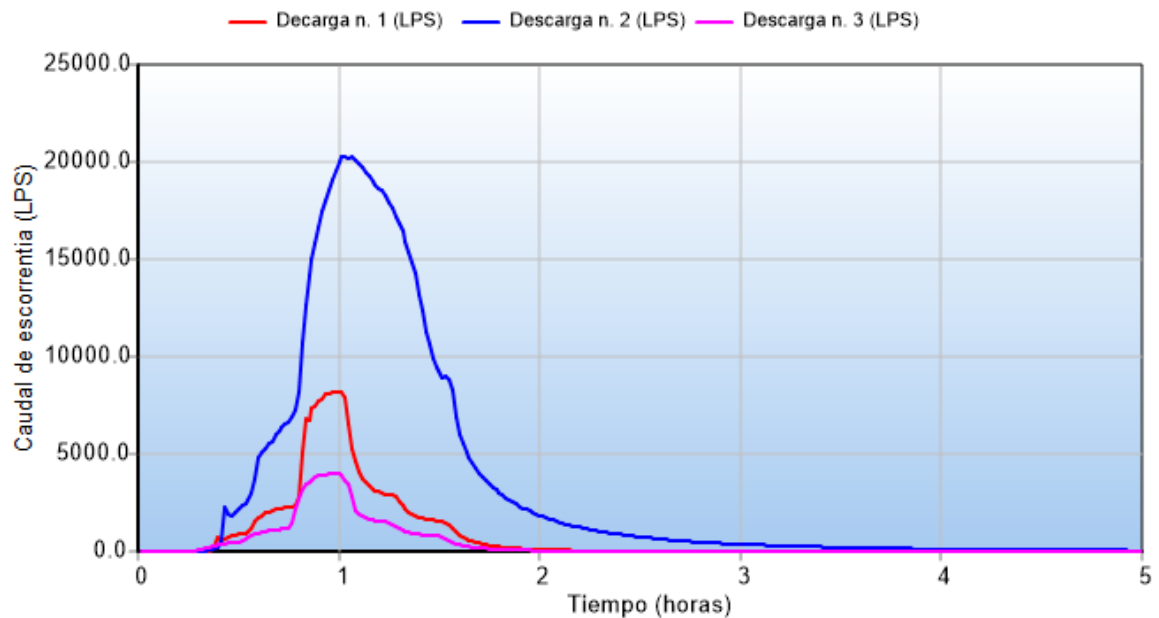


Fuente: Autor.

En el escenario más fuerte, se observa que la profundidad hidráulica de 28 tramos está por encima del 85%, lo que significa que probablemente se producirán inundaciones en

diferentes puntos del distrito para ese escenario de lluvia. En la figura 36 se observa el comportamiento del caudal de escorrentía que pasa por los 3 vertidos o descargas a diferentes horas de la modelación, presentándose los caudales pico a la hora del evento de precipitación aproximadamente, la descarga 1 presenta un caudal pico de 8225.49 LPS, la descarga 2 un caudal de 20285.8 LPS y la descarga 3 un caudal pico de 4039.29 LPS.

Figura 36. Caudales de escorrentía en las descargas al Rio para el 3 evento de precipitación.



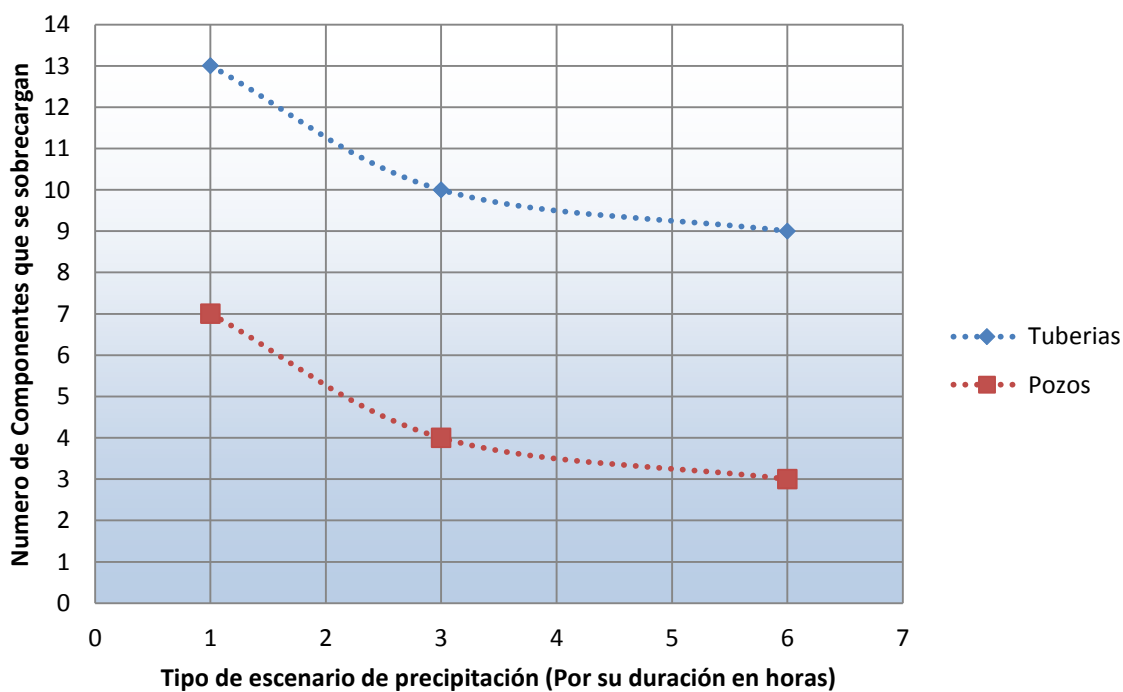
Fuente: Autor.

El volumen total de aportes de escorrentía es de 14472 m³ para la descarga número 1, 59610 m³ para la descarga número 2 y 7425 m³ para la descarga número 3. Aportando un caudal total al río Jordán de 81507 m³. Cuando las tuberías y los pozos se saturan, producen un caudal de aproximadamente 19000 m³ que correspondería al caudal que rebosaría del sistema pluvial y fluiría por las calles.

La modelación demuestra que el distrito no cumple con los parámetros normativos, cuando se evalúa su respuesta a las variaciones del cambio climático y demuestra que ciertas partes de la ciudad no se encuentran preparadas para estos eventos de precipitación.

A medida que se van cambiando los escenarios, y se reduce la duración de las tormentas para la misma intensidad de lluvia, se observa que la profundidad hidráulica de las tuberías aumenta, lo que conlleva a posibles inundaciones. Esto sin considerar un escenario de mayor gravedad en ciertos sectores de la ciudad, en los que el sistema de alcantarillado es combinado. En la figura 37 se observa el número de pozos y tuberías que sobrepasan la capacidad del 100% ante la respuesta a cada escenario de precipitación de acuerdo a su duración (1 hora, 3 horas y 6 horas).

Figura 37. N. de Componentes del Sistema Sobrecargados ante los Diferentes Escenarios.



Fuente: Autor.

Como alternativa para la mitigación de las inundaciones surge la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para integrarlos a las nuevas soluciones pluviales propuestas o en el mejor de los casos se propone la realización de estas medidas en los sitios de la ciudad que ya poseen una estructura de drenaje combinada o separada definida y en las que no fueron contemplados los escenarios de cambio climático. Dentro del banco de soluciones de sistemas urbanos de drenaje sostenible se encuentra una amplia gama de soluciones cuyas funciones en general son aumentar los tiempos de transporte de escorrentía en las cuencas urbanas para mitigar el caudal pico máximo en los colectores pluviales; además de esto, algunos sistemas proponen opcionalmente el almacenamiento de aguas pluviales para usos NO potables y el tratamiento para la reducción de algunos contaminantes que arrastran las aguas pluviales y que no reciben un tratamiento previo antes de ser dispuestos a un cuerpo de agua. Los grupos de SUDS se describen a continuación.

6.5. Tipos de SUDS.

a) Celdas de bioretencion: Son depresiones que contienen vegetación con una mezcla de diferentes tipos de suelos y gravas dispuestas a manera de cama. Las celdas permiten almacenamiento, infiltración y evaporación tanto de las precipitaciones directas como de las escorrentías superficiales que producen la precipitación.

b) Jardines verdes: Son un tipo de celda de bioretencion que consta de las capas de suelo y vegetación sin la capa de grava debajo de ellas.

c) Techos verdes: Son otra variación de celdas de bio retención que tiene una capa de suelo colocado encima de las superficies o tejados de las casas que transmite el exceso de lluvia percolada fuera del techo.

d) Trincheras de infiltración: Son zanjas estrechas llenas de grava que interceptan el escurrimiento de las aéreas impermeables hacia el fondo, proporcionan volumen de

almacenamiento y un aumento de los tiempos de retención adicional, además de esto favorecen la infiltración subterránea.

e) Pavimentos permeables: Son áreas excavadas llenas de grava y pavimentadas con un hormigón poroso o mezcla de asfalto. Normalmente toda la lluvia se infiltra por el pavimento y favorece la infiltración subterránea. Además de esto posee un sistema para disponer el agua filtrada en un tanque de almacenamiento.

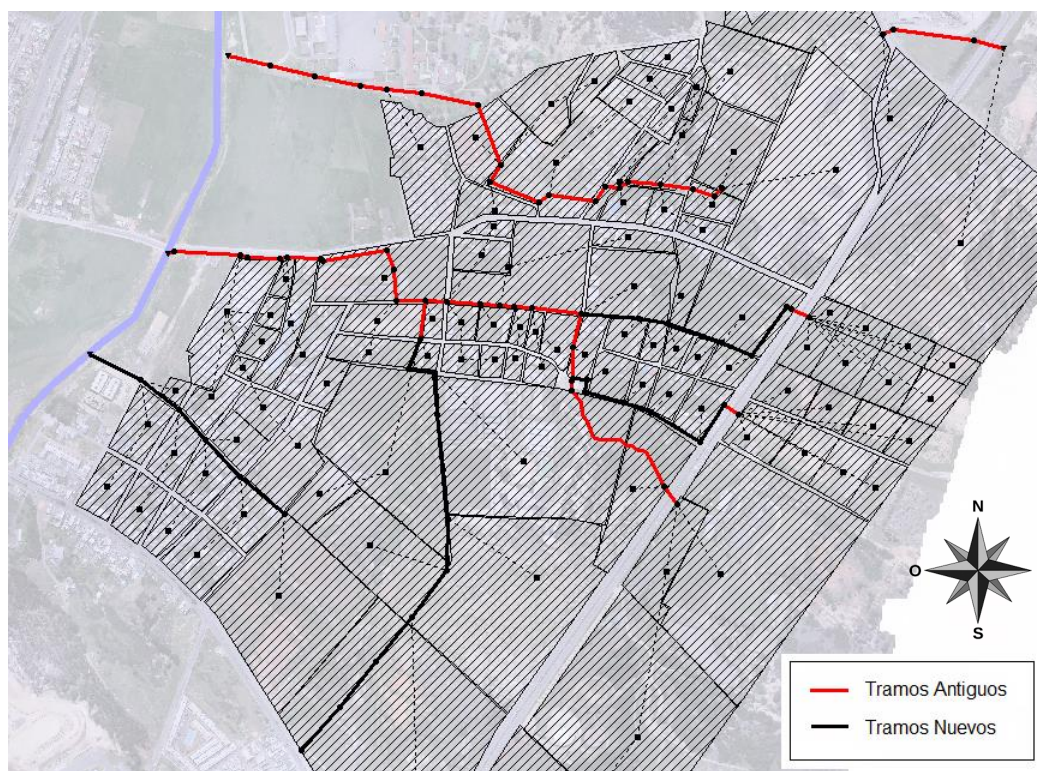
f) Barriles de lluvia o cisternas: Son recipientes que recogen el escurrimiento del techo durante eventos de tormenta y puedes liberar o reutilizar el agua lluvia durante periodos secos.

g) Tejados con descarga: Son un sistema de conexión de drenaje para tejados en los que el agua lluvia recolectada se descarga directamente a jardines o zonas permeables.

h) Canales verdes: Son canales con lados inclinados cubiertos de césped u otra vegetación. Aumentan el tiempo de transporte de escorrentía y favorecen la infiltración subterránea (EPA, 2015).

Debido a que algunas de las partes de la ciudad que presentan problemas son áreas que aún no han sido urbanizadas, se puede realizar una planificación y proponer cualquiera de los SUDS mencionados anteriormente (caso contrario a áreas donde ya están urbanizadas e impermeabilizadas en casi toda su totalidad y el uso de SUDS sería limitado). Ante la ocurrencia del peor escenario de precipitación en el distrito, se presentan 19 tramos con profundidad hidráulica mayor al 85%, 13 tramos con profundidad hidráulica mayor al 100% y 7 pozos con una capacidad mayor al 100% (Ver figura 37).

Figura 38. Tramos antiguos y nuevos proyectados a construir en el distrito.



Fuente: Autor.

Como alternativa se propone la construcción de canales verdes debido a su facilidad constructiva y su viabilidad económica. Como se mencionó anteriormente, los urbanizadores que vayan a desarrollar algún proyecto civil deben destinar un porcentaje del 20% de su área total para la construcción de zonas verdes recreativas por normativa municipal. Al incluir en las áreas mencionadas anteriormente un porcentaje destinado a la construcción de canales verdes, se logran reducir los tiempos de transporte de escorrentía mitigando el problema de la capacidad de los colectores y posibles inundaciones por la sobrecarga de la red pluvial. De esta manera resulta mucho más económico construir un canal verde que construir un colector de mayor diámetro. El comportamiento de las subcuencas con SUDS, se resume en la figura 39 donde el área impermeable o urbanizable no

se modifica y drena su escorrentía hacia el canal verde. Al área permeable se le incorpora el Canal verde y a su vez drena sus aportes hacia este. Finalmente el canal descarga la escorrentía recogida de las 2 áreas hacia el pozo y continua su flujo por la red de colectores y el rio Jordán que es el sitio de disposición final.

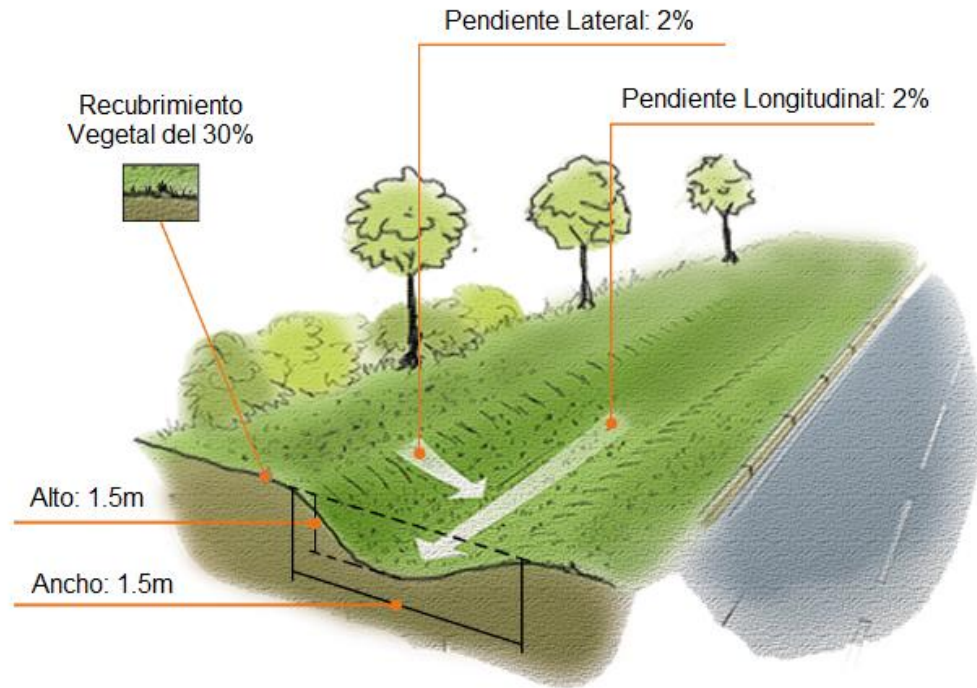
Figura 39. Drenaje dentro de subcuenca con SUDS.



Fuente: Autoría propia, modificado de Luis Arias y XP Drainage.

El canal propuesto se plantea en las áreas 2, 3, 4, 5, 79, 107 y 108 para que sea construido en el 10% del área permeable de cada subcuenca, de manera que se ubique rodeando el predio o en puntos estratégicos de menor cota de tal manera que las aguas pluviales de las áreas impermeables descarguen su escorrentía hacia ese punto. Además de esto, es una propuesta factible debido a que son grandes áreas que tienen un solo dueño (De acuerdo a la base urbana de la empresa) y la construcción del canal no implica establecer servidumbres o áreas públicas de uso compartido para diferentes propietarios. Los resultados de la modelación óptima establecen un canal con las siguientes características:

Figura 40. Características del canal verde.



Fuente: Autoría propia, modificado de XP drainage.

Las áreas 72, 80 y 81 presentan condiciones diferentes, debido a que el área ya se encuentra parcialmente urbanizada y no se puede modificar; además de esto son áreas cuya distribución se encuentra asignada a diferentes dueños y el canal verde es una propuesta poco factible. Por tanto se plantea la adecuación de un tejado con descarga de tal manera que los tejados capten el agua lluvia y la descarguen a zonas permeables. El funcionamiento de tejados de descarga se explica en la figura 41. El sistema se estableció en la modelación con la ayuda de las herramientas de modelación de Desarrollos de bajo impacto, para que trate el 80% del área impermeable.

Para los tramos antiguos, se sugiere una optimización aumentando el diámetro de los colectores, debido a que el gran volumen de lluvia de escorrentía que circula por el distrito, y el grado de desarrollo urbano que presenta, hacen que los efectos de la precipitación no

sea mitigable con SUDS en dichas partes. Los aumentos de diámetros deben realizarse gradualmente de manera que se vayan cumpliendo principalmente los parámetros de profundidad de flujo, esfuerzo cortante y velocidad mínima y máxima en las tuberías de acuerdo al RAS 2015 en su Título D; iniciando desde los colectores principales que presenten problemas críticos de profundidad de flujo (que por lo general se encuentran ubicados en las cotas más bajas, perpendiculares al cuerpo de agua receptor) hasta los tramos puntuales donde se evidencien problemas en el modelo con respecto a los parámetros anteriormente mencionados, y siempre respetando una configuración en la que los colectores principales o matriz deben tener mayor diámetro que los tramos secundarios. El efecto de un mayor diámetro se refleja en tramos con mayor capacidad hidráulica.

Figura 41. Tejado de descarga.



Fuente: Autoría propia, modificado de PWD.

Figura 42. Ubicación de los SUDS.

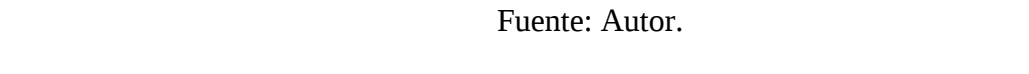
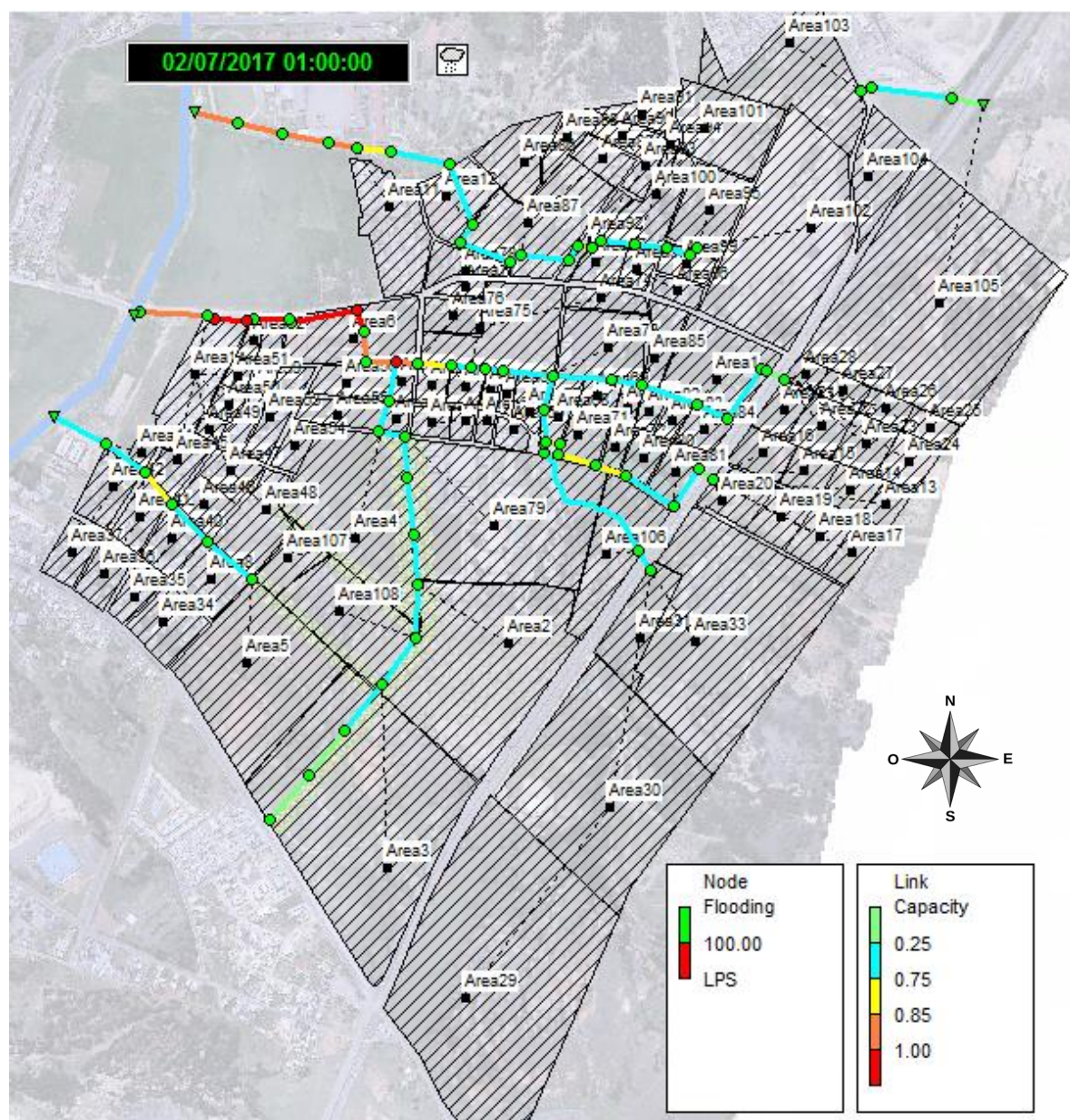


Figura 43. Comportamiento hidráulico del Distrito con SUDS.



Fuente: Autor.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las principales problemáticas que presentan los sistemas de alcantarillado de las ciudades intermedias, es la estructuración que tienen debido a que por la antigüedad en la que fueron construidos son sistemas combinados, o sistemas en los que no fue contemplada la variación de las precipitación producida por el cambio climático, y ya no poseen la capacidad para soportar los eventos de precipitación actuales. Por tal razón surge la discusión de si los países en vía de desarrollo como Colombia, Perú, Chile, Argentina (Por antecedentes de inundación en Sudamérica) entre otros, consideran dentro de su ordenamiento territorial departamental, o municipal, un manejo para la prevención de desastres o una planificación del drenaje urbano que contemple el desarrollo urbano y el cambio climático global, debido a que los índices mundiales de los entes gubernamentales mundiales expertos en el estudio del cambio climático, estiman un aumento en la temperatura mundial para los próximos años para los que la humanidad debe estar preparada, evaluando las consecuencias que implique especialmente en los sistemas de acueducto y alcantarillado. Las obras de infraestructura dedicadas al saneamiento básico de la población, deberán incluir en su planificación y diseño, un factor tan importante para el ser humano como lo es la temperatura ambiental junto con las consecuencias, más negativas que positivas.

Las ciudades deben estar preparadas para afrontar el fenómeno de la urbanización. Los ordenamientos territoriales se convierten en las legislaciones base como documentos que organizan, orientan y controlan el fenómeno del desarrollo territorial; por tal motivo, los entes gubernamentales deben elaborar planes muy bien estructurados que buscando primordialmente el desarrollo de la sociedad, se basen también en un equilibrio sostenible con el medio ambiente. Los ordenamientos territoriales deben ser estructurados de tal manera que se tenga una visión integral hacia un futuro lejano, en que el desarrollo y tratamiento del suelo futuro, respete la conservación de la naturaleza, en especial lo relacionado con patrimonio ambiental, cuerpos de agua y drenaje urbano natural; así mismo

considerar en los ordenamientos el establecimiento de zonas verdes inmodificables que favorezcan el bienestar ambiental y reduzcan el riesgo social ante eventos climatológicos.

La gestión de aguas pluviales debe ser considerado como uno de los temas más importantes en la gestión del riesgo por inundación de las ciudades, debido a que está demostrado que es un gran punto de impacto en diferentes partes del mundo que ha producido cuantiosas pérdidas económicas y humanas. De la misma manera, el tema de drenaje pluvial debe tomar una mayor importancia en los planes de gobierno de los principales mandatarios nacionales, departamentales, y regionales.

Otra discusión surge a raíz de cómo reformar los sistemas de alcantarillado que tienen las ciudades intermedias actualmente. ¿Debería realizarse la construcción de redes pluviales para los nuevos proyectos civiles? o ¿Deberían reformarse las redes combinadas a separadas, de las aéreas ya urbanizadas en las ciudades? Para dar respuesta a esas discusiones se debe analizar quien es el responsable de la construcción de los colectores pluviales en una ciudad, debido a que el mayor inconveniente para la construcción o reforma de colectores pluviales es el factor económico; así tanto urbanizadores como los entes gubernamentales deberían ser los responsables de la construcción de los mismos.

Se sugiere realizar finalmente un balance costo-beneficio de construcción de colectores vs costo de reparación de inundaciones para poder determinar la magnitud en términos económicos de una inundación producida por un evento pluvial, además tener en cuenta que la magnitud podría verse aumentada en ciertas regiones del país con el paso del tiempo, por el efecto del cambio climático.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La modelación realizada en la ciudad de Tunja, demostró que uno de los factores que puede reducir la profundidad hidráulica de las tuberías, es disminuir la pendiente de las subcuencas, que puede realizarse a través de la nivelación del terreno. Esto se explica en que una mayor pendiente reduce el tiempo de transporte de escorrentía hacia los nodos causando el colapso de tuberías o pozos, por tanto este parámetro podría ser tenido en cuenta cuando se presenten estos problemas.

En los sistemas de alcantarillado más antiguos de la ciudad se deberán tener en cuenta que las lluvias de alta intensidad causarán problemas tales como las inundaciones debido a las limitaciones que poseen.

El modelo demostró que es indispensable contar con información horaria de precipitación o aproximaciones a las mismas para el diseño de sistemas de alcantarillado pluvial, debido a que la duración y las altas intensidades de las tormentas es uno de los principales factores que afecta la capacidad hidráulica del sistema. Por ejemplo en lluvias de corta duración pero de mayor intensidad, este debe evacuar determinado caudal de escorrentía en menor tiempo; caso contrario a la respuesta que tendría el sistema a una lluvia de mayor duración y menor intensidad.

De la misma manera que los sistemas de acueducto son proyectados de acuerdo a los consumos de un periodo horizonte, los sistemas de alcantarillado pluvial también deberían ser proyectados para un escenario de cambio climático, de tal manera que en un futuro tengan la capacidad de evacuar el agua lluvia adecuadamente y no se produzcan inundaciones que se verán reflejadas en pérdidas económicas.

Se debe contar con información climatológica lo más actualizada posible al momento de realizar la proyección y diseño de los sistemas de alcantarillado pluvial debido a que las

intensidades de lluvia son las que determinarán finalmente el tamaño de los colectores pluviales.

Las ciudades intermedias serán las futuras mega polis del país debido a que están inmersas en un constante crecimiento urbanístico. Debido a esto los entes gubernamentales competentes de estas ciudades deben realizar una planificación de sus redes de drenaje urbano a corto plazo, para evitar que siga aumentando el fenómeno de desarrollo urbano que no contempla el drenaje urbano. Lo anterior mitigaría los problemas de inundaciones que presentan actualmente las grandes megalópolis de Colombia como Bogotá, Medellín, Barranquilla, Cali, etc.

Respetar el crecimiento urbanístico de las áreas urbanizables que aún no estén urbanizadas de acuerdo a los criterios establecidos en el ordenamiento territorial de la ciudad, también permite realizar un dimensionamiento y planeación de los sistemas de alcantarillado pluvial adecuado de una ciudad, debido al cambio que puedan tener en el futuro las condiciones de permeabilidad del suelo, que son las responsables de la formación de escorrentía en las ciudades.

La modelación de los SUDS lleva a entender la importancia de las zonas verdes o vegetación en una ciudad, debido a que son las encargadas de captar y drenar el agua lluvia de la mejor manera evitando así los problemas de inundaciones.

El modelo fue realizado con datos históricos registrados por estaciones climatológicas y escenarios de cambio climático realizado por científicos del IDEAM; por tanto se sugiere realizar una validación de datos de precipitación tomados por pluviómetros versus datos de precipitación del IDEAM para la zona estudiada. Para los datos del modelo de infiltración, rugosidad de las tuberías y rugosidad de las zonas permeables e impermeables, se sugiere realizar una validación con datos prácticos obtenidos por ensayos y realizados en la zona de estudio debido a que los valores que se usaron fueron teóricos y la fiabilidad del modelo

está relacionado directamente con la calidad de estos datos teóricos y la documentación recolectada en las diferentes etapas del desarrollo del modelo.

Se sugiere realizar la validación y calibración del modelo a través de algunos parámetros tomados en campo como el caudal, escorrentía o inundación para zonas o distritos antiguos donde ya se encuentre operando el sistema para así poder evaluar con mayor precisión las condiciones actuales. Para la zona de estudio, no se realizó debido a que posee colectores y tramos que actualmente están en construcción y algunos son soluciones propuestas por el autor para que sean construidas en un futuro.

Finalmente, para la realización de un modelo de drenaje urbano, se necesitan contar como mínimo con información de precipitación de curvas IDF actualizadas, hietogramas o registros históricos de pluviómetros con lecturas horarias de la mayor cantidad posible de años registrados, conocer los parámetros del suelo requeridos por el modelo de infiltración, conocer las dimensiones de cada subcuenca o contar con una imagen georreferenciada y conocer la topografía en detalle de la zona de estudio. Además de esto, para la evaluación del cambio climático, seria idóneo contar con proyecciones de la precipitación a través de la regionalización de modelos de circulación global, para los próximos 30 años.

9. GLOSARIO

Área litoral: Hace referencia a aquella franja de terreno que se encuentra ubicada junto al mar.

Área metropolitana: Es una región urbana que engloba una ciudad central, también se conoce como red urbana.

Cambio demográfico: Refiere al cambio o transición que experimentan las poblaciones de altas tasas de natalidad y mortalidad a bajas tasas de natalidad y mortalidad.

Ciclón tropical: Es un término meteorológico usado para referirse a un sistema tormentoso caracterizado por una circulación cerrada alrededor de un centro de baja presión y que produce fuertes vientos y abundante lluvia.

Condensación: Es el proceso por el cual el vapor de agua cambia del estado gaseoso al estado líquido.

Escorrentía: Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno.

Evaporación: Es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso.

Infiltración: Es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra a través de los poros del suelo.

Precipitación: Es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre.

Sostenibilidad: Se refiere a las características del desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía Municipal de Tunja (2014). Decreto 0241 de 2014.

Alcamo, J. Döll, P., Kaspar, F y Siebert, S. (1997) Global change and global scenarios of water use and availability: an application of WaterGAP 1.0. Centre for Environmental Systems Research, University of Kassel, Alemania.

Alfonso, Óscar. (2010). Impactos socioeconómicos y demográficos de la metropolización de la población colombiana y los mercados de trabajo y residenciales. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

Ambrosino, S., et al. (2004). Inundaciones Urbanas en Argentina.

Armenta, G., Dorado J., Rodriguez, A. y Ruiz J. (2014). Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. Documento Tecnico. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

Arnbjerg-Nielsen, K. (2006). Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. 54(6), 1–8.

Arnell, N. (1999). Climate change and global water resources. 9(1). 31-49.

Avila H. (2012). Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. 36, pp. 54-59.

Banco Interamericano de desarrollo. (Año desconocido). Trayectorias de concentración representativas (RCP). Recuperado de: <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/trayectorias-de-concentraci%C3%B3n-representativas-rcp>.

Banco Mundial. (2000). Argentina-Gestión de los recursos hídricos. Elementos de política para su desarrollo sustentable en el siglo XXI. 1. Inf. téc. n. 20729-AR.

Benavides H. y Rocha C. (2012). Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia. Nota Técnica. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

Benavides H., Hurtado G., Mayorga R., (2011). Evidencias de Cambio Climático en Colombia con base en información estadística. Nota Técnica. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

Bertrand, A. (1908). Memoria constructiva del alcantarillado de Santiago. Ministerio del Interior del Gobierno de Chile, Santiago.

Bettencourt, L. Lobo, J. Helbing, D. Kühnert, C y Geoffrey, B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. PNAS, 104(17), 7301–7306.

Biswas, A. (2004). Integrated Water Resources Management: A Reassessment A Water Forum Contribution. 29(2), 248-256.

Black, D. Henderson, V. (1999). A Theory of Urban Growth. Journal of Political Economy, 107(2), 252-273.

Bogota y El Tiempo.com. (2015). “Barrios de seis localidades afectados tras fuerte granizada en Bogotá”. El Tiempo. Recuperado de: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15444935>.

Butler, D. y Davies, J. (2000) Urban Drainage. London: Taylor & Francis e-Library.

Cairncross, S. (1989). Water supply and sanitation: an agenda for research. Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 92, 301-314.

Centeno, M. (1996). An Introduction to Simulation Modeling. 15-22.

Chocat, B. (1997). Encyclopedie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris: Technique & Documentation-Lavoisier.

Cumming Cockburn Limited, (1999). Addendum to the Stormwater Design Plan: Clyde/Merivale Lands, city of Ottawa. Prepared for Ashcroft Development Incorporated. Ottawa, Ontario.

Denault, C., Millar, R., Lence, B. (2006). Assessment of possible impacts of climate change in an urban catchment. 42(3), 685–697.

DoE/NWC, (1981). Design and Analysis of Urban Storm Drainage. The Wallingford Procedure. Volume 1: Principles, Methods and Practice, Department of the Environment, Standing Technical Committee, Reporte No. 28.

Evans, E., et al. (2004). Foresight future flooding. London: Office of Science and Technology.

Falczuk, B. (2001). Plan Director de Ordenamiento Hidráulico de la ciudad de Buenos Aires. IIIª Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Ponencias. Municipalidad de Rosario.

Fattahi, P. y Fayyaz, S. (2009). A Compromise Programming Model to Integrated Urban Water Management. 24(6), 1211-1227.

Fernandez, B. (2004). Drenaje de aguas lluvia urbanas en zonas semiáridas. Revista ARQ (Santiago) 57, 64-67.

Førland, E. (2007). Climate change and natural disasters in Norway – An assessment of possible future changes.

Giorgi, F. y Mearns, L. (2001). Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) Method. American Meteorological Society n. 15, 1141-1158.

Grupo Multidisciplinar de Modelacion de Fluidos. (2005). Manual del Usuario del Modelo de Gestion de Aguas Puviales-SWMM 5.0.

Heller, L. (1997). Saneamiento y salud. Brasil: Organizacion Panamericada de la Salud.

Hernandez-Vasquez, A., et al. (2016) Potencial vulnerabilidad frente a inundaciones de los establecimientos de salud públicos de cuatro regiones del norte del Perú. 33(1), 92-99.

Hidalgo, A. (2008). El papel de la vivienda en la configuración urbana de las periferias: caso de Tunja-Colombia 1907-2007. 1(1), 12-43.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climatico para Colombia 2011-2100. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2015). Tunja, Valor del Suelo. Revista del Instituto Geografico Agustin Codazzi. 52. 1-179.

Intergovernmental Panel of Climate Change. (1996). Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel of Climate Change. (2004). Climate Change-Mitigation Of Climate Change. Ginebra: OMM – Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York.

Jiménez, B. (1999). Contaminación por Escorrentía Urbana. Colección SEINOR No. 22.

Konig, A., Sægrov, S., y Schilling, W. (2002). Damage assessment for urban flooding. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage, (Septiembre, 2002), Portland, Oregon, USA.

Leon, N. (2016). El sistema urbano en Colombia y la formación metropolitana: una aproximación desde la Nueva Geografía Económica. 25(2), 21-37.

Lindholm, O., (2007). Who should pay for water damage?, Today's Business–water, wastewater and sanitation, 4.

Lindholm, O., Thorolfsson, S., and Braskerud, B. (2007). Reconsider how to avoid urban flooding.

Lucas, R. (1988) .On the Mechanics of Economic Development. Journal Monetary Econ. (22) 3–42.

Lüthi, C., et al. (2011) Sustainable Sanitation in Cities: A framework for action. Holanda: Papiroz Publishing House.

Madsen, A. (2007). Flood damage and discharge of pollution in the city of Bergen: Analysis of the effect of climate change. MSc. Tesis. University of Science and Technology. Noruega.

Marsalek, J. (1977). Malvern urban test catchment, research program for the abatement of municipal pollution, Canadian-Ontario agreement on Great Lakes water quality. 1(23).

Marsalek, J. (1979). Malvern urban test catchment, research program for the abatement of municipal pollution, Canadian-Ontario agreement on Great Lakes water quality. 2(95).

Milina, J. (1999). Report of analysis of flooding situation and calculating frequency for flooding in 1999 in Trondheim (in Norwegian).

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente de España (2013). Cambio Climático: Bases Físicas Guía Resumida Grupo de Trabajo I del Quinto Informe del IPCC.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico–RAS. Título D-Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo y DICTUC S.A. (1996). Manual de Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de Diseño, Santiago de Chile.

Nie, L. (2004). Flooding analysis of urban drainage systems. Ph.D. Tesis. Norwegian University of Science and Technology. Noruega.

Nie, L., Lindholm, O., Lindholm, G. y Syversen, E. (2009). Impacts of climate change on urban drainage systems – a case study in Fredrikstad, Norway. 6(4), 323-332.

Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management - present and future challenges. 1(1), 1-14.

Olcina, J. (2004). Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en la escala local. El papel del planeamiento urbano municipal. 37, 49-84.

Olcina, J. (2009). Cambio climático y riesgos climáticos en España. 49, 197-220.

Osslon, J. (2009). Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. 92(3). 364-375.

Pagliara, S., Viti, C., Gozzini, B., Meneguzzo, F. y Crisci, A. (1998). Uncertainties and trends in extreme rainfall series in Tuscany, Italy: effects on urban drainage networks design. 37(11), 195–202.

Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. 21(1), 49-62.

Parviz, F. Fayyaz, S. (2010). A Compromise Programming Model to Integrated Urban Water Management. 24(6), 1211-1227.

Perales, Sara. (2008). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). PMEnginyeria. 5 Semana Temática de la Tribuna del Agua. ExpoZaragoza.

Pérez, D. Diago, Y. Corona, B. Espinosa, R. González, J. (2011). Enfoque actual de la salud ambiental. 49(1), 84-92.

Pilar, J., y Depettris, C. (2000). Uso de medidas no estructurales para controlar el aumento de las áreas impermeables en la ciudad de Resistencia. Argentina: Universidad Nacional del Norte.

Pizarro, R. (2005). Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. 26(2). 123-129.

Proactiva Aguas de Tunja S.A E.S.P (1999, 2003)

Qin, X. Xu, Y. (2011). Analyzing urban water supply through an acceptability-index-based interval approach. 34(7), 873-886.

R. Heller, C. Psencik. (2014). "Is your building conducive to the installation of a green roof?". Roofing Contractor. Recuperado de: <http://www.roofingcontractor.com/articles/90262-is-your-building-conducive-to-the-installation-of-a-green-roof>.

Reuters. (2015). "Aumenta a 23 el número de muertos por lluvias e inundaciones en Chile". El Tiempo. Recuperado de: <http://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/inundaciones-en-chile/15500761>.

Ripollés, J, Gomez M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. 1(1), 56.

Rodriguez, E., Sanchez, M. y Sainea, C. (2013). Metodología para la respuesta dinámica del subsuelo en la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja. Ponencia llevada a cabo en el III Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica y Geotecnia. Paipa, Colombia. Recuperado en: http://virtual.uptc.edu.co/memorias/index.php/ing_sis/ing_sist/paper/viewFile/784/778.

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. y Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. 57, 177-192.

Rojas, O., Martínez, C., y Jaque, E. (2010). Recurrencia histórica por inundacion fluvial en el curso inferior del rio carampangue, region del bio-bio. Tiempo y Espacio. Chile.

Rossen, G. (1994). Uma história da saúde pública. Brasil: HUCITEC.

Ruiz F., Guzmán D., Dorado J., Arango C. (2012). Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente. Nota Técnica. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

Semadeni-Davis, A., Hernebring, C., Svensson, G., y Gusdaffsson, L.G. (2008). The impacts of climate change and urbanisation in urban drainage in Helsingborg. 350(1). 100-113.

Shannon, R. (1975). Systems Simulation: The Art and the Science. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Tarifa, E. (Año desconocido). Teoría de Modelos y Simulación. Enrique Eduardo Tarifa. Argentina: Universidad Nacional de Jujuy.

Taylor, K., Stouffer, R., Meehl, G. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society n. 93, 485–498.

Trenberth, K. (2011). Changes in precipitation with climate change. 47(1), 123-138.

United Nations Development Programme. (2006). Human Development Report. New York.

United States Environmental Protection Agency. (1999). Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. Office of Water, Washington DC, EEUU. EPA-821-R-99-012.

Universidad Politécnica de Cataluña. (2007). Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0. Barcelona.

Urbanas, B., y Stahre, P. (1993). Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management. New Jersey: PrenticeHall Inc.

Vasquez-Barquero, A. (1999). Dinámica productiva y desarrollo urbano. La respuesta de la ciudad de Vitoria (País Vasco) a los desafíos de la globalización. EURE(Santiago), 25(74), 19-33.

Vevatne, J. y Westskog, H. (2007). Adaptation to climate change in the Oslo region. Centre for Interdisciplinary Environment and Social research (CIENS), (1).

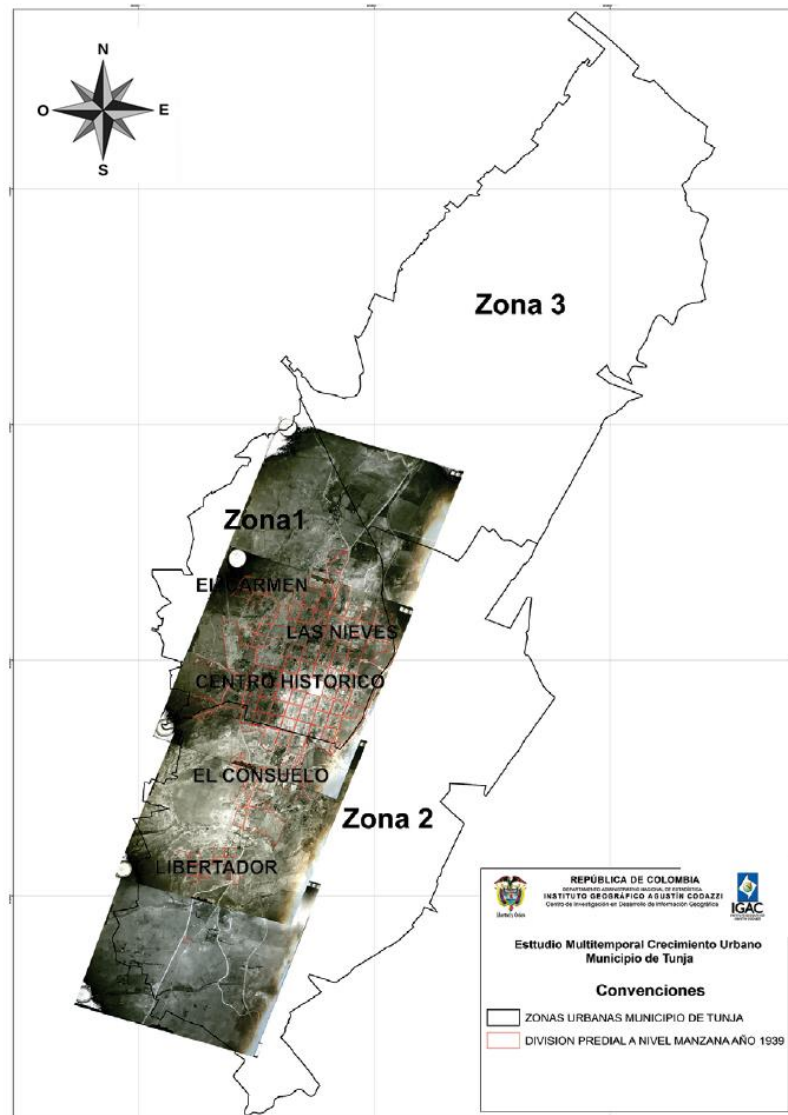
Watt, W., Waters, D. y McLean, R. (2003). Climate change and urban stormwater infrastructure in Canada: context and case studies. Canada: Queen's University.

Zurek, M. y Henrichs T. (2007). Linking scenarios across geographical scales in international environmental assessments. Technological Forecasting & Social Change 74, 1282-1295.

11. ANEXOS

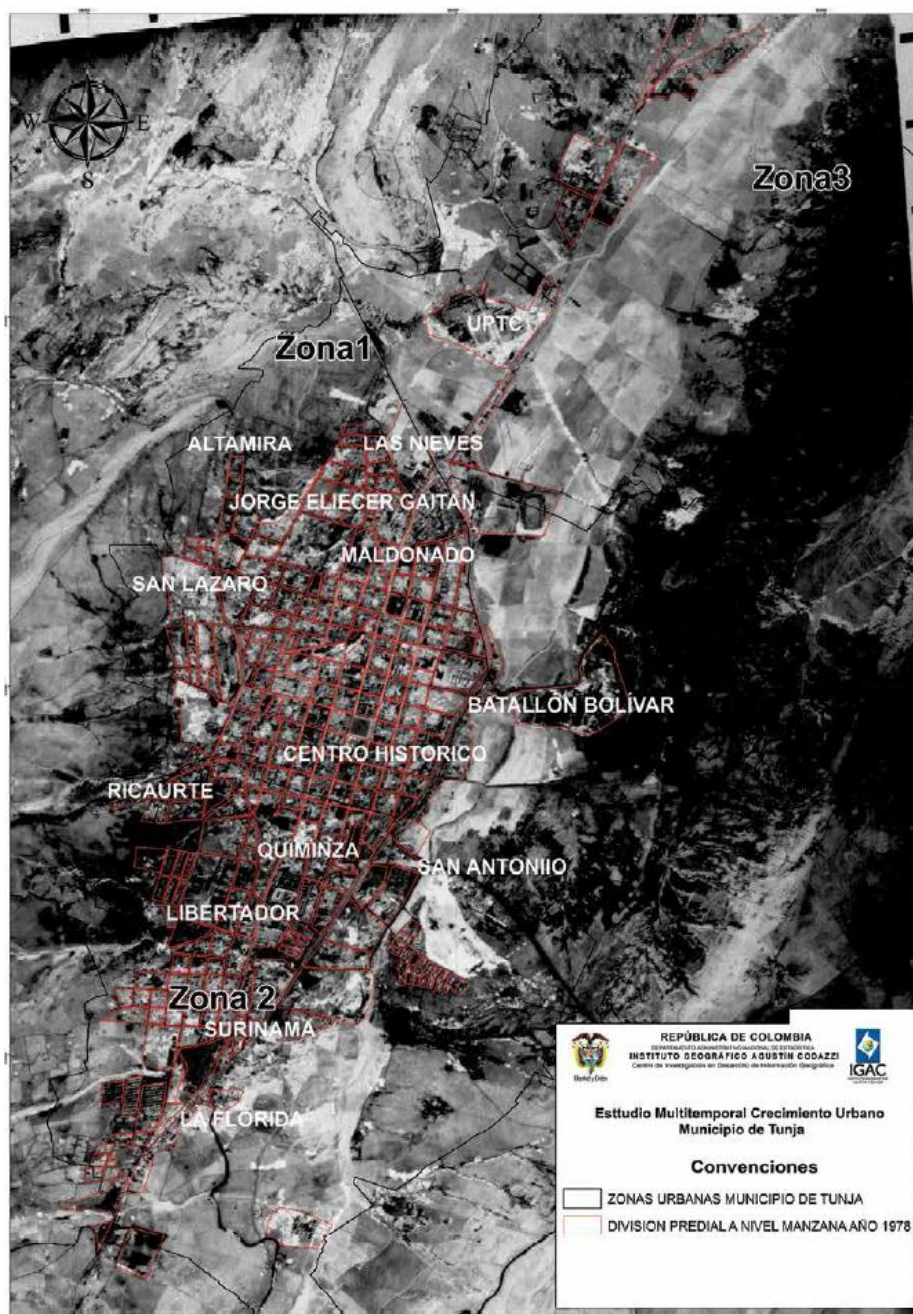
11.1. Foto Mosaicos IGAC

Foto mosaico de Tunja en el año 1939



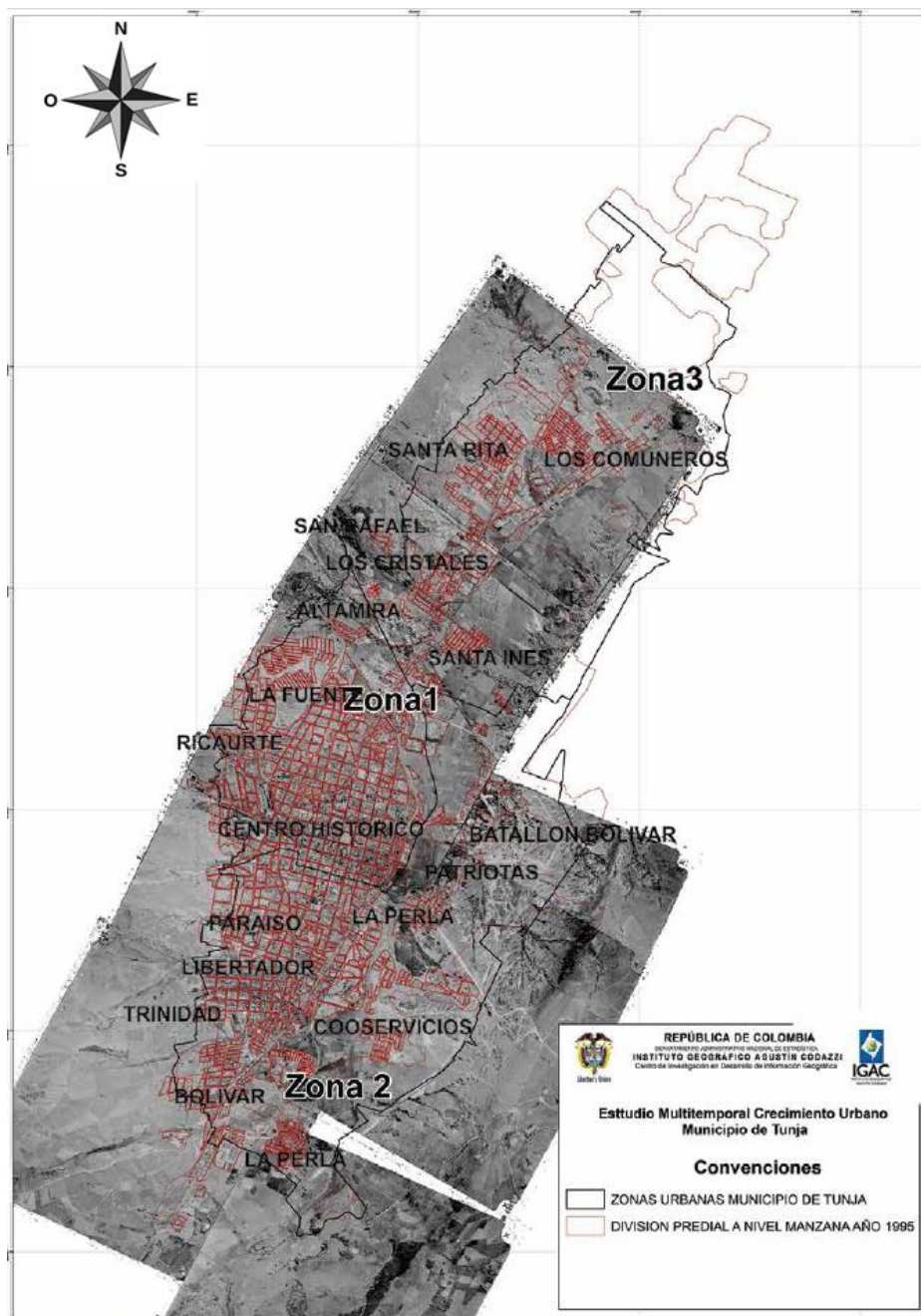
Fuente: IGAC

Foto mosaico de Tunja en el año 1978



Fuente: IGAC

Foto mosaico de Tunja en el año 1995



Fuente: IGAC.

11.2. Resumen de Parámetros del Modelo

Ver Anexo 11.2. Resumen de Parámetros del Modelo, localizado en la carpeta Anexos.