

**PROYECTO DE GRADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE  
URBANO SOSTENIBLE EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE  
INUNDACIÓN URBANA**

**Luisa Fernanda Bonilla Triana**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme las herramientas y oportunidades para estudiar en un país en el cual muchos no pueden hacerlo. En segundo lugar, agradezco a mi familia por su confianza y cariño durante todo este proceso; en especial a mi mamá, quien me enseña cada día que es necesario un gran esfuerzo para alcanzar lo que se desea. En tercer lugar, agradezco a mi asesor de tesis Juan Saldarriaga que durante el semestre me guió e incentivó a mejorar mi criterio como ingeniera y a perseverar hasta obtener los mejores resultados. También, quiero agradecer al profesor Camilo Salcedo, quién confió en mí para darme la oportunidad de aprender más allá de lo que se enseña en clase; además, de guiarme al inicio del presente proyecto de grado. Finalmente, quiero agradecer a la universidad, a los profesores y a mis compañeros por acompañarme y apoyarme a lo largo de este camino.

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	5
1.1.1	Objetivo General .....	5
1.1.2	Objetivos Específicos .....	5
2	Marco teórico .....	6
1.1.	Hidrología e impacto de la urbanización .....	6
1.2.	Inundación .....	7
1.2.1.	Inundación urbana .....	7
1.2.2.	Riesgo de inundación .....	8
1.3.	Sistemas de drenaje urbano sostenible .....	8
1.3.1.	Techos verdes .....	9
1.3.2.	Techos azules .....	10
1.4.	Storm Water Management Model (SWMM) .....	11
1.5.	Método de infiltración: Número de curva .....	13
2.	Metodología .....	15
3.1.	Caracterización caso de estudio: Cajicá .....	15
3.2.	Modelación en EPA SWM .....	18
3.2.1.	Evento de lluvia .....	18
3.2.2.	Modelación de las subcuencas .....	20
3.2.3.	Modelación del método de infiltración .....	25
3.2.4.	Características promedio de las cuencas de estudio .....	26
3.3.	Análisis planteados .....	30
3.3.1.	Análisis de sensibilidad parámetros impermeabilidad .....	30
3.3.2.	Análisis de sensibilidad propiedades SUDS .....	31
3.3.3.	Análisis de riesgo de inundación .....	33
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	34

---

3.1.	Análisis de sensibilidad parámetros de impermeabilidad .....	34
3.1.1.	Análisis número de curva .....	34
3.1.2.	Análisis profundidad de almacenamiento área impermeable .....	39
3.1.3.	Análisis porcentaje sin almacenamiento de la zona impermeable .....	40
4.2.	Análisis de sensibilidad propiedades SUDS .....	41
4.3.	Análisis de riesgo de inundación .....	42
5.	Conclusiones.....	45
6.	Recomendaciones .....	47
7.	Referencias.....	48
8.	Anexos .....	52
	Anexo 1. Mapa de ocupación de Cajicá. ....	52
	Anexo 2. Mapa ocupación del suelo urbano Cajicá. ....	53
	Anexo 3. Mapa información geológica de Cajicá. Tomado de .....	54
	Anexo 1. Número de curva áreas urbanas. Tomado de.....	55
	Anexo 2. Números de curva para tierras de cultivo.....	56
	Anexo 6. Hidrogramas de salida Cuenca 2 .....	1
	Anexo 7. Hidrogramas de salida Cuenca 3 .....	3
	Anexo 8. Hidrogramas de salida Cuenca 4AA .....	6
	Anexo 9. Hidrogramas de salida Cuenca 4AB .....	8
	Anexo 10. Hidrogramas de salida Cuenca 4B.....	11
	Anexo 11. Hidrogramas de salida Cuenca 5 .....	13
	Anexo 12. Hidrogramas de salida Cuenca 6 .....	16

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Componentes típicos del techo verde. Tomado de (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014) ...	10
Ilustración 2. Tipos de techos azules. De izquierda a derecha con piedras, adoquines o estructuras con vacíos. Tomado de (Hydrotech, s.f.) .....	11
Ilustración 3. Idealización de las subcuencas. Tomada de (Macor, 2002).....	12
Ilustración 4. Resumen de la metodología .....	15
Ilustración 5. Ubicación del área de estudio en el municipio de Cajicá .....	16
Ilustración 6. Distribución urbana y rural en el área de estudio .....	17
Ilustración 7. De izquierda a derecha: Elevación de Cajicá y Pendiente de Cajicá .....	18
Ilustración 8. Curvas IDF. Tomado de (Empresa de Servicios Públicos de Cajicá S.A E.S.P e INGEQMA, 2018)	19
Ilustración 9. Hietograma lluvia de análisis .....	20

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Implicaciones de la urbanización en procesos del ciclo de agua. Adaptada de (Ruby, s.f.).....	7
Tabla 2. Descripción de los grupos hidrológicos del suelo. Tomado de (United States Department of Agriculture, 1986).....	14
Tabla 3. Resultados procedimiento bloques alternos .....	20
Tabla 4. Propiedades de los componentes hidráulicos .....	21
Tabla 5. Propiedades de la subcuenca .....	22
Tabla 6. N de Manning superficies. Tomado de (McCuen R., Johnson P. y Ragan, R., 2002) .....	24
Tabla 7. Profundidad de almacenamiento en zonas impermeables y permeables. Adaptada de (ASCE, 1992) .....	25
Tabla 8. Números de curva asociados a los usos del suelo característicos del área de estudio .....	26
Tabla 9. Características Cuenca 2 .....	27
Tabla 10. Características Cuenca 3 .....	27
Tabla 11. Características Cuenca 4AA .....	28
Tabla 12. Características Cuenca 4AB.....	28
Tabla 13. Características Cuenca 4B.....	29
Tabla 14. Características Cuenca 5 .....	29
Tabla 15. Características Cuenca 6 .....	30
Tabla 16. Análisis número de curva.....	31
Tabla 17. Propiedades modeladas de los techos verdes.....	32
Tabla 18. Propiedades modeladas techos azules .....	32
Tabla 19. Resultados obtenidos en condiciones actuales .....	34
Tabla 20. Análisis número de curva Cuenca 2 .....	35
Tabla 21. Análisis número de curva Cuenca 3 .....	36
Tabla 22. Análisis número de curva Cuenca 4AA .....	36
Tabla 23. Análisis número de curva Cuenca 4AB.....	37
Tabla 24. Análisis de curva Cuenca 4B.....	38
Tabla 25. Análisis de curva Cuenca 5.....	38
Tabla 26. Análisis de curva Cuenca 6.....	39

---

Tabla 27. Análisis profundidad almacenamiento área impermeable Cuenca 2, 3, 4AA y 4AB.....	40
Tabla 28. Análisis profundidad almacenamiento área impermeable Cuenca 4B, 5 y 6 .....	40
Tabla 29. Análisis porcentaje sin almacenamiento Cuenca 2, 3, 4AA y 4AB .....	41
Tabla 30. Análisis porcentaje sin almacenamiento Cuenca 4B, 5 y 6 .....	41
Tabla 31. Análisis de sensibilidad propiedades SUDS Cuenca 2, 3, 4AA, 4AB, 4B, 5 y 6.....	42
Tabla 32. Resultados volumen de inundación sensibilidad propiedades SUDS .....	43
Tabla 33. Resultados volumen de inundación escenarios proyectados .....	43
Tabla 34. Análisis de riesgo de inundación escenarios proyectados.....	44

---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Caudal de escorrentía EPA SWMM .....	13
Ecuación 2. Cálculo del número de curva.....	13
Ecuación 3. Cálculo escorrentía número de curva .....	13
Ecuación 4. Cálculo de sensibilidad .....	34

## 1 INTRODUCCIÓN

Las ciudades crecen rápidamente como respuesta a la demanda de la población que decide migrar de las zonas rurales a las urbanas. Hoy en día el 55% de la población mundial vive en las urbes y para el 2050 se espera que sea el 68% (Naciones Unidas, 2018). Este proceso de migración, a su vez, se encuentra acompañado por el reemplazo de elementos naturales por estructuras artificiales, caracterizadas por ser impermeables. Dicha impermeabilización convierte al territorio natural en una cuenca urbana, la cual se caracteriza por la sustitución del drenaje compuesto por fuentes de agua que drenan en el mar a un sistema de alcantarillado y saneamiento (Real Academia de Ingeniería, s.f.). Este proceso produce alteraciones en el ciclo hidrológico que trae consigo consecuencias en el habitual comportamiento de las cuencas al modificar las rutas del flujo de agua (Ruby, s.f.). De este hecho, se origina la necesidad de darle sostenibilidad a las ciudades, en términos ambientales, sociales y económicos. Por lo cual, se discutirá la importancia de evaluar las inundaciones por encharcamiento en zonas urbanas y la introducción de sistemas urbanos de drenaje sostenible como herramientas de manejo para el riesgo de inundación.

En primer lugar, se define que las inundaciones se dan cuando hay un exceso de agua en una zona que habitualmente estaría seca. La alteración del ciclo hidrológico sumado al cambio climático aumenta el riesgo de que se dé una inundación en la ciudad (IDIGER, 2019). Pues, las lluvias serán cada vez más frecuentes e intensas (Oki, T. y Kanae, S., 2006) y las redes de alcantarillado existentes pueden no tener la capacidad hidráulica suficiente para evacuar el agua o incluso el agua pluvial puede ingresar en el sistema de drenaje y luego salir y almacenarse en otro lugar de la ciudad. Este tipo de inundación puede durar desde horas hasta días de acuerdo a si fue originada por crecientes de ríos, diques, arroyos u otras fuentes hídricas. Por lo cual, puede ocasionar pérdidas económicas e incluso humanas (Floodsite, 2008). Un ejemplo extremo de este tipo de inundaciones se encuentra en la ciudad de Barranquilla, la cual, en época de lluvias al no contar con un sistema de drenaje formal se forman fuertes corrientes de escorrentía denominadas arroyos que ocasionan pérdidas de vidas, daños en la infraestructura, daños ambientales y cese de actividades laborales y educativas (Alcaldía de Barranquilla, 2019).

En Colombia, las zonas con mayor riesgo de inundación son los Llanos Orientales, la región del Caribe y las regiones con poblaciones establecidas cerca a fuentes hídricas o en las planicies de inundación de los ríos. Como se mencionó antes, este riesgo aumentará por el incremento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones, en especial en Colombia. Pues, según la ONU Colombia es el país donde más llueve con precipitaciones promedio de 3240 milímetros al año. A su vez, dentro de Colombia, el departamento con el mayor régimen de lluvia es Chocó, el cual se ve afectado por inundaciones causadas por su cercanía al Océano Pacífico y a la cordillera de los Andes, la cual impide el paso de las nubes hacia el interior del país (UNGRD, 2019). Por otro lado,

es importante mencionar las consecuencias de épocas invernales como la que se dio entre 2010 y 2011, en la cual se registró que el 73% de la población nacional fue damnificada, 552.175 viviendas fueron afectadas y el total de daños se valorizó en 11,2 billones de pesos. Además, durante esta ola invernal la afectación del territorio fue mayor en las zonas urbanas que las rurales, 9.726 hectáreas de zonas urbanizadas se inundaron y la tasa de desempleo aumento en estas áreas (BID & Cepal, 2012).

Por lo anterior, se evidencia la necesidad de mejorar los procesos en el manejo de riesgo de inundaciones en las zonas urbanas, pues sus efectos van en contra de lo que es la sostenibilidad, al trascender en el ámbito social y económico. En referencia al aspecto social, se ve afectada la calidad de vida de las personas, hay problemas en las redes de transporte, se da una alteración en el normal funcionamiento de sus actividades e incluso se puede dar una pérdida de vidas humanas. Respecto al aspecto financiero existen pérdidas económicas significantes, al haber daños en la infraestructura y cese de las actividades económicas (APFM, 2013).

En la actualidad, el drenaje de las ciudades se realiza por sistemas de drenaje tradicionales y a pesar de realizarles mantenimientos periódicos, las inundaciones o eventos catastróficos obligan a las autoridades a efectuar intervenciones locales o a desarrollar planes de emergencia basados en las catástrofes ocurridas. Lo cual, implica altas inversiones para adaptar las estructuras que no garantizan la reducción del riesgo de inundación. A partir de esto, el cambio climático, el crecimiento de la población urbana y la alteración en el ciclo hidrológico, cobra importancia el concepto de resiliencia y sostenibilidad en las ciudades. El primero hace referencia a la capacidad de una entidad de recuperarse frente a perturbaciones o problemas para seguir funcionando en el futuro, en este caso se refiere a la capacidad de un sistema de drenaje para recuperarse de problemas mecánicos y seguir brindando un servicio óptimo en la evacuación de aguas para contribuir a disminuir las pérdidas por la inundación. El segundo término hace referencia a que el desarrollo de las ciudades debe satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos de las futuras generaciones en términos sociales, ambientales y económicos (ONU tomado de Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, s.f.).

En continuación a los términos de resiliencia y sostenibilidad definidos con anterioridad se hace importante evaluar los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) como alternativa al manejo del riesgo de inundación de las ciudades. Los sistemas de drenaje urbano sostenible pretenden que el comportamiento hidrológico de la cuenca urbana se parezca al de una cuenca sin intervención humana. Por lo cual, integran elementos naturales que permiten la infiltración del agua para la recarga de acuíferos, reducen el caudal de escorrentía y evitan el contacto del agua con superficies contaminadas. Logrando así que se reduzca el nivel de escorrentía y con ello el riesgo de inundación (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, 2016).

Adicionalmente, los sistemas de drenaje urbano sostenible traen beneficios que contribuyen a construir ciudades sostenibles. En el escenario ambiental, contribuyen a la captura de dióxido de carbono, mejoran la calidad de aire, generan espacios verdes para la biodiversidad de animales, reducen el efecto de la isla calor, mejoran la disponibilidad y la calidad del agua. En el sector económico, sirven para regular la temperatura en los edificios, se pueden adaptar a la infraestructura existente y permiten obtener mejores puntuaciones para obtener las certificaciones LEED. En el ámbito social, disminuyen la contaminación auditiva, crean espacios paisajísticos y mejoran la calidad de vida (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014).

Por otro lado, es importante resaltar que con anterioridad se han llevado a cabo investigaciones sobre los beneficios de la implementación de infraestructura verde en las ciudades. En el caso de la Universidad de los Andes, se ha evaluado la retención de la escorrentía y los costos asociados a la implementación de diferentes sistemas urbanos de drenaje sostenible en casos de estudio ubicados en Bogotá. Por ejemplo, en Muñoz, A., 2016 se desarrolla una metodología de optimización para maximizar el uso de SUDS en la universidad de los Andes. En Vega, L., 2016 se realizan análisis de sensibilidad del comportamiento de los techos verdes y los tanques de almacenamiento. Asimismo, en Correa, S., 2013 se hace una valoración de beneficios públicos y sociales de la implementación de los sistemas de drenaje urbano sostenible.

Del mismo modo, en la comunidad internacional se han desarrollado investigaciones en torno a la resiliencia y la sostenibilidad de las ciudades, al manejo de riesgo de inundaciones y al análisis de los beneficios de las infraestructuras verdes como los sistemas de drenaje urbano sostenible. Como referente para este proyecto, se tiene al artículo “Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management”, en el cual se realiza una modelación de inundación en un caso de estudio y se cuantifica los costos de los daños para luego compararlos con los beneficios y los costos de los daños en un escenario con infraestructura verde-azul-gris. De este artículo se evidenció la importancia de la modelación de inundaciones. Pues, la modelación hidrológica permite prevenirlas y manejarlas al convertirse en una herramienta para la toma de decisiones, el desarrollo de planes de ordenamiento territorial, la delimitación del índice de construcción alrededor de los ríos, la determinación de parámetros para el desarrollo de infraestructura y el establecimiento de protocolos de procedimiento para situaciones de emergencia por temporadas de lluvias (IDEAM, s.f.).

A diferencia de los trabajos mencionados con anterioridad y por la importancia que tiene la modelación de las inundaciones para el plan de emergencias de una ciudad, esta investigación quiere cuantificar y expresar los efectos de la captura del agua de escorrentía e infiltración del agua pluvial por los sistemas de drenaje urbano sostenible en términos de reducción del riesgo de inundación en las ciudades. No obstante, a pesar de que las inundaciones urbanas con mayor significancia en pérdidas se dan por desbordamientos en ríos, quebradas u otras corrientes de

agua; el alcance de esta tesis está limitado al análisis de inundaciones urbanas causadas por altas precipitaciones.

Para resumir, se evidencia que existe una problemática respecto al riesgo de inundaciones en cuencas urbanas, las cuales son causadas por lluvias intensas y falta de capacidad hidráulica del sistema de alcantarillado. A su vez, las inundaciones tienen impactos negativos en los sectores social, económico y financiero. A partir de allí, se identifica la necesidad de implementar estrategias para dirigir las ciudades hacia la sostenibilidad, por lo que se implementan los sistemas de drenaje urbano sostenible en las redes de drenaje tradicionales. Por ende, como valor agregado a las tesis hechas anteriormente sobre este tema, se quiere aplicar las funciones de los SUDS en una problemática actual, para concluir si tiene o no relevancia la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible en el manejo del riesgo de inundación urbana.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de los sistemas de drenaje urbano sostenible en la reducción del riesgo de inundación urbana en Cajicá en el caso actual y en escenarios que podrían ocurrir por el crecimiento urbano del municipio.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la sensibilidad de los parámetros que afectan la impermeabilidad en el comportamiento hidrológico de las cuencas.
- Identificar las propiedades del techo verde con mejor desempeño en la reducción de escorrentía y caudales de salida.
- Realizar un análisis comparativo entre techos verdes y techos azules en escenarios de alta impermeabilidad.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 1.1. Hidrología e impacto de la urbanización

El agua es esencial para el correcto funcionamiento y sostenimiento de los procesos biológicos en el planeta. Aproximadamente el 75% de la Tierra está cubierta por agua o hielo, de este porcentaje el 97% está almacenado en los océanos, 1.7% en los glaciares, 1.7% en los ríos, los lagos y el suelo y el 0.001% pertenece al agua en forma de vapor que se encuentra en la atmósfera (National Geographic, s.f.). El proceso que permite el constante movimiento y transformación del agua a través del planeta se denomina ciclo hidrológico. El anterior concepto se define como el continuo intercambio de masas de agua a través de la tierra y la atmósfera mediante el paso del agua por sus tres estados (sólido, líquido y gaseoso) (NOAA, s.f.).

El ciclo del agua no es un proceso circular simple, está compuesto por diferentes procesos, los cuales son posibles por la energía solar y la gravedad. El agua almacenada en la Tierra (océanos, ríos y otras fuentes de agua) se convierte en vapor de agua mediante la evaporación. Este vapor de agua a través de la condensación forma las nubes y estas retornan el agua a la superficie mediante la precipitación o la caída de nieve. Después, el agua puede tomar varias rutas: desplazarse por la tierra (escorrentía), penetrar el suelo por medio de la infiltración o percolación o ser absorbida y evapotranspirada por las plantas. Asimismo, existen otros procesos como la conversión del hielo a vapor de agua (sublimación) o, por el contrario, el vapor de agua pasa a su fase sólida (deposición). (NOAA, s.f.). Cada una de estas rutas que toma el agua se consideran corrientes, que a su vez forman cuencas hidrográficas.

Las cuencas hidrográficas se caracterizan por drenar las aguas que caen en su superficie a un único punto de salida. Estas se encuentran delimitadas por líneas imaginarias denominadas divisorias de aguas, las cuales se definen sobre las elevaciones del terreno. Debido al crecimiento de las ciudades las cuencas naturales han dejado de tener un sistema de drenaje natural y se han convertido en cuencas urbanas con sistemas de drenaje creados por el hombre.

Las cuencas urbanas se caracterizan porque existe un aumento de las superficies impermeables, es decir, superficies duras que no permiten la penetración del agua. El aumento de estas superficies impermeables cambia las rutas que toma el agua, pues se disminuye la infiltración y se aumenta la escorrentía. Lo anterior se muestra en la Tabla 1, en la cual se muestra los cambios en el porcentaje de agua transportada según el aumento de la impermeabilización de la cuenca.

**Tabla 1. Implicaciones de la urbanización en procesos del ciclo de agua. Adaptada de (Ruby, s.f.).**

Superficie	Infiltración superficial	Infiltración profunda	Evapotranspiración	Escorrentía
<b>Natural</b>	25%	25%	40%	10%
<b>Impermeable (10-20%)</b>	21%	21%	38%	20%
<b>Impermeable (35%-50%)</b>	20%	15%	35%	30%
<b>Impermeable (75%-100%)</b>	10%	5%	30%	55%

Otra consecuencia en la hidrología son los picos de descarga y los tiempos en que transcurre la creciente. El aumento en los volúmenes de descarga y la reducción en el tiempo de transición de la creciente pueden ocasionar inundaciones o daños ambientales en los cuerpos de agua. Los daños en el ecosistema son: el aumento de la erosión de los ríos, el aumento de los sedimentos transportados, la obstrucción de canales, la reducción del almacenamiento de agua subterránea, pérdida de la vegetación, baja calidad del agua y degradación del hábitat acuático.

Por otro lado, las áreas urbanas tienen incidencia en la intensidad y variabilidad de la lluvia debido al alto volumen de materiales que absorben el calor, la falta de vegetación para el respectivo enfriamiento y el uso de aerosoles y contaminantes que favorecen el aumento de la temperatura. En varias ciudades de Estados Unidos y Europa se han evidenciado aumentos o reducciones de las precipitaciones desde el 8% a 28% (McGrane, 2016). Asimismo, se espera que bajo las políticas actuales del manejo del agua el incremento en la intensidad e intermitencia de las lluvias no será equivalente a agua para el consumo humano y aumentará el riesgo de sequías e inundaciones (Oki, T. y Kanae, S., 2006).

## 1.2. Inundación

### 1.2.1. Inundación urbana

La inundación urbana, como su nombre lo indica son inundaciones que ocurren en áreas urbanas debido a lluvias de alta intensidad o crecidas de los ríos adyacentes. Dichos aumentos en los volúmenes de agua interceptados en la cuenca sobrepasan la capacidad del sistema de alcantarillado. Esta problemática sumada al alto porcentaje de superficies impermeables que aumentan la escorrentía, la alteración de las rutas de drenaje natural, el cambio climático y el continuo aumento de la demanda han hecho que el riesgo de inundación sea mayor en las

grandes ciudades. Razón por la cual los gobiernos deben buscar estrategias de mitigación, pues esta inundación produce significativas pérdidas económicas e impactos negativos en la sociedad y el ambiente. A partir de la anterior preocupación nace el concepto de la resiliencia de la inundación urbana para la planificación de las ciudades. Esta resiliencia hace referencia a la capacidad del sistema de drenaje de resistir y brindar el servicio en momentos de sobrecarga, la capacidad de la ciudad para recuperarse de las pérdidas económicas y de evacuar el agua de inundación. Como mecanismos para aumentar esta resiliencia se tiene los planes de manejo de las inundaciones que deberían estar contenidos en los planes de gestión del riesgo y los sistemas urbanos de drenaje sostenible como una forma ecoamigable para disminuir la sobrecarga en los sistemas de alcantarillado convencionales al interceptar el agua en rutas similares a las del ciclo hidrológico.

### 1.2.2. Riesgo de inundación

Las inundaciones traen consigo consecuencias negativas en los ámbitos económico y social de las ciudades y, por ende, representan un peligro para las comunidades. Para el debido manejo de este riesgo se hace necesario la cuantificación del mismo, para ello existen diversos métodos empíricos o sintéticos que involucran la cuantificación de los daños económicos tales como, las curvas de daño – profundidad, softwares especializados en la realización de mapas de inundaciones o el uso de sistemas de información geográfica que por medio de capas de información económica o de profundidad de lluvia pueden calcular el riesgo. Para efectos del presente proyecto de grado se usará como método para cuantificar el riesgo de inundación una aproximación que se puede obtener del software EPA SWMM, la cual es el volumen de inundación. Dado que, si estos volúmenes son altos indican que existe la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en el área de estudio.

### 1.3. Sistemas de drenaje urbano sostenible

Las inundaciones por lluvia se han convertido en un fenómeno cada vez más recurrente en ciudades durante la temporada de lluvias por diferentes razones como: la falta de mantenimiento, infraestructura o renovación de las redes de alcantarillado, aumento de la demanda, la falta de planeación del crecimiento de las ciudades, aumento de la impermeabilización, reducción de la vegetación y contaminación en los canales. Como estrategias para la problemática mencionada anteriormente se han implementado sistemas de drenaje urbano sostenible también conocidos como controles LID o Best Management Practices (BMPs), los cuales tienen el objetivo de recuperar los procesos de transporte que recorrería el agua como la escorrentía o la evaporación, reducir la contaminación en el agua e integrar a la ciudad con el entorno natural. Los tipos de SUDS a implementar son muy variados, desde los que integran vegetación como las celdas de biorretención o los techos verdes hasta los que se conforman por estructuras artificiales como el pavimento poroso o los

tanques de almacenamiento. Para el presente proyecto de grado se decidió usar sistemas que capturarán la lluvia y no la escurrirán, además de ser factibles de implementar en las residencias, estos sistemas son los techos verdes y los techos azules, los cuales serán explicados con mayor detalle a continuación.

### 1.3.1. Techos verdes

Los techos verdes son quizás el sistema de drenaje urbano sostenible más usado debido a los múltiples beneficios que presenta en el ámbito social, económico y ambiental, tales como la mejora del paisaje urbano, el aumento de la valorización de los predios y la mitigación del efecto de la isla de calor. Asimismo, tiene una serie de desventajas como los altos costos de instalación y el frecuente mantenimiento. Los techos verdes funcionan bajo los procesos de retención, infiltración y evaporación del agua lluvia captada. Adicionalmente, debe cumplir con una serie de requerimientos mínimos como la estanqueidad, es decir, impedir la filtración del agua a la estructura que lo soporta; el drenaje, que se refiere a la evacuación y circulación del agua a través del sistema dispuesto para tal fin como las bajantes y canaletas y la nutrición para mantener a las plantas en buen estado para brindar una estructura armónica con el entorno. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014)

En cuanto a la estructura está compuesta por tres componentes: activos, estables y auxiliares, los cuales deben tener una correcta interacción entre ellos para el adecuado funcionamiento. El primer componente hace referencia a la cobertura vegetal y al medio de crecimiento, es decir, las plantas que se van a disponer en este y al suelo sobre el que se plantarán, los cuales deben ser seleccionados en base a los criterios de condiciones climáticas, la vegetación local y el propósito de implementación del mismo. Por otro lado, el segundo componente hace alusión a los componentes que deben garantizar el correcto funcionamiento de los techos verdes como las membranas de impermeabilización, barreras anti raíces, filtrantes, componentes del drenaje, entre otros. Por último, los elementos auxiliares hacen referencia a los componentes que permiten la adaptación del techo verde como el confinamiento, los medios de protección, la iluminación, entre otros. En la Ilustración 1 se muestra esta estructura.



Ilustración 1. Componentes típicos del techo verde. Tomado de (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014)

### 1.3.2. Techos azules

Los techos azules son sistemas urbanos de drenaje sostenible que se implementan en los techos de las construcciones que sean planos. A pesar de que capturan el agua de la lluvia no están diseñados para almacenarla, por el contrario, cuentan con un sistema de drenaje que se encarga de evacuarla de forma controlada en un periodo corto de tiempo no mayor a 72 horas. Son mayormente aplicados en áreas urbanas con pocas superficies permeables y con riesgo de inundación. Los techos azules cuentan con múltiples beneficios como la compatibilidad con otros tipos de techos como paneles solares, no requieren excavación, son fáciles de instalar y no necesita condiciones adicionales al alcantarillado. No obstante, también presenta una serie de desventajas como la limitación de factibilidad de aplicación a techos planos, capacidad de almacenamiento limitada, no mejora la estética ni reduce la contaminación en el agua o mejora la calidad de la misma (Philadelphia Water Department, s.f.).

Los techos azules están compuestos por controles de entrada que les permiten recibir la lluvia que cae y la escorrentía de techos adyacentes, tiene un área de almacenamiento soportada en una membrana impermeable, un control de salida que restringe la evacuación del agua y lo lleva a un sistema de drenaje y finalmente, tiene un componente para el mantenimiento y acceso en el cual se adecuan sistemas de monitoreo o barandas. Para su instalación se debe adecuar una salida del agua como una bajante, la cual debe ser revisada con regularidad para evitar bloqueos, luego se instalan unas membranas impermeables para evitar escapes de agua y por último se instala el sistema del techo azul, el cual se conforma por estructuras que tengan vacíos para el paso del agua. Además, el techo azul tiene una gran versatilidad y permite la adecuación de techos verdes, pues estos permiten infiltrar el agua hacia su sistema,

en la Ilustración 2 se pueden observar algunas de las composiciones típicas para la instalación de un techo azul. Dada la anterior estructura y para el correcto funcionamiento del techo azul, la salida del agua es diseñada para evacuar un caudal específico con el fin de evitar inundaciones locales y para descargar un determinado volumen de agua, el cual puede ser de hasta una precipitación de 120 mm (Bauder, s.f.).

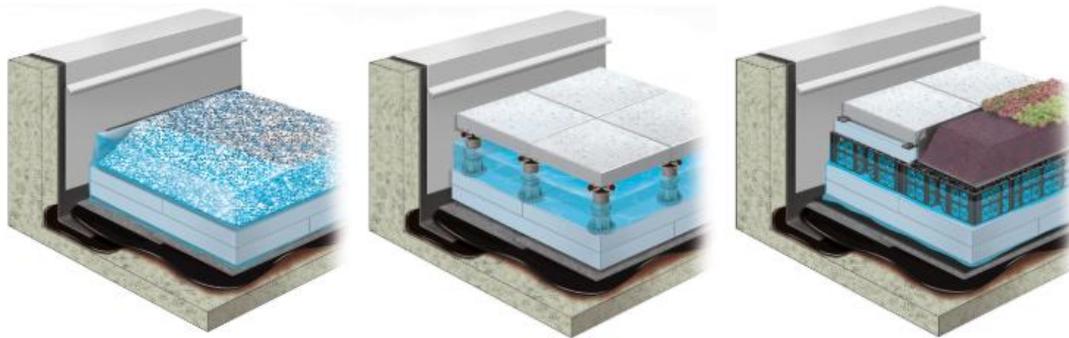


Ilustración 2. Tipos de techos azules. De izquierda a derecha con piedras, adoquines o estructuras con vacíos. Tomado de (Hydrotech, s.f.)

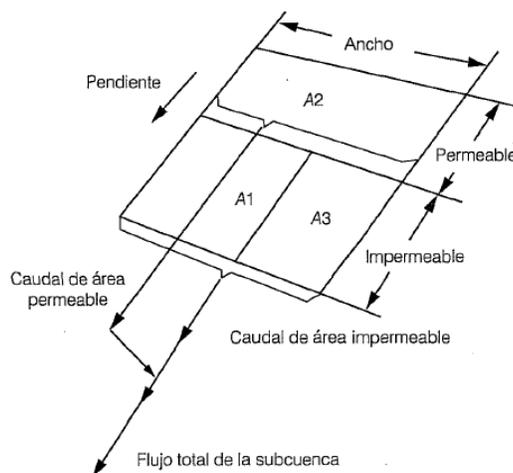
#### 1.4. Storm Water Management Model (SWMM)

Storm Water Management Model (SWMM) es un software libre desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) para modelaciones hidráulicas. Se creó con el objetivo de hacer un buen manejo de las aguas pluviales y diseñar estrategias para el manejo de la escorrentía y descargas de las cuencas que dañan a los cuerpos de agua receptores. EPA SWMM es principalmente usado en áreas urbanas para proyectos relacionados con sistemas de drenaje, evaluación de contaminantes en la calidad del agua, delimitación de zonas de inundación y eventos hidrológicos. Para el cálculo, este software cuenta con un motor explícito llamado SWMM, el cual ha sido usado eficazmente desde 1970 a nivel internacional y que se encuentra en continua mejora por su inestabilidad respecto a los otros motores hidráulicos (Abellán, 2016). En la actualidad, se cuenta con la versión SWMM 5.1, la cual ha sido desarrollada sobre versiones anteriores, cuenta con una interfaz amigable con el usuario y con múltiples formatos para la presentación de resultados como gráficos, tablas, diagramas de perfil de las tuberías, entre otros. Para la modelación, SWMM permite simular eventos de lluvia en un periodo deseado y posee tres módulos: un nódulo hidráulico y un módulo de hidrología.

El módulo hidráulico se encarga de distribuir el agua que se encuentra como escorrentía en la superficie a la red de drenaje, canales, dispositivos de almacenamiento/tratamiento, bombas y

elementos reguladores. Asimismo, este módulo tiene la capacidad de diseñar redes de drenaje, modelar elementos especiales como vertederos, analizar redes de tamaño ilimitado, modelar regímenes de flujo, definir la ruta que tomará el flujo por onda cinemática o dinámica, percolación del agua, interacción entre el agua subterránea y el sistema de drenaje y, reducción de la escorrentía por medio de controles LID. Respecto a los controles LID, EPA SWMM tiene la capacidad de modelar ocho tipos de estos sistemas: Celdas de bio-retención, jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimento permeable, barril de lluvia, desconexión en el techo y canales vegetales (EPA, s.f.).

Por otro lado, el módulo de hidrología define el área de estudio como una cuenca que se divide en subcuencas homogéneas. En esta ocurre un evento de lluvia que genera la escorrentía que ingresa a la red de drenaje. Este módulo tiene diferentes funciones, tales como la evaporación, la acumulación y derretimiento de la nieve, simulación de la precipitación variable en el tiempo, infiltración, percolación e intercepción de lluvia. Para la generación de la escorrentía, SWMM usa el proceso de transformación lluvia-escorrentía denominado bloque RUNOFF que considera a las cuencas como reservorios no lineales espacialmente concentrados. Este bloque se ocupa de la generación de escorrentía superficial, subsuperficial y los hietogramas. Para realizar este proceso hace una idealización de la subcuenca en tres zonas: permeable, impermeable con almacenamiento y sin almacenamiento tal y como se muestra en la Ilustración 3.



**Ilustración 3. Idealización de las subcuencas. Tomada de (Macor, 2002)**

A partir de la idealización de la cuenca, el caudal de escorrentía en cada una de las subcuencas es calculado con la siguiente ecuación, la cual desprecia la inercia y la presión.

**Ecuación 1. Caudal de escorrentía EPA SWMM**

$$Q = W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{n} S^{1/2}$$

Siendo Q el caudal, W el ancho de la subcuenca, d la profundidad de agua del reservorio y de la profundidad de las depresiones de almacenamiento y S la pendiente media de la subcuenca (Macor, 2002).

**1.5. Método de infiltración: Número de curva**

El número de curva es un método de infiltración creado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos. Su medición se encuentra entre 0 y 100, siendo 0 una superficie permeable y 100 una superficie impermeable, por ende, a mayor número de curva mayor potencial de generación de escorrentía. El cálculo de este número de curva (CN) se encuentra relacionado con el máximo potencial de retención después de que inicia la escorrentía (S) (Ver Ecuación 2), que a su vez está relacionada con la clasificación de los grupos hidrológicos del suelo, los cuales se encuentran explicados en la Tabla 2. Por ende, se evidencia que el número de curva depende del tipo de suelo hidrológico, el uso del suelo y las condiciones previas de humedad (Natural Resources Conservation Service, 2009). Asimismo, para el cálculo de la escorrentía (Q) el método del número de curva requiere de un evento de lluvia (P) y el máximo potencial de retención después de que inicia la escorrentía (S). La ecuación usada para su estimación es mostrada a continuación (Ver Ecuación 3) y los parámetros deben ser ingresados en pulgadas.

**Ecuación 2. Cálculo del número de curva**

$$S(in) = \frac{1000}{CN} - 10$$

**Ecuación 3. Cálculo escorrentía número de curva**

$$Q(in) = \frac{(P - 0.2)^2}{(P + 0.8S)}$$

**Tabla 2. Descripción de los grupos hidrológicos del suelo. Tomado de (United States Department of Agriculture, 1986)**

<b>Grupo hidrológico</b>	<b>Potencial de escorrentía</b>	<b>Transmisión del agua en el suelo</b>	<b>Composición típica</b>	<b>Conductividad hidráulica saturada (in/h)</b>
<b>A</b>	Bajo	Libre	Menos del 10% es arcilla. Más del 90% es arena o grava.	Mayor a 1.42
<b>B</b>	Moderadamente bajo	No presenta obstáculos	Entre el 10% y el 20% es arcilla. Entre el 50% y el 90% es arena con magra.	Entre 0.57 y 1.42
<b>C</b>	Moderadamente alto	Algo restringida	Entre el 20% y el 40% es arcilla. Menos del 50% es arena, limo, magra o arcilla.	Entre 0.06 y 0.57
<b>D</b>	Alto	Restringida o muy restringida	Mayor al 40% de arcilla. Menor al 50% de arena con texturas arcillosas	Menor a 0.06

## 2. METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar la reducción en el riesgo de inundación urbana al implementar sistemas de drenaje urbano sostenible se tomará como caso de estudio el plan maestro de la fase II del sistema de alcantarillado del municipio de Cajicá. Se seleccionó el municipio de Cajicá debido a la accesibilidad de la información hidrológica y del sistema de alcantarillado y por el interés en conocer las implicaciones hidrológicas del continuo crecimiento urbano en la zona, que en su mayoría es rural. Asimismo, se hará uso del software EPA SWMM dado que, permite implementar sistemas de control LID y conocer si la capacidad del sistema es suficiente para que no ocurran inundaciones. Los sistemas de control LID que se evaluarán son los techos verdes y azules. Para cumplir con los objetivos del presente proyecto se siguió la metodología mostrada en la Ilustración 4, la cual es explicada con mayor detalle en los siguientes apartados.

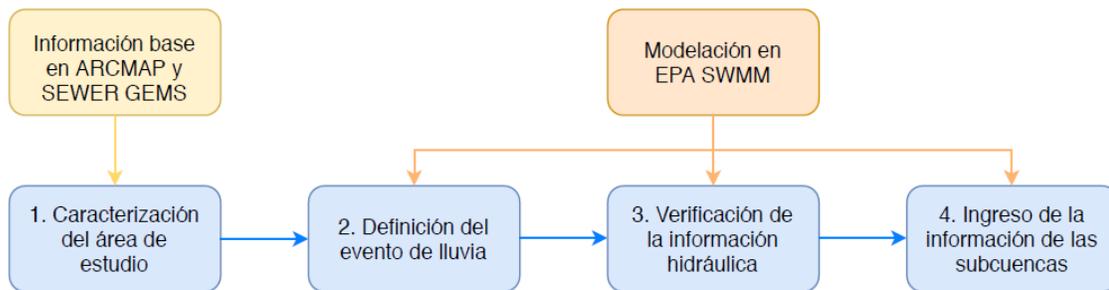
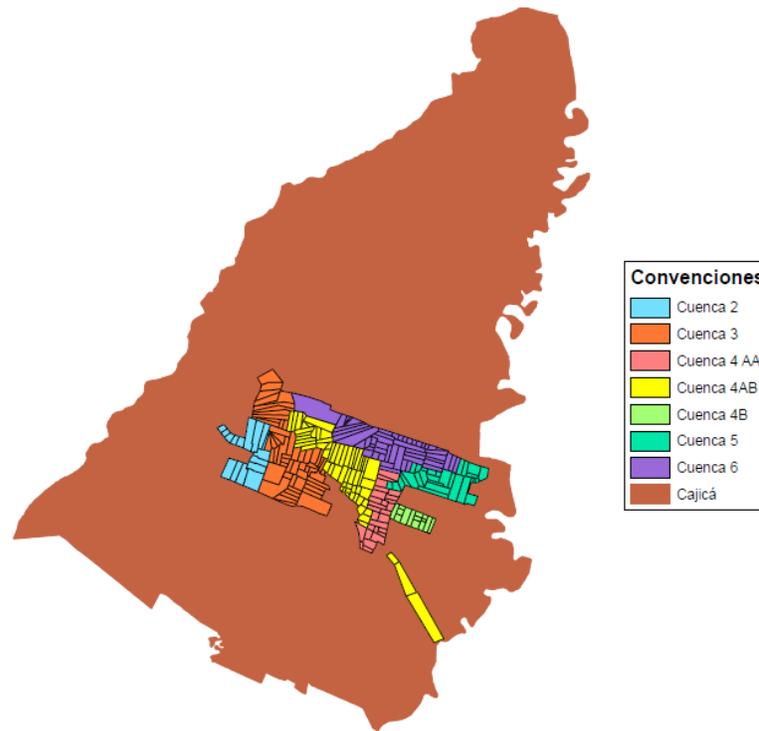


Ilustración 4. Resumen de la metodología

### 3.1. Caracterización caso de estudio: Cajicá

Cajicá es un municipio ubicado en Cundinamarca con una extensión de 53 Km<sup>2</sup> y una elevación de 2598 m.s.n.m. Hace parte de La Sabana de Bogotá y se encuentra al norte de la ciudad a una distancia de 39 Km. Limita al norte con Zipaquirá, al oeste con Tabio, al Este con Sopó y al Sur con Chía (Alcaldía Municipal de Cajicá, s.f.). En cuanto a la hidrografía, Cajicá hace parte de la cuenca alta del río Bogotá y es atravesado por el río Frío y el río Bogotá. Para efectos de analizar la inundación urbana en este municipio, se definió como zona de estudio el área urbana y suburbana de Cajicá correspondiente a 5.55 Km<sup>2</sup> y perteneciente a la etapa II del plan maestro de alcantarillado. Adicionalmente, sólo se estudiaron cinco de las seis cuencas del plan maestro, dado que, la cuenca número uno está conformada en su totalidad por vallados y se requería observar los niveles en cámaras de inspección y tuberías. En consecuencia, el área

de estudio está formada por cinco cuencas, una de ellas subdividida en tres cuencas como se muestra en la Ilustración 5.

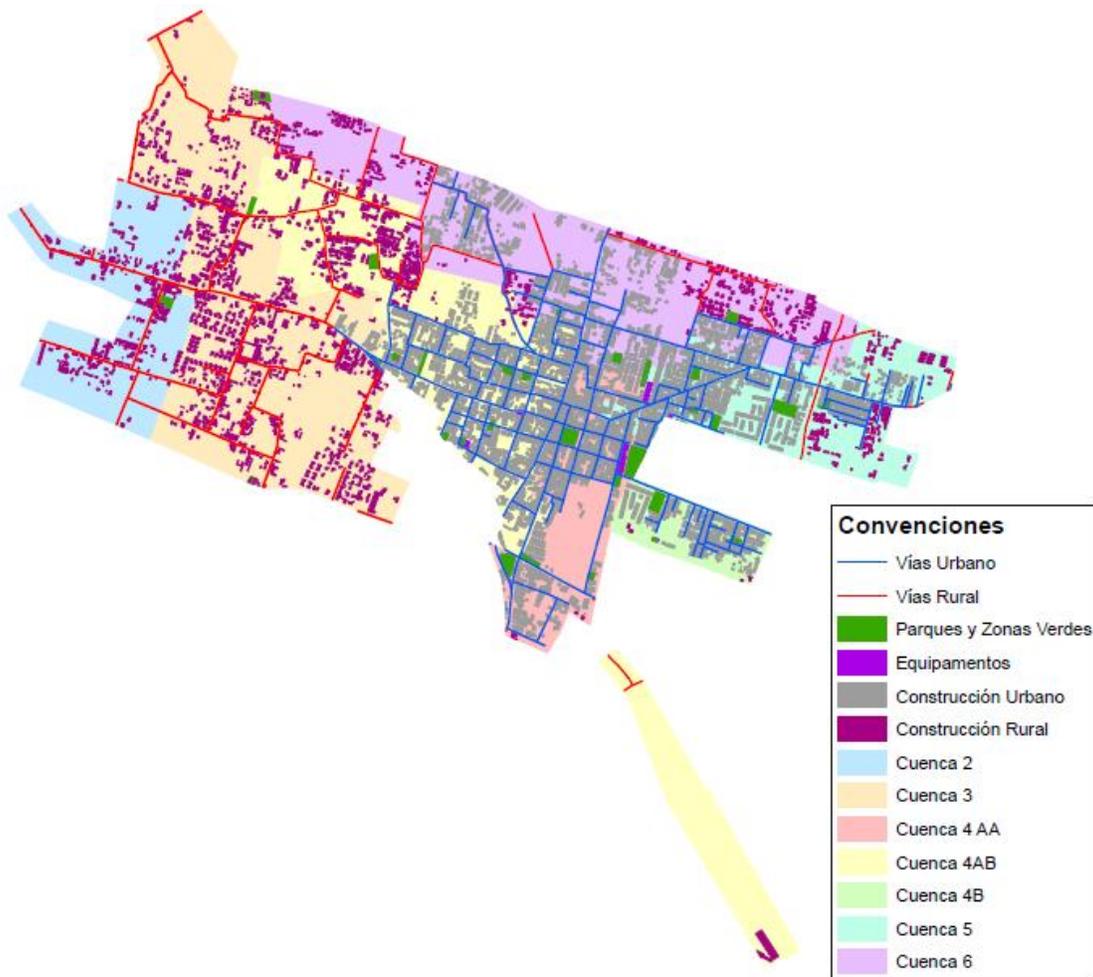


**Ilustración 5. Ubicación del área de estudio en el municipio de Cajicá**

En esta etapa de caracterización fue necesario determinar la información necesaria para el desarrollo del modelo en EPA SWMM. Esta información comprende la identificación de las construcciones (rural y urbana), malla vial, parques, zonas verdes y equipamientos para determinar el porcentaje de impermeabilidad, el número de curva y otros datos requeridas de forma ponderada. Por otro lado, también se requirió las curvas de nivel del terreno para calcular la pendiente del mismo. Para encontrar los anteriores parámetros se utilizó el software ArcMap con capas brindadas por la Consultoría Plan Maestro de Alcantarillado etapa II y las obtenidas en los modelos de SEWER GEMS también adquiridos por medio de la consultoría. Asimismo, fue necesario obtener mapas geológicos para conocer el tipo de suelo hidrológico para el cálculo del número de curva.

La identificación de las zonas impermeables y permeables se muestran en la Ilustración 6. En esta, se puede observar que la zona mayormente urbanizada corresponde a las cuencas 4AA, 4B y 5. Por otro lado, las cuencas 2 y 3 se encuentran en una zona rural o suburbana y las cuencas 4AB y 6 están localizadas se clasificarían entre zonas rurales y urbanas. Del mismo modo, en esta ilustración se puede observar que los parques y zonas verdes como espacio

público, así como los equipamientos ocupan un reducido porcentaje del total del área. Así mismo, por medio de imágenes satelitales y mapas del municipio (Ver Anexo 1 y Anexo 2)) brindados por la consultoría se identificó que la actividad residencial es el principal uso en la zona de estudio, seguido en menor medida por las actividades dotacional y comercial. Además, se observó que las edificaciones de la zona residencial son en su mayoría casas campestres de techos inclinados, lo cual es importante para la evaluación de los lugares potenciales para el emplazamiento de los techos verdes y azules.



**Ilustración 6. Distribución urbana y rural en el área de estudio**

En lo que concierne al relieve de Cajicá se determinó que en el área de estudio la elevación permanece aproximadamente igual a lo largo del terreno. Por ende, para efectos del cálculo de la pendiente fue necesario usar curvas de nivel cada 0.5 m para identificar pequeños cambios en la altura de la superficie por medio del software ArcMap. En la imagen ubicada a la izquierda Ilustración 7 se muestra cómo cambia la elevación en el municipio de Cajicá, la cual aumenta al

oeste del municipio por la presencia de montañas. Asimismo, a la derecha de la Ilustración 7 se muestra la pendiente porcentual de Cajicá, en la cual se destaca que en la zona de estudio las pendientes son muy bajas. Por último, el mapa geológico del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** expone que la geología de la zona de análisis son depósitos de terraza alta conformados por gravas y arenas.

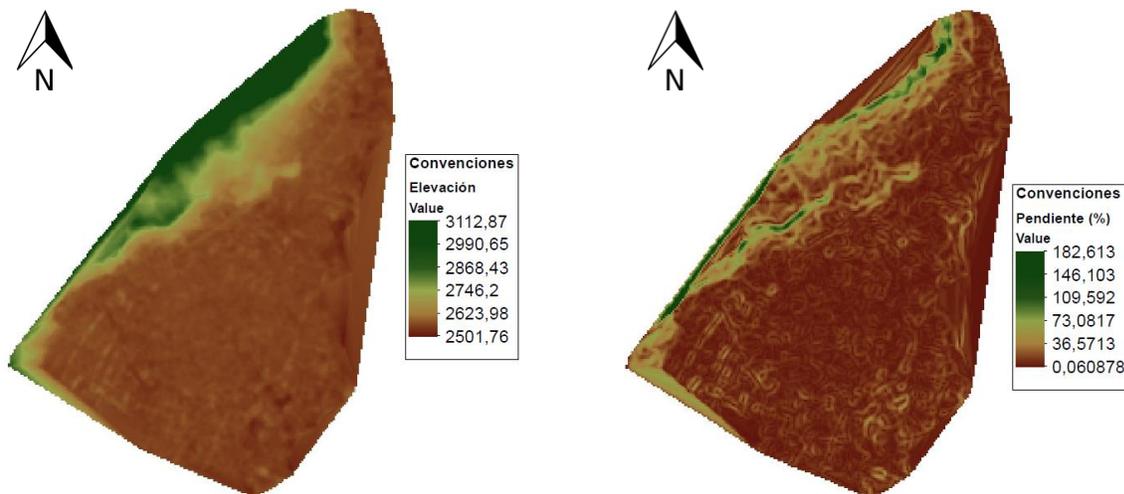


Ilustración 7. De izquierda a derecha: Elevación de Cajicá y Pendiente de Cajicá

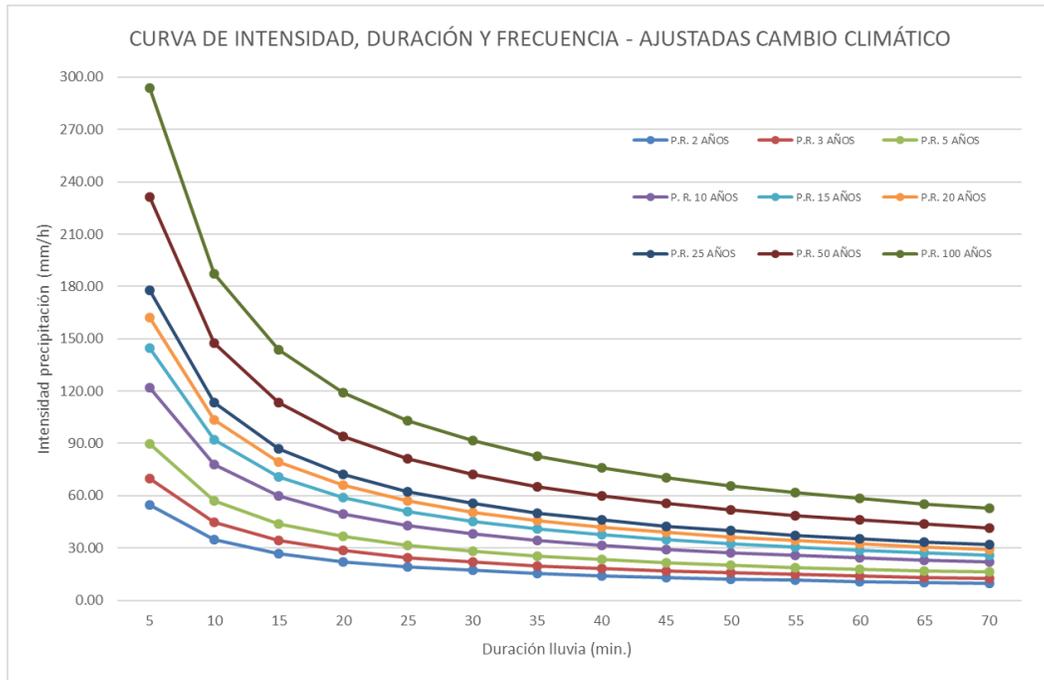
### 3.2. Modelación en EPA SWM

La modelación en EPA SWMM se desarrolla en dos etapas: La definición del evento de lluvia y la asignación de las características cuantificadas descritas anteriormente de cada una de las subcuencas que conforman una cuenca. A continuación, se explicará el proceso que llevo a cabo en cada una de estas etapas.

#### 3.2.1. Evento de lluvia

El evento de lluvia bajo el cual se hizo la evaluación de la variación del riesgo de inundación con la implementación de los sistemas de drenaje urbano sostenible se basó en las curvas IDF presentadas en el Anexo 2.2 Estudio Hidrológico del plan maestro de alcantarillado (Empresa de Servicios Públicos de Cajicá S.A E.S.P e INGEQMA, 2018). Las curvas IDF presentadas son para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años para una duración de la lluvia de setenta minutos en los escenarios con y sin cambio climático. De estas curvas se decidió seleccionar el caso más crítico correspondiente un periodo de retorno de 100 años con cambio climático (Ver Ilustración 8) . Dado que los formatos válidos de ingreso de la lluvia en EPA SWMM son intensidad (mm/h), volumen (mm) y acumulativo (mm) fue necesario el paso de las curvas IDF a alguna de estas unidades. El formato seleccionado fue intensidad y se obtuvo

mediante el método de bloques alternos descrito en el libro “*Applied Hydrology*” (Chow, V., Maidment, D. y Mays, L., 1988).



**Ilustración 8. Curvas IDF. Tomado de (Empresa de Servicios Públicos de Cajicá S.A E.S.P e INGEQMA, 2018)**

El procedimiento del método de bloque alternos consiste en tomar la intensidad dada por la curva de intensidad, duración, frecuencia para el periodo de retorno deseado. Después, dicha intensidad se pasa a una profundidad acumulada haciendo uso de la duración de la lluvia hasta un minuto en específico. Posteriormente, se obtienen las diferencias entre las profundidades acumuladas, con el objetivo de conocer el volumen de lluvia que se precipita en cada lapso de cinco minutos. Luego, se ubica la mayor profundidad en el intervalo correspondiente a la mitad de la lluvia y en orden descendente se organizan las restantes alternando entre derecha e izquierda. Finalmente, es necesario convertir las profundidades en unidades de intensidad. El hietograma de la lluvia de análisis es presentado en la Ilustración 9 y los resultados de cada uno de los pasos se muestran en la Tabla 3.



Ilustración 9. Hietograma lluvia de análisis

Tabla 3. Resultados procedimiento bloques alternos

Duración lluvia (min)	Intensidad Curvas IDF (mm/hr)	Profundidad acumulada (mm)	Profundidad incremental (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)
5	293.607	24.467	24.467	1.7	19.905
10	187.110	31.185	6.718	1.9	22.297
15	143.760	35.940	4.755	2.1	25.585
20	119.242	39.747	3.807	2.5	30.472
25	103.142	42.976	3.229	3.2	38.745
30	91.615	45.808	2.832	4.8	57.060
35	82.881	48.347	2.539	24.5	293.607
40	75.990	50.660	2.313	6.7	80.613
45	70.390	52.792	2.132	3.8	45.687
50	65.731	54.775	1.983	2.8	33.982
55	61.782	56.633	1.858	2.3	27.758
60	58.385	58.385	1.751	2.0	23.797
65	55.425	60.044	1.659	1.8	21.015
70	52.818	61.621	1.578	1.6	18.933

### 3.2.2. Modelación de las subcuencas

Este paso consiste en el ingreso de la información hidráulica y física de cada una de las subcuencas en el software EPA SWMM. Para ello, se hizo uso de los modelos de la red de drenaje brindados por la consultoría del plan maestro de alcantarillado etapa II en SewerGEMS. Dado que, este software permite exportar los modelos de las cuencas a la última versión de SWMM. No obstante, al exportar el modelo sólo permanece las propiedades hidráulicas de la red de drenaje, es decir, se pierde información sobre las características de las

subcuencas, tales como el área y el pozo de descarga. Por otra parte, el formato de los archivos empleados por EPA SWMM (.inp) son compatibles con el formato del bloc de notas (.txt). Lo cual permitió hacer más breve la creación de los documentos para correr los diferentes escenarios de interés para el análisis.

### 3.2.2.1. Modelación hidráulica

Como se mencionó con anterioridad, el modelo exportado a EPA SWMM contiene la información hidráulica de las redes de alcantarillado de cada una de las cuencas de estudio. Esta información se compone de las propiedades de las cámaras de inspección (pozos), salidas, tuberías y canales. De igual forma, se verificó que las características de los componentes hidráulicos, tales como cotas, diámetros y longitudes sean iguales al modelo original de SewerGEMS. En la Tabla 4 se muestra las propiedades de los componentes del sistema hidráulico definidos en EPA SWMM.

**Tabla 4. Propiedades de los componentes hidráulicos**

Componente	Propiedad
<b>Nodos (Pozos o cámaras de inspección)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre</li> <li>• Coordenadas (X y Y)</li> <li>• Caudal de entrada externo</li> <li>• Tratamiento</li> <li>• Elevación invertida (m)</li> <li>• Profundidad máxima (m)</li> <li>• Profundidad inicial (m)</li> <li>• Profundidad de sobrecarga (m)</li> <li>• Área ponderada (m<sup>2</sup>)</li> </ul>
<b>Salidas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre</li> <li>• Coordenadas (X y Y)</li> <li>• Caudal de entrada externo</li> <li>• Tratamiento</li> <li>• Elevación invertida (m)</li> <li>• Compuerta de marea</li> <li>• Tipo (libre, normal, fijo, marea vs. Hora del día o series de tiempo)</li> </ul>
<b>Tuberías y canales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre</li> <li>• Nodo de entrada</li> <li>• Nodo de salida</li> <li>• Forma</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad máxima (m)</li> <li>• Longitud (m)</li> <li>• Rugosidad</li> <li>• Elevación invertida de la tubería por encima de la elevación del invertida del nodo de entrada y salida (m)</li> <li>• Caudal inicial (unidades de caudal)</li> <li>• Caudal máximo (unidades de caudal)</li> <li>• Coeficientes pérdida de energía de entrada, salida y promedio</li> <li>• Compuerta (si, no)</li> </ul>
--	--

### 3.2.2.2. Modelación física

La modelación física se fundamenta en los datos recolectados en la sección 3.1. Caracterización caso de estudio: Cajicá con ayuda de ArcMap y otras características de las subcuencas obtenidas de SewerGEMS. En la Tabla 5 se presentan las propiedades que son requeridas por EPA SWMM, las características que fueron calculadas e ingresadas serán explicadas en las siguientes secciones y las restantes se dejaron por defecto del programa.

**Tabla 5. Propiedades de la subcuenca**

Componente	Propiedad
<b>Subcuenca</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre</li> <li>• Coordenadas (X y Y)</li> <li>• Pluviómetro o evento de lluvia</li> <li>• Nodo de descarga</li> <li>• Área (Ha)</li> <li>• Ancho (m)</li> <li>• Pendiente (%)</li> <li>• Área impermeable (%)</li> <li>• N Manning área impermeable</li> <li>• N Manning área permeable</li> <li>• Profundidad de almacenamiento área impermeable (m)</li> <li>• Profundidad de almacenamiento área permeable (m)</li> <li>• Área impermeable sin almacenamiento (%)</li> <li>• Ruta de la escorrentía (salida, impermeable y permeable)</li> <li>• Transporte de escorrentía entre subáreas (%)</li> </ul>

#### 3.2.2.2.1. Evento de lluvia

El evento de lluvia hace alusión a la precipitación que cae sobre la cuenca, la cual fue definida en el aparte 183.2.1 Evento de lluvia y describe la intensidad de lluvia para un periodo de retorno de 100 años más cambio climático.

#### 3.2.2.2.2. Nodo de descarga

El nodo de descarga corresponde al pozo que recibe la escorrentía generada en la subcuenca. Este dato se obtuvo en la opción de “*Flextables - Catchment*” de SewerGEMS, en la cual se encuentra información relacionada con la topología, identificación, geometría, caudales, evento de lluvia, resultados y escorrentía de todas las subcuencas.

#### 3.2.2.2.3. Área

El área corresponde a la extensión superficial de cada una de las subcuencas. Esta cifra al igual que el nodo de descarga se obtuvo de SewerGEMS en la opción “*Flextables – Catchment*”.

#### 3.2.2.2.4. Ancho

El ancho es la ruta superficial que recorre la escorrentía. Se puede estimar partiendo de la longitud máxima de flujo, la cual es el punto más alejado de la subcuenca hasta el lugar en que se canaliza este caudal. Siendo este punto un pozo dentro de la misma subcuenca o la descarga a la siguiente subcuenca. Una vez obtenido esa longitud, se usa como divisor del área. Por ende, para calcularlo se usaron las capas de la geometría, los nodos y las tuberías de las cuencas exportadas de SewerGEMS. En estas fue posible medir la longitud máxima de que puede recorrer la escorrentía superficial midiendo la distancia desde los extremos de la subcuenca hasta el nodo de descarga, para luego dividir el área entre esa distancia.

#### 3.2.2.2.5. Pendiente

La pendiente hace referencia a la inclinación promedio de la superficie de las subcuencas. Para estimar este valor, se generó un modelo digital de elevación (DEM) con la pendiente medida en porcentaje de Cajicá en el software ArcMap. Los modelos de elevación son representaciones visuales del relieve de un terreno, están conformados por celdas que representan a un área y contienen información de la elevación o la pendiente en este caso (ArcGIS, s.f.). Para realizarlo, el primer paso a seguir es el paso de las curvas de nivel a una superficie TIN por medio de la herramienta *Create TIN*, una superficie TIN es una red de triángulos que han sido interpolados por el método Delaunay con el fin de representar la morfología del terreno (ArcMap 10.3, s.f.). Posteriormente, la superficie TIN es convertida en una capa ráster que corresponde al modelo de elevación digital (DEM) por medio de la herramienta *TIN to Raster*. Luego, por medio de la opción *Slope* la matriz de celdas del ráster pasa a contener información de la pendiente en porcentaje en lugar de la altura del suelo. Finalmente, en la opción *Zonal Statistics as Table* se ingresa el modelo de elevación digital y la

capa con la geometría de la cuenca para así obtener la pendiente promedio en cada una de las subcuencas.

#### 3.2.2.2.6. Área impermeable

El área impermeable es la extensión de superficie que ha sido urbanizada, es decir, se ha reemplazado la cobertura vegetal con superficies impermeables como el pavimento y el concreto. Por ende, para su estimación fue necesario cuantificar el área correspondiente a las zonas impermeables por subcuenca mediante el ingreso en la función *Intersect* de ArcMap de las capas de la geometría de la cuenca y los sectores impermeables previamente identificados en la sección 3.1 Caracterización caso de estudio: Cajicá: construcción urbana, construcción rural, equipamientos, vías urbanas y vías rurales (asumiendo un ancho de las vías de 7 m acorde con lo evidenciado en imágenes satelitales de la zona). Una vez se obtiene la cifra del área impermeable se divide entre el área total de cada una de las subcuencas para así calcular el porcentaje.

#### 3.2.2.2.7. N Manning área impermeable y permeable

El n de Manning es un coeficiente de rugosidad que explica la resistencia que opone el material de una superficie a la circulación del flujo (Fernández, 2018). Para el área impermeable se eligió un valor que no correspondiera a una superficie lisa y tuviera relación con el área de estudio constituida en su mayoría por construcciones de mampostería, siendo esta cifra 0.014 correspondiente al ladrillo con mortero de cemento. Asimismo, el n de Manning seleccionado para el área permeable es el promedio de los coeficientes correspondientes a pradera de césped corto (0.15) y césped denso (0.24), los cuales son característicos del área de estudio según lo observado en las imágenes satelitales. Los valores que se usaron como referencia para el n de Manning se encuentran en la Tabla 6.

**Tabla 6. N de Manning superficies. Tomado de (McCuen R., Johnson P. y Ragan, R., 2002)**

<b>n</b>	<b>Superficie</b>
0.011	Asfalto liso
0.012	Concreto liso
0.013	Recubrimiento de concreto
0.014	Buena madera
0.014	Ladrillo con mortero de cemento
0.015	Arcilla vitrificada
0.015	Hierro fundido
0.024	Tubos de metal corrugado
0.024	Escombros de cemento
0.050	Terreno barbecho (sin residuos)
<b>n</b>	<b>Suelos cultivados</b>
0.060	Cubierta de residuos ≤20%
0.170	Cubierta de residuos >20%

0.130	Rango (natural)
<b>n</b>	<b>Césped</b>
0.150	Pradera con césped corto
0.240	Césped denso
0.410	Césped bermuda
<b>n</b>	<b>Bosque</b>
0.400	Maleza ligera
0.800	Maleza densa

#### 3.2.2.2.8. Profundidad de almacenamiento área impermeable y permeable

Esta variable describe la profundidad de agua que puede ser acumulada en las depresiones de las zonas impermeables y permeables de las subcuencas. En primer lugar, para la zona impermeable se usó el promedio de las profundidades de almacenamiento correspondiente a impermeable en la Tabla 7. Del mismo modo, la profundidad en las zonas permeables se determinó con el promedio ponderado entre la profundidad asignada a parques y zonas verdes (2.54mm) y la asignada a las zonas que no han sido intervenidas (3.81, el cual es el promedio entre las profundidades asociadas a césped de la Tabla 7).

**Tabla 7. Profundidad de almacenamiento en zonas impermeables y permeables. Adaptada de (ASCE, 1992)**

<b>Superficie</b>	<b>Profundidad de almacenamiento (mm)</b>
Impermeable	1.27 - 2.54
Césped	2.54 - 5.08
Pasto	5.08
Reserva forestal	7.62

#### 3.2.2.2.9. Área impermeable sin almacenamiento

Este parámetro alude al porcentaje de área que no tiene depresiones para el almacenamiento de lluvia. Para su determinación se empleó el supuesto de que las construcciones urbanas y rurales conformadas en su mayoría por residencias no pueden almacenar agua por la comodidad y seguridad que deben brindar a las personas. Por consiguiente, se asumió que las vías y equipamientos tienen depresiones debido a las deficiencias en la malla vial rural y variabilidad en la geometría y materiales usados en los equipamientos, tales como, escenarios deportivos, escuelas, estación del tren, entre otros.

### 3.2.3. Modelación del método de infiltración

Se seleccionó como método de infiltración el Número de Curva desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos debido a que considera el tipo de suelo, el uso de suelo y las condiciones previas de humedad. En EPA SWMM se requiere ingresar el número de curva, la conductividad que es un factor que se desprecia en el cálculo y el tiempo de secado.

En primer lugar, para obtener el número de curva se considera el grupo hidrológico del suelo y el uso del mismo. En cuanto al grupo hidrológico se definió que el suelo es tipo B según lo descrito en el numeral 1.5 Método de infiltración: Número de curva, dado que, está conformado por depósitos de terraza alta, los cuales están compuestos por suelos finos, arenas y gravas. Una vez definido el tipo de suelo, se definió el número de curva para las superficies impermeables usando como referencia los valores presentados en el Anexo 4 y en las zonas que no han sido intervenidas el valor correspondiente a prados en el Anexo 5. En segundo lugar, el tiempo de secado corresponde a los días en que tarda en secarse un suelo completamente saturado, típicamente este valor oscila entre 2 y 14 días (Rosman, 2015). Para el análisis se decidió usar el valor de secado mínimo de 2 días. Finalmente, el número de curva por subcuenca se calculó como el promedio ponderado del número de curva de todos los usos de suelo.

**Tabla 8. Números de curva asociados a los usos del suelo característicos del área de estudio**

Uso del suelo	Número de curva
Zonas no construidas (prados)	58
Parques y zonas verdes	69
Construcción urbana y rural	79
Malla vial urbana y rural	89
Equipamentos	92

#### **3.2.4. Características promedio de las cuencas de estudio**

En esta sección de la Tabla 9 a la Tabla 15 se mostrarán algunas de las características promedio modeladas en las cuencas de estudio, con el fin de mostrar el grado de desarrollo urbano en cada una de ellas. En cuanto a las redes de drenaje se evidenció que existen tres cuencas con presencia de canales de sección trapezoidal, a diferencia del resto una de ellas tiene dos puntos de salida. Del mismo modo, se observó que la red con mayor número de tuberías se encuentra en la cuenca con mayor extensión, es decir, la cuenca 3. Por otro lado, la cuenca con menor área es la cuenca 4B, que a su vez es la que posee el mayor porcentaje de impermeabilización, elevado porcentaje de superficie impermeable sin almacenamiento y el mayor número de curva correspondiente a este tipo de suelo a una cobertura residencial o con una condición regular de prados. Asimismo, la cuenca 2 es la que presenta un reducido porcentaje de impermeabilidad y el menor número de curva correspondiente a amplias praderas. En cuanto a las demás características se encontró que la pendiente está entre 5.6% y 6.8%, el almacenamiento permeable entre 3.71 a 3.81 mm y el área impermeable sin almacenamiento oscila entre 62.3% y 73.5%, lo cual indica que la mayor parte de la superficie impermeable pertenece a residencias según como se definió esta variable.

Tabla 9. Características Cuenca 2

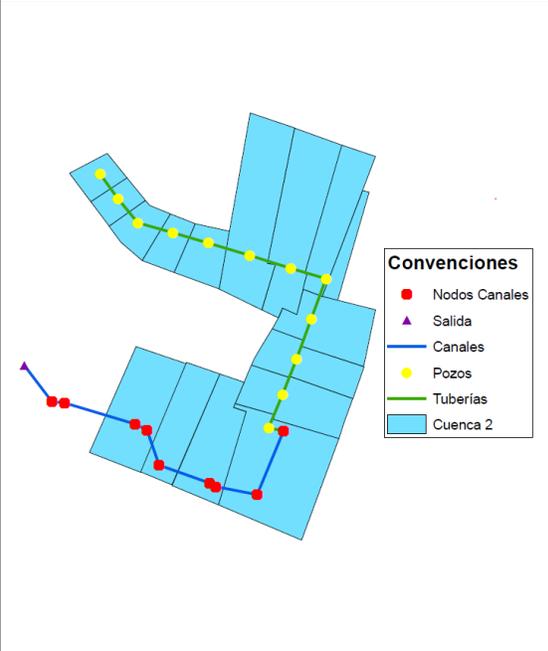
Cuenca 2	
 <p><b>Convenciones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Nodos Canales</li> <li>▲ Salida</li> <li>— Canales</li> <li>● Pozos</li> <li>— Tuberías</li> <li>■ Cuenca 2</li> </ul>	<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos: 12</li> <li>● Nodos Canales: 9</li> <li>● Salida: 1</li> <li>● Tuberías: 12</li> <li>● Canales: 9</li> </ul> <p><b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Área (Ha): 52.53</li> <li>● No. Subcuencas: 16</li> <li>● Pendiente promedio (%): 6.60</li> <li>● Área impermeable promedio (%): 10.91</li> <li>● Área impermeable sin almacenamiento (%): 62.53</li> <li>● Almacenamiento permeable (mm): 3.81</li> </ul> <p><b>INFILTRACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Número de curva promedio: 60.68</li> </ul>

Tabla 10. Características Cuenca 3

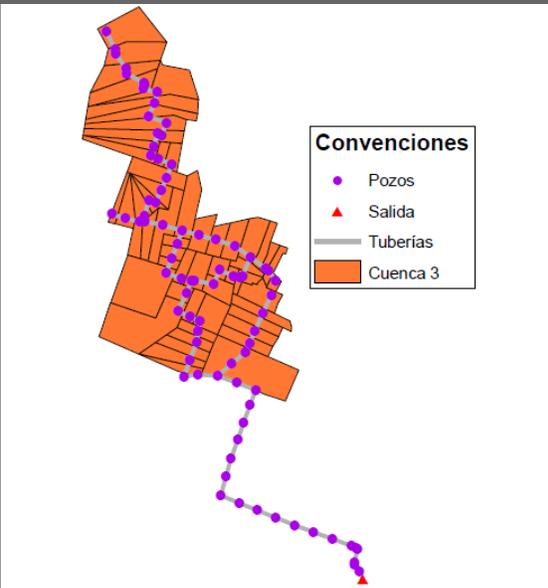
Cuenca 3	
 <p><b>Convenciones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos</li> <li>▲ Salida</li> <li>— Tuberías</li> <li>■ Cuenca 3</li> </ul>	<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos: 83</li> <li>● Salida: 1</li> <li>● Tuberías: 83</li> </ul> <p><b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Área (Ha): 144.90</li> <li>● No. Subcuencas: 57</li> <li>● Pendiente promedio (%): 5.82</li> <li>● Área impermeable promedio (%): 15.68</li> <li>● Área impermeable sin almacenamiento (%): 68.20</li> <li>● Almacenamiento permeable (mm): 3.80</li> </ul> <p><b>INFILTRACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Número de curva promedio: 61.80</li> </ul>

Tabla 11. Características Cuenca 4AA

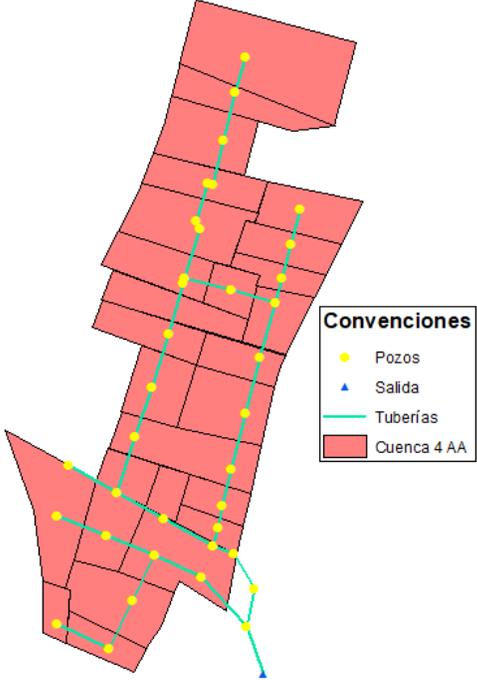
Cuenca 4AA	
	<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pozos: 36</li> <li>• Salida: 1</li> <li>• Tuberías: 36</li> </ul> <p><b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área (Ha): 48.06</li> <li>• No. Subcuencas: 27</li> <li>• Pendiente promedio (%): 6.79</li> <li>• Área impermeable promedio (%): 35.65</li> <li>• Área impermeable sin almacenamiento (%): 62.35</li> <li>• Almacenamiento permeable (mm): 3.71</li> </ul> <p><b>INFILTRACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de curva promedio: 67.13</li> </ul>

Tabla 12. Características Cuenca 4AB

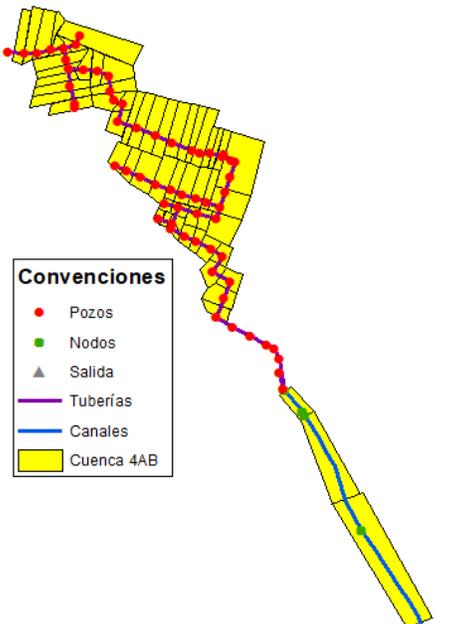
Cuenca 4AB	
	<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pozos: 62</li> <li>• Nodos Canales: 4</li> <li>• Salida: 1</li> <li>• Tuberías: 62</li> <li>• Canales: 4</li> </ul> <p><b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área (Ha): 121.51</li> <li>• No. Subcuencas: 61</li> <li>• Pendiente promedio (%): 6.73</li> <li>• Área impermeable promedio (%): 31.45</li> <li>• Área impermeable sin almacenamiento (%): 66.45</li> <li>• Almacenamiento permeable (mm): 3.78</li> </ul> <p><b>INFILTRACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de curva promedio: 65.80</li> </ul>

Tabla 13. Características Cuenca 4B

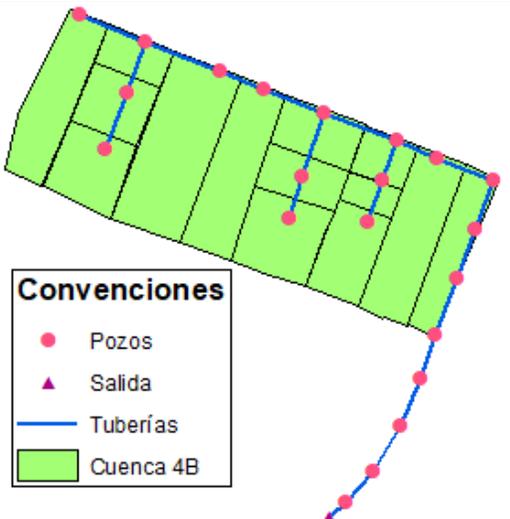
Cuenca 4B	
 <p><b>Convenciones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos</li> <li>▲ Salida</li> <li>— Tuberías</li> <li>■ Cuenca 4B</li> </ul>	<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos: 21</li> <li>● Salida: 1</li> <li>● Tuberías: 21</li> </ul> <p><b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Área (Ha): 17.97</li> <li>● No. Subcuencas: 14</li> <li>● Pendiente promedio (%): 6.53</li> <li>● Área impermeable promedio (%): 40.42</li> <li>● Área impermeable sin almacenamiento (%): 73.44</li> <li>● Almacenamiento permeable (mm): 3.71</li> </ul> <p><b>INFILTRACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Número de curva promedio: 68.15</li> </ul>

Tabla 14. Características Cuenca 5

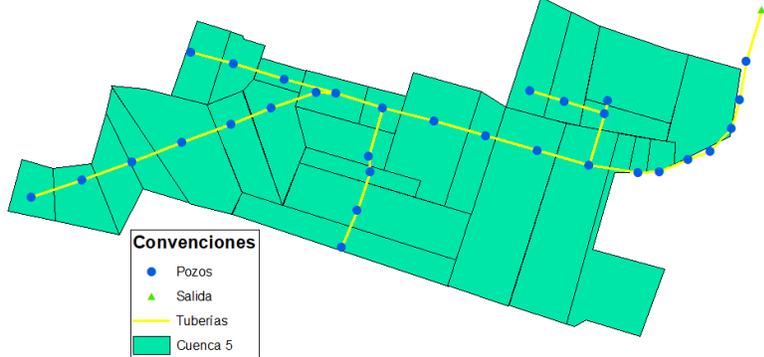
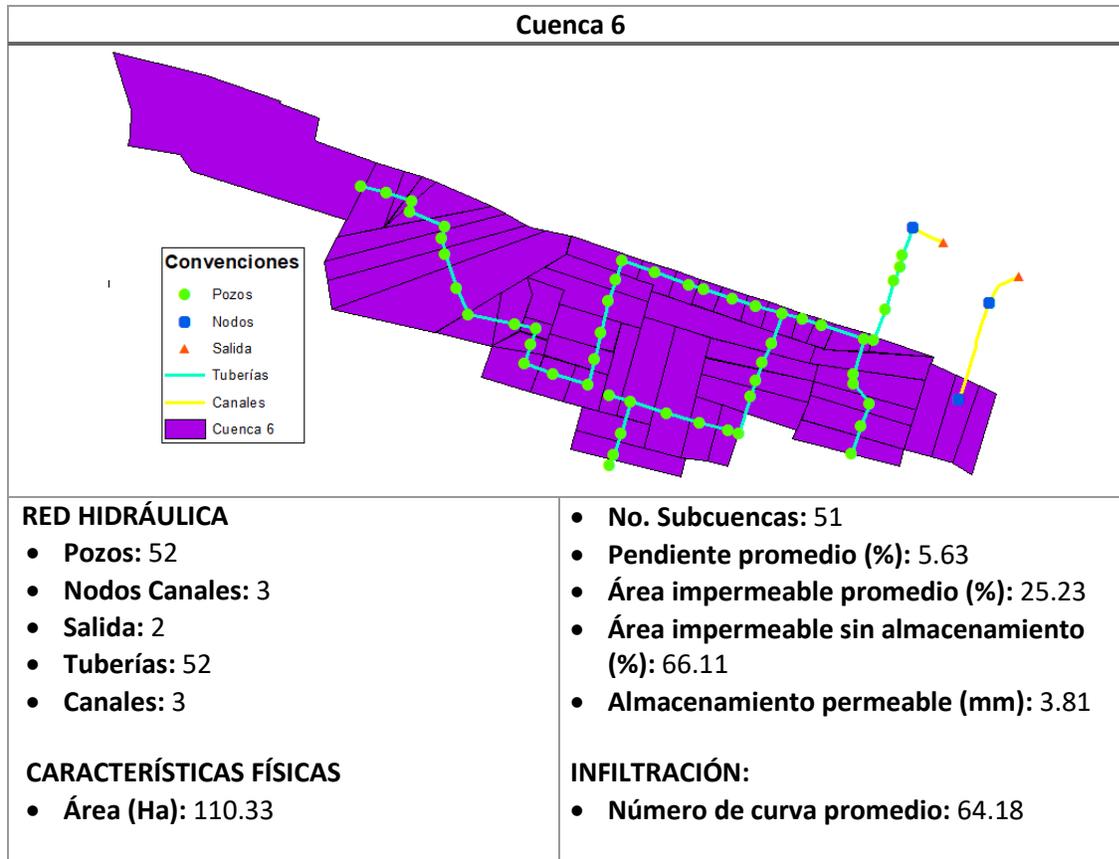
Cuenca 5	
 <p><b>Convenciones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos</li> <li>▲ Salida</li> <li>— Tuberías</li> <li>■ Cuenca 5</li> </ul>	
<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pozos: 31</li> <li>● Salida: 1</li> <li>● Tuberías: 31</li> </ul> <p><b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Área (Ha): 59.88</li> <li>● No. Subcuencas: 28</li> </ul>	<p><b>RED HIDRÁULICA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pendiente promedio (%): 5.80</li> <li>● Área impermeable promedio (%): 37.93</li> <li>● Área impermeable sin almacenamiento (%): 69.08</li> <li>● Almacenamiento permeable (mm): 3.77</li> </ul> <p><b>INFILTRACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Número de curva promedio: 67.47</li> </ul>

Tabla 15. Características Cuenca 6



### 3.3. Análisis planteados

Para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto se definió que era necesario realizar tres tipos de análisis. El primero está relacionado con el cambio en el comportamiento hidrológico de las cuencas cuando se afecta la impermeabilidad de la misma. El segundo se encuentra ligado con la determinación de las propiedades de las alternativas SUDS a implementar. El último responde a la pregunta de ¿la incorporación de techos verdes y azules permite reducir el riesgo de inundación urbana?.

#### 3.3.1. Análisis de sensibilidad parámetros impermeabilidad

Con la finalidad de evaluar la influencia del cambio en la impermeabilidad de las cuencas se definieron estudiar los siguientes parámetros: Número de curva en función del porcentaje de área impermeable, la profundidad de almacenamiento en el área impermeable y el porcentaje sin almacenamiento de la zona impermeable.

### 3.3.1.1. Análisis número de curva

Para este análisis se decidió variar el área impermeable en el rango de 50% a 100% con incrementos de 10% para números de curva en cuatro escenarios. Cada uno de estos escenarios refleja el cambio del uso de suelo en Cajicá: escenario 1 (pavimentos), escenario 2 (zona comercial y de negocios), escenario 3 (zona industrial) y escenario 4 (zona residencial). En la Tabla 16 se muestra los números de curva usados en cada escenario por cada porcentaje de impermeabilidad, para obtener esos números se usó un promedio ponderado entre el área impermeable con los números de curva correspondientes al 100% y el área permeable con el número de curva de 61 que hace referencia a zonas con hierba.

Tabla 16. Análisis número de curva

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos	Escenario 2: Zona comercial y de negocios	Escenario 3: Zona industrial	Escenario 4: Zona residencial
50	79.5	76.5	74.5	73
60	83.2	79.6	77.2	75.4
70	86.9	82.7	79.9	77.8
80	90.6	85.8	82.6	80.2
90	94.3	88.9	85.3	82.6
100	98	92	88	85

### 3.3.1.2. Profundidad de almacenamiento en el área impermeable

Se decidió variar este parámetro en el rango de valores típicos (0mm a 2.5mm) con incrementos de 5mm con el fin de conocer si tiene una influencia significativa en el caudal de salida de cada una de las cuencas.

### 3.3.1.3. Porcentaje sin almacenamiento de la zona impermeable

Debido a que el porcentaje sin almacenamiento en la zona impermeable promedio de las cuencas se encuentra entre 62.3 y 73.5 se determinó que esta variable se debía variar entre 70% y 100% con incremento de 10% para conocer cómo afecta el aumento de este porcentaje.

## 3.3.2. Análisis de sensibilidad propiedades SUDS

Las alternativas de sistemas urbanos de drenaje sostenible a evaluar son los techos verdes y los techos azules. Este análisis de sensibilidad se efectuó en el escenario actual, es decir, bajo los usos de suelo y construcciones existentes hasta el momento. Debido a la alta presencia de techos con pendientes aproximadas al 30% se definió que los techos azules sólo se podían usar en la mitad de las construcciones urbanas y los techos verdes en la totalidad de construcciones rurales y la otra mitad de las construcciones urbanas.

La modelación de los techos verdes comprende la definición de las propiedades de los tres estratos que los conforman (Superficie, suelo y drenaje), para estos se plantearon tres tipos (TV 1, TV 2, TV 3) a partir de la variación de los parámetros y las diferentes clases de suelo. El primer techo verde usa marga arenosa, el segundo usa marga y el último utiliza marga limosa, los cuales son composiciones de tierra apta para vegetación. Para la definición de los valores de los diferentes tipos de techos verdes planteados se usó la información brindada en el manual de EPA SWMM versión 5.1 (Rosman, 2015) y en la Tabla 17 se presentan dichos valores.

**Tabla 17. Propiedades modeladas de los techos verdes**

<b>Estrato</b>	<b>Propiedad</b>	<b>TV1</b>	<b>TV 2</b>	<b>TV 3</b>
<b>Superficie</b>	Altura berma (mm)	0	1	2
	Vegetación (fracción volumen)	0.1	0.15	0.2
	Superficie	0.15	0.15	0.41
	Pendiente (%)	30	30	30
<b>Suelo</b>	Espesor (mm)	76.2	114.3	152.4
	Porosidad (fracción volumen)	0.453	0.463	0.501
	Capacidad (fracción volumen)	0.19	0.232	0.284
	Punto de marchitez (fracción volumen)	0.085	0.116	0.135
	Conductividad (mm/h)	10.92	3.302	6.604
	Conductividad pendiente	30	45	60
	Cabeza de succión (mm)	109.98	88.9	169.926
<b>Drenaje</b>	Espesor (mm)	25.4	38.1	50.8
	Fracción de vacíos	0.5	0.5	0.6
	Rugosidad	0.1	0.1	0.4

Por otro lado, la modelación de los techos azules consiste en el ingreso de las propiedades de la superficie mostradas en la Tabla 18. Estas propiedades se definieron en base a lo consultado en el marco teórico y dado que, EPA SWMM no tiene predefinido el control LID techo azul se usó “*Rooftop Disconnection*” bajo el supuesto que el techo no puede almacenar el agua por periodos prolongados de tiempo y, por el contrario, constantemente esta drenando el agua por medios mecánicos o no mecánicos.

**Tabla 18. Propiedades modeladas techos azules**

<b>Superficie</b>	<b>Valor</b>
<b>Profundidad de almacenamiento (mm)</b>	70
<b>Rugosidad</b>	0.015
<b>Pendiente (%)</b>	0

### 3.3.3. Análisis de riesgo de inundación

El análisis de riesgo de inundación se hará con la sumatoria de los volúmenes de inundación obtenidos en la opción “*Node Flooding*” de EPA SWMM. Se realizará dos análisis de la reducción del riesgo de inundación al implementar sistemas de drenaje urbano sostenible. El primero corresponde a la evaluación en el escenario actual con las tres combinaciones de techos verdes y azules. Por otra parte, el segundo quiere determinar si la implementación de SUDS tiene una influencia significativa en el caso de que Cajicá continúe con un alto proceso de urbanización. Adicionalmente, este análisis evalúa individualmente los techos verdes y los techos azules en el 90% del área de las subcuencas en el caso del 90% de área impermeable de cada uno de los escenarios del número de curva. Se seleccionó este porcentaje porque al observar imágenes satelitales de las ciudades más urbanizadas del mundo como Tokio (Japón) y Cantón (China) el área permeable era cercana al 10% y pertenecía a fuentes hídricas o parques. Del mismo modo, se decidió usar el mejor tipo de techo verde (TV 3) evaluado por la reducción del riesgo de inundación y caudal de salida.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de sensibilidad de los parámetros que dan cuenta del nivel de impermeabilización de la cuenca y las propiedades de los sistemas urbanos de drenaje sostenible se realizaron con respecto a los resultados obtenidos en las condiciones actuales. Este análisis se realizó para el caudal pico de salida, los volúmenes de inundación y el coeficiente de escorrentía, el cual muestra el porcentaje de la lluvia que se convierte en escorrentía. Estos resultados se muestran en la Tabla 19. Del mismo modo, los porcentajes calculados para determinar la sensibilidad se obtuvieron con la Ecuación 4 y se encuentran resaltados en color gris.

**Tabla 19. Resultados obtenidos en condiciones actuales**

Cuenca	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L
<b>Cuenca 2</b>	742.43	0.201	2.429
<b>Cuenca 3</b>	1665.36	0.247	10.609
<b>Cuenca 4AA</b>	995	0.474	10.437
<b>Cuenca 4AB</b>	1686.63	0.419	17.88
<b>Cuenca 4B</b>	284.11	0.517	3.709
<b>Cuenca 5</b>	580.57	0.486	12.513
<b>Cuenca 6</b>	2746.99	0.390	8.037

**Ecuación 4. Cálculo de sensibilidad**

$$Sensibilidad = \frac{v_f - v_i}{v_f} * 100$$

#### 3.1. Análisis de sensibilidad parámetros de impermeabilidad

##### 3.1.1. Análisis número de curva

En el análisis de número de curva se encontró que la variación de los números de curva entre escenarios no tiene efectos significativos en el hidrograma de salida y caudal pico, pues estas gráficas son muy similares. Según los hidrogramas mostrados en anexos para cada una de las cuencas, los hidrogramas correspondientes al mismo porcentaje de área impermeable en cada uno de los escenarios seguía el mismo comportamiento, es decir, al mismo tiempo iniciaba el tránsito de la creciente y subía o bajaba el caudal. Asimismo, se determinó que la al número de curva depende del modelo, pues este nivel de influencia cambió en cada una de las cuencas en

tres rangos definidos: Baja: 0%-33%, Media:34% - 67% y Alta:68%-100%. A partir de la anterior afirmación, se evidenció que en algunas cuencas el cambio en el porcentaje en el área impermeable y el número de curva no tenía efecto en el caudal pico de salida debido a la presurización existente en las tuberías de las cuencas.

En cuanto a la cuenca 2 se estableció que el número de curva tiene una sensibilidad media a alta en el modelo. Debido a que, tuvo un efecto en el incremento del caudal pico mayor al 50% y en el coeficiente de escorrentía superior al 70% (VerTabla 20). Asimismo, tuvo una influencia notable en los tiempos y volúmenes de descarga de la cuenca, pues en la condición actual el caudal permanecía aproximadamente constante durante media hora al llegar a su caudal pico de 742 LPS, en los escenarios de impermeabilidad no presenta caudales constantes y en el minuto 45 llega a un pico superior al doble del obtenido en el caso actual (Ver Anexo 6).

**Tabla 20. Análisis número de curva Cuenca 2**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
50	1614.41	0.67	1605.92	0.65	1600.53	0.64	1597.44	0.63
	54.01%	70.18%	53.77%	69.11%	53.61%	68.43%	53.52%	67.95%
60	1659.29	0.77	1656.18	0.74	1654	0.73	1652.31	0.72
	55.26%	73.98%	55.17%	73.07%	55.11%	72.51%	55.07%	72.11%
70	1669.69	0.86	1669.18	0.83	1668.87	0.82	1668.62	0.81
	55.53%	76.60%	55.52%	75.85%	55.51%	75.41%	55.51%	75.10%
80	1673.81	0.93	1673.40	0.90	1673.25	0.89	1673.17	0.88
	55.64%	78.39%	55.63%	77.83%	55.63%	77.51%	55.63%	77.29%
90	1676.98	0.98	1676.54	0.96	1676.4	0.96	1676.35	0.95
	55.73%	79.51%	55.72%	79.19%	55.71%	79.02%	55.71%	78.91%
100	1678.72	1.01	1678.72	1.01	1678.72	1.01	1678.72	1.01
	55.77%	80.05%	55.77%	80.05%	55.77%	80.05%	55.77%	80.05%

**\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada**

En lo que respecta a la cuenca 3, el número de curva presenta una sensibilidad baja en el incremento de caudal pico de salida y una sensibilidad media alta en el coeficiente de escorrentía (Ver Tabla 21). Por otro lado, el hidrograma de salida presenta una forma peculiar al no tener un único pico, por el contrario, aumenta rápidamente al inicio, luego permanece constante por la condición de presurización de la tubería que al exceder la capacidad del sistema permite la salida del agua y finalmente disminuye el caudal en un tiempo prolongado. De modo que, los efectos del número de curva se evidencian en los tiempos en que inicia el tránsito de la creciente, dado que, al haber mayor porcentaje de impermeabilidad el agua fluye más rápido y por ende empieza a salir antes del sistema, dando lugar a diferencias de tiempo de 15 minutos entre el escenario más crítico de impermeabilidad 100% y las condiciones actuales (Ver anexo 7).

**Tabla 21. Análisis número de curva Cuenca 3**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
50	1679.38	0.67	1679.38	0.65	1679.38	0.63	1679.41	0.62
	0.83%	63.16%	0.83%	61.83%	0.83%	60.99%	0.84%	60.39%
60	1679.44	0.77	1679.40	0.74	1679.39	0.73	1679.39	0.72
	0.84%	67.89%	0.84%	66.76%	0.84%	66.07%	0.84%	65.58%
70	1679.42	0.86	1679.42	0.83	1679.42	0.82	1679.59	0.81
	0.84%	71.16%	0.84%	70.23%	0.84%	69.68%	0.85%	69.30%
80	1679.42	0.93	1679.43	0.91	1679.42	0.89	1679.43	0.88
	0.84%	73.38%	0.84%	72.69%	0.84%	72.29%	0.84%	72.03%
90	1679.42	0.98	1679.42	0.97	1679.43	0.96	1679.48	0.95
	0.84%	74.78%	0.84%	74.38%	0.84%	74.17%	0.84%	74.03%
100	1679.42	1.01	1679.42	1.01	1679.42	1.01	1679.42	1.01
	0.84%	75.44%	0.84%	75.44%	0.84%	75.44%	0.84%	75.44%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

El número de curva en la cuenca 4AA presenta una sensibilidad baja en la reducción del caudal pico de entre el 3% y 5% y una sensibilidad baja media en el aumento de la escorrentía superficial de entre el 25% al 53% (Ver Tabla 22). En cuanto a la descarga al aumentar el número de curva y el porcentaje de área impermeable se evidencia un incremento en el caudal que sale de la cuenca durante los primeros cuarenta minutos debido al aumento de la superficie impermeable que provoca que el agua fluya con mayor rapidez (Ver anexo 8).

**Tabla 22. Análisis número de curva Cuenca 4AA**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
50	1031.97	0.68	1030.64	0.66	1029.86	0.65	1029.33	0.64
	3.58%	30.62%	3.46%	28.17%	3.38%	26.61%	3.34%	25.48%
60	1039.31	0.78	1038.00	0.75	1037.23	0.74	1036.71	0.73
	4.26%	39.03%	4.14%	36.95%	4.07%	35.66%	4.02%	34.75%
70	1044.27	0.86	1042.88	0.84	1042.18	0.82	1041.72	0.81
	4.72%	44.92%	4.59%	43.21%	4.53%	42.17%	4.48%	41.46%
80	1050.01	0.93	1048.18	0.91	1047.2	0.89	1046.57	0.89
	5.24%	48.97%	5.07%	47.71%	4.98%	46.97%	4.93%	46.47%
90	1054.18	0.98	1053.02	0.96	1052.37	0.96	1051.89	0.95
	5.61%	51.53%	5.51%	50.79%	5.45%	50.39%	5.41%	50.13%
100	1054.84	1.00	1054.84	1.00	1054.84	1.00	1054.84	1.00
	5.67%	52.79%	5.67%	52.79%	5.67%	52.79%	5.67%	52.79%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

La cuenca 4AB al igual que las últimas dos cuencas muestra que el efecto del número de curva es más significativo en el incremento de esorrentía superficial que en el caudal pico de salida. Debido a que, en el caudal pico presenta una sensibilidad baja de entre 5% y 6% y en el coeficiente de esorrentía una sensibilidad media de entre 33% y 59% aproximadamente (Ver Tabla 23). En cuanto a la descarga se evidencia un comportamiento diferente entre los escenarios de impermeabilidad y el actual. Dado que, en los escenarios de impermeabilidad el caudal pico tiene una tendencia constante durante aproximadamente una hora, mientras que en la condición actual este se presenta en el minuto 75. Lo anterior se debe al aumento en la sobrecarga del sistema, por lo cual este mantiene el mismo caudal durante un tiempo prolongado mientras el exceso se sale de las cámaras de inspección (Ver anexo 9).

**Tabla 23. Análisis número de curva Cuenca 4AB**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Esorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Esorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Esorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Esorrentía
50	1782.54	0.68	1782.54	0.66	1782.54	0.64	1782.55	0.63
	5.38%	38.21%	5.38%	36.00%	5.38%	34.61%	5.38%	33.61%
60	1782.27	0.77	1782.26	0.75	1782.26	0.73	1782.26	0.72
	5.37%	45.89%	5.37%	44.02%	5.37%	42.86%	5.37%	42.04%
70	1797.45	0.86	1798.71	0.83	1797.71	0.82	1797.71	0.81
	6.17%	51.25%	6.23%	49.71%	6.18%	48.80%	6.18%	48.16%
80	1787.82	0.93	1787.28	0.91	1786.68	0.89	1786.79	0.89
	5.66%	54.90%	5.63%	53.75%	5.60%	53.09%	5.61%	52.64%
90	1783.88	0.98	1783.94	0.96	1783.95	0.96	1783.99	0.95
	5.45%	57.21%	5.45%	56.56%	5.46%	56.19%	5.46%	55.96%
100	1782.95	1.01	1782.95	1.01	1782.95	1.01	1782.95	1.01
	5.40%	58.33%	5.40%	58.33%	5.40%	58.33%	5.40%	58.33%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

La cuenca 4B y la cuenca 5 expone la misma sensibilidad ante el número de curva. En el caudal pico este no tiene influencia alguna y en el coeficiente de esorrentía presenta una sensibilidad baja a media (Ver la Tabla 13 y la Tabla 14). Las dos cuencas presentan la misma forma en el hidrograma de salida, siendo la diferencia el volumen de agua transitado, el cual es más grande en la cuenca 5 al tener mayor área bajo la curva. Asimismo, en las dos cuencas se evidencia que las curvas de los escenarios impermeables son muy cercanas al caso actual en lo que respecta al tiempo de tránsito de los volúmenes y al agua entregada a la siguiente cuenca (Ver anexo 10 y anexo 11).

**Tabla 24. Análisis de curva Cuenca 4B**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
50	284.11	0.68	284.11	0.66	284.11	0.65	284.11	0.64
	0.00%	24.41%	0.00%	21.75%	0.00%	20.05%	0.00%	18.85%
60	284.11	0.78	284.11	0.75	284.11	0.74	284.11	0.73
	0.00%	33.62%	0.00%	31.35%	0.00%	29.95%	0.00%	28.95%
70	284.11	0.86	284.11	0.84	284.11	0.82	284.11	0.81
	0.00%	40.07%	0.00%	38.18%	0.00%	37.07%	0.00%	36.29%
80	284.11	0.93	284.11	0.91	284.11	0.90	284.11	0.89
	0.00%	44.49%	0.00%	43.08%	0.00%	42.28%	0.00%	41.74%
90	284.11	0.98	284.11	0.97	284.11	0.96	284.11	0.95
	0.00%	47.29%	0.00%	46.48%	0.00%	46.04%	0.00%	45.75%
100	284.11	1.01	284.11	1.01	284.11	1.01	284.11	1.01
	0.00%	48.66%	0.00%	48.66%	0.00%	48.66%	0.00%	48.66%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

**Tabla 25. Análisis de curva Cuenca 5**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
50	580.57	0.68	580.57	0.65	580.57	0.64	580.57	0.63
	0.00%	28.35%	0.00%	25.78%	0.00%	24.16%	0.00%	22.98%
60	580.57	0.78	580.57	0.75	580.57	0.73	580.57	0.72
	0.00%	37.34%	0.00%	35.17%	0.00%	33.83%	0.00%	32.88%
70	580.57	0.86	580.57	0.83	580.57	0.82	580.57	0.81
	0.00%	43.53%	0.00%	41.74%	0.00%	40.68%	0.00%	39.94%
80	580.57	0.93	580.57	0.91	580.57	0.89	580.57	0.89
	0.00%	47.79%	0.00%	46.46%	0.00%	45.68%	0.00%	45.17%
90	580.57	0.98	580.57	0.97	580.57	0.96	580.57	0.95
	0.00%	50.48%	0.00%	49.72%	0.00%	49.30%	0.00%	49.02%
100	580.57	1.01	580.57	1.01	580.57	1.01	580.57	1.01
	0.00%	51.68%	0.00%	51.77%	0.00%	51.77%	0.00%	51.77%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

Por último, en la cuenca 6 se pudo establecer que el número de curva tiene una baja afectación en el incremento del caudal pico y una sensibilidad media en el coeficiente de escorrentía (Ver Tabla 15). Por otra parte, el hidrograma de salida muestra la misma tendencia en el caso actual que en los escenarios de impermeabilidad, es decir, el minuto en el que se alcanza el caudal pico y el inicio del tránsito de la creciente. En estos hidrogramas se evidencia como el caudal descargado es mayor y muy cercano entre los casos de impermeabilidad propuestos (Ver anexo 6).

**Tabla 26. Análisis de curva Cuenca 6**

%Área impermeable	Escenario 1: Pavimentos		Escenario 2: Zona comercial y de negocios		Escenario 3: Zona industrial		Escenario 4: Zona residencial	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
50	3297.01	0.68	3295.58	0.65	3291.48	0.64	3294.04	0.63
	16.68%	42.37%	16.65%	40.31%	16.54%	39.01%	16.61%	38.08%
60	3315.95	0.77	3313.58	0.75	3312.24	0.73	3312.78	0.72
	17.16%	49.60%	17.10%	47.85%	17.07%	46.77%	17.08%	46.00%
70	3330.62	0.86	3324.21	0.83	3323	0.82	3324.14	0.81
	17.52%	54.61%	17.36%	53.18%	17.33%	52.32%	17.36%	51.72%
80	3340.39	0.93	3337.70	0.91	3333.2	0.89	3331.63	0.88
	17.76%	58.04%	17.70%	56.97%	17.59%	56.35%	17.55%	55.93%
90	3342.93	0.98	3341.33	0.96	3339.13	0.96	3339.61	0.95
	17.83%	60.21%	17.79%	59.59%	17.73%	59.25%	17.75%	59.03%
100	3343.76	1.00	3343.76	1.01	3343.76	1.01	3343.76	1.01
	17.85%	61.19%	17.85%	61.25%	17.85%	61.25%	17.85%	61.25%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

En resumen, la sensibilidad del número de curva es baja en el incremento del caudal pico y baja media o media alta en el aumento de la generación de escorrentía. La excepción a la anterior afirmación es la cuenca 2 que al tener un porcentaje de área impermeable cercano al 11% y al ser este aumentado desde el 50% hasta el 100% presenta una sensibilidad media en el caudal pico y media alta en el coeficiente de escorrentía.

### 3.1.2. Análisis profundidad de almacenamiento área impermeable

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 27 y en la Tabla 28 se puede concluir que la profundidad de almacenamiento en el área impermeable no tiene un efecto significativo en el comportamiento hidrológico de la cuenca. Dado que, en todos los casos se obtuvo una sensibilidad baja cercana a cero. Lo anterior también se puede evidenciar en los hidrogramas ubicados en anexos, los cuales se encuentran muy cercanos entre sí con pequeñas diferencias en el volumen descargado en el tiempo antes de alcanzar el caudal pico. No obstante, a pesar de no mostrar notables diferencias es posible observar que esta variable puede producir un aumento o disminución del caudal pico y el coeficiente de escorrentía. Asimismo, no se encontró que este cambio tuviera una relación consistente entre las diferentes condiciones de impermeabilidad, es decir, se esperaba que en las profundidades de almacenamiento menores a 2mm el caudal y el coeficiente aumentarían en todos los casos, en la profundidad de almacenamiento de 2mm los resultados fueron cercanos a cero debido a que el almacenamiento usado en el caso actual es 1.91mm y en la profundidad de 2.5mm se obtuvieron reducciones en las dos variables de estudio. Por el contrario, en las cuencas 3 hubo una reducción del caudal en todas las profundidades evaluadas, en la cuenca 6 hubo una reducción del coeficiente de escorrentía en todos los casos, en

la cuenca 4AB se generó más escorrentía en todos los casos, en las cuencas 4B y 5B no hubo efecto alguno en el caudal pico de salida y en el resto de cuencas en cada una de las variables evaluadas se presentaron disminuciones e incrementos simultáneamente.

**Tabla 27. Análisis profundidad almacenamiento área impermeable Cuenca 2, 3, 4AA y 4AB**

Almacenamiento (mm)	Cuenca 2		Cuenca 3		Cuenca 4AA		Cuenca 4AB	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía						
0	742.530	0.201	1661.410	0.249	994.950	0.478	1687.300	0.424
	0.013%	0.435%	-0.238%	0.515%	-0.005%	0.752%	0.040%	1.252%
0.5	742.520	0.201	1661.840	0.248	994.980	0.477	1687.140	0.424
	0.012%	0.404%	-0.212%	0.424%	-0.002%	0.582%	0.030%	1.126%
1	742.490	0.201	1664.870	0.248	994.880	0.476	1686.950	0.423
	0.008%	0.249%	-0.029%	0.255%	-0.012%	0.366%	0.019%	0.915%
1.5	742.450	0.201	1668.040	0.248	995.020	0.475	1686.740	0.422
	0.003%	0.093%	0.161%	0.099%	0.002%	0.133%	0.007%	0.680%
2	742.430	0.200	1661.340	0.247	994.950	0.474	1686.520	0.421
	0.000%	-0.031%	-0.242%	-0.007%	-0.005%	-0.016%	-0.007%	0.545%
2.5	742.410	0.200	1660.870	0.247	995.000	0.473	1686.520	0.421
	-0.003%	-0.094%	-0.270%	-0.128%	0.000%	-0.196%	-0.007%	0.390%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

**Tabla 28. Análisis profundidad almacenamiento área impermeable Cuenca 4B, 5 y 6**

Almacenamiento (mm)	Cuenca 4B		Cuenca 5		Cuenca 6	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
0	284.110	0.520	580.570	0.490	2742.330	0.360
	0.000%	0.645%	0.000%	0.773%	-0.170%	-8.329%
0.5	284.110	0.520	580.570	0.489	2745.650	0.359
	0.000%	0.495%	0.000%	0.570%	-0.049%	-8.435%
1	284.110	0.518	580.570	0.487	2750.310	0.359
	0.000%	0.262%	0.000%	0.352%	0.121%	-8.678%
1.5	284.110	0.517	580.570	0.486	2749.340	0.358
	0.000%	0.083%	0.000%	0.147%	0.085%	-8.928%
2	284.110	0.517	580.570	0.486	2742.380	0.357
	0.000%	-0.055%	0.000%	-0.029%	-0.168%	-9.096%
2.5	284.110	0.516	580.570	0.485	2748.340	0.357
	0.000%	-0.208%	0.000%	-0.221%	0.049%	-9.288%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

### 3.1.3. Análisis porcentaje sin almacenamiento de la zona impermeable

El porcentaje sin almacenamiento de la zona impermeable afecta muy poco a los resultados del modelo, ya que tiene una sensibilidad baja cercana al 0% (Ver Tabla 29 y Tabla 30). Del mismo modo, los hidrogramas ubicados en anexos muestran que el cambio en el hidrograma de salida es

mínimo y se presenta en el tiempo de inicio antes de llegar al caudal pico. Al igual que en el parámetro de la profundidad de almacenamiento en el área impermeable los resultados no son consistentes con el aumento de las condiciones de impermeabilidad, pues a mayor impermeabilidad mayor generación de escorrentía y, por ende, caudal de salida. Lo anterior se evidencia dado que esta variable en promedio se encuentra cercana al 70%, es decir, para el porcentaje de almacenamiento del 70% debe haber aumentos o incrementos cercanos a cero y en el resto de porcentajes un aumento en todos los casos. Por el contrario, se encontró reducciones en todos los porcentajes de almacenamiento como en la cuenca 6 o aumentos y disminuciones de una profundidad a otra como en el caudal pico de la cuenca 3.

**Tabla 29. Análisis porcentaje sin almacenamiento Cuenca 2, 3, 4AA y 4B**

Almacenamiento (%)	Cuenca 2		Cuenca 3		Cuenca 4AA		Cuenca 4B	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía						
70	742.440	0.201	1661.000	0.247	994.720	0.475	1686.480	0.422
	0.001%	0.031%	-0.262%	-0.085%	-0.028%	0.070%	-0.009%	0.611%
80	742.470	0.201	1664.650	0.248	994.940	0.476	1686.920	0.423
	0.005%	0.125%	-0.043%	0.156%	-0.006%	0.304%	0.017%	0.823%
90	742.500	0.201	1667.030	0.248	994.980	0.477	1687.150	0.424
	0.009%	0.311%	0.100%	0.311%	-0.002%	0.521%	0.031%	1.053%
100	742.530	0.201	1662.090	0.249	994.950	0.478	1687.300	0.424
	0.013%	0.435%	-0.197%	0.515%	-0.005%	0.752%	0.040%	1.252%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

**Tabla 30. Análisis porcentaje sin almacenamiento Cuenca 4B, 5 y 6**

Almacenamiento (%)	Cuenca 4B		Cuenca 5		Cuenca 6	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía
70	284.110	0.517	580.570	0.486	2745.380	0.358
	0.000%	-0.041%	0.000%	0.081%	-0.059%	-8.964%
80	284.110	0.518	580.570	0.487	2741.430	0.358
	0.000%	0.166%	0.000%	0.293%	-0.203%	-8.779%
90	284.110	0.519	580.570	0.488	2746.150	0.359
	0.000%	0.413%	0.000%	0.512%	-0.031%	-8.548%
100	284.110	0.520	580.570	0.490	2742.330	0.360
	0.000%	0.645%	0.000%	0.773%	-0.170%	-8.329%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

## 4.2. Análisis de sensibilidad propiedades SUDS

El objetivo de este análisis es determinar el techo verde con las mejores propiedades basadas en el desempeño de la reducción de escorrentía e inundaciones para implementarlos en los escenarios propuestos de impermeabilidad de Cajicá ante la

creciente urbanización. Según lo mostrado en la Tabla 31 el techo denominado TV 3 más los techos azules, es aquel que cumple con dicho criterio pues en todas las cuencas a excepción de la cuenca 2 presenta reducciones en el volumen de inundación y disminución en el coeficiente de escorrentía. Asimismo, esto se puede evidenciar en los hidrogramas de salida presentados en anexos, pues a excepción de la cuenca 2 en estos se evidencia un menor volumen descargado correspondiente al área bajo la curva.

En lo que respecta al aumento en el caudal pico de salida, la generación de escorrentía y el volumen de inundación como en la cuenca 2, esto no concuerda con las ventajas de los sistemas urbanos de drenaje sostenible. Lo anterior se debe a que en la modelación en el software EPA SWMM no se definió el porcentaje de área impermeable que iba a ser tratada con los techos verdes o azules según lo indicado en el manual del programa (Rosman, 2015). Dado que, estos son sistemas que sólo tratan la lluvia y no la escorrentía como las celdas de biorretención. Lo que ocasiona que en cuencas poco impermeables como la 2 o la 3 (10,91% y 15,68%, respectivamente) los techos verdes y azules puedan tratar áreas permeables y, por ende, hacer decaer la natural respuesta hidrológica de la cuenca.

**Tabla 31. Análisis de sensibilidad propiedades SUDS Cuenca 2, 3, 4AA, 4AB, 4B, 5 y 6**

Cuenca	TV 1 + TA			TV 2 + TA			TV 3 + TA		
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L
Cuenca 2	793.240	0.237	3.186	835.040	0.237	3.518	788.990	0.219	3.030
	6.405%	15.557%	23.760%	11.090%	15.401%	30.955%	5.901%	8.317%	19.835%
Cuenca 3	1665.710	0.278	4.283	1665.160	0.277	4.657	1660.840	0.255	4.056
	0.021%	10.866%	-147.700%	-0.012%	10.584%	-127.808%	-0.272%	2.788%	-161.563%
Cuenca 4AA	993.910	0.421	8.287	993.760	0.420	8.915	993.740	0.390	8.012
	-0.110%	-12.591%	-25.944%	-0.125%	-12.899%	-17.072%	-0.127%	-21.455%	-30.267%
Cuenca 4AB	1705.690	0.403	15.995	1708.350	0.402	17.395	1700.960	0.370	15.345
	1.117%	-4.086%	-11.785%	1.271%	-4.311%	-2.788%	0.842%	-13.221%	-16.520%
Cuenca 4B	284.110	0.452	3.131	284.110	0.451	3.371	284.110	0.416	3.030
	0.000%	-14.435%	-18.461%	0.000%	-14.598%	-10.027%	0.000%	-24.386%	-22.409%
Cuenca 5	580.570	0.424	6.229	580.570	0.423	6.588	580.570	0.392	5.982
	0.000%	-14.623%	-100.883%	0.000%	-14.860%	-89.936%	0.000%	-23.926%	-109.178%
Cuenca 6	2950.270	0.379	3.959	3081.790	0.379	4.296	2972.280	0.354	3.798
	6.890%	-2.870%	-103.006%	10.864%	-2.972%	-87.081%	7.580%	-10.099%	-111.611%

\*En gris se encuentra resaltada la sensibilidad calculada

### 4.3. Análisis de riesgo de inundación

El análisis de riesgo de inundación se compone del análisis de los volúmenes obtenidos en las propiedades de los SUDS y en los escenarios de impermeabilidad propuestos en el municipio de Cajicá. En cuanto al primer análisis, según lo mostrado en la Tabla 32 en la cuenca 2 se aumenta el volumen de inundación por la forma en que se debe modelar los techos verdes y la baja impermeabilidad de la cuenca. La reducción en los volúmenes de inundación de las cuencas se

encuentra entre 11% y más del 100% para las cuencas 3, 5 y 6, las cuales corresponden a las cuencas más urbanizadas del municipio. Pero en el resto de cuencas si existió una reducción en el volumen de inundación, el cual fue menor para el tipo de techo TV 2 y mayor en el techo TV 3. Las reducciones más significativas se encuentran en la cuenca 3 y la cuenca 5 al ser mayores a 6000m<sup>3</sup>.

**Tabla 32. Resultados volumen de inundación sensibilidad propiedades SUDS**

Cuenca	TV 1 + TA	TV 2 + TA	TV 3 + TA
	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L		
Cuenca 2	3.186	3.518	3.030
	-0.757	-1.089	-0.601
Cuenca 3	4.283	4.657	4.056
	6.326	5.952	6.553
Cuenca 4AA	8.287	8.915	8.012
	2.150	1.522	2.425
Cuenca 4AB	15.995	17.395	15.345
	1.885	0.485	2.535
Cuenca 4B	3.131	3.371	3.030
	0.578	0.338	0.679
Cuenca 5	6.229	6.588	5.982
	1.009	5.925	6.531
Cuenca 6	3.959	4.296	3.798
	1.030	3.741	4.239

\*En gris se encuentran resaltados los volúmenes reducidos

Por otro lado, para evaluar la reducción del riesgo de inundación en los escenarios propuestos (Zona comercial y de negocios, zona industrial y zona residencial) con área impermeable del 90% primero fue necesario encontrar los volúmenes de inundación en dichos casos. Estos volúmenes se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33. Resultados volumen de inundación escenarios proyectados**

Cuenca	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L		
	Escenario 2 I=90%	Escenario 3 I=90%	Escenario 4 I=90%
Cuenca 2	25.348	25.098	24.947
Cuenca 3	75.064	74.369	73.924
Cuenca 4AA	23.87	23.646	23.502
Cuenca 4AB	60.952	60.379	60.008
Cuenca 4B	9.155	9.07	9.016
Cuenca 5	32.082	31.795	31.608
Cuenca 6	52.004	51.498	51.16

En la Tabla 34 se muestra los volúmenes reducidos para cada sistema de drenaje urbano en cada escenario. En esta se puede observar que los volúmenes de inundación reducido por los techos verdes representan alrededor del 80% del volumen original de inundación. Por otro lado, se muestra que los techos azules presentaron un mayor desempeño en la reducción del riesgo de inundación, pues lograron reducirlo en todos los casos a volúmenes aproximados de 3000 m<sup>3</sup>. Esto se debe a la suposición que se realizó para la modelación de los techos azules a través de la opción “*Rooftop Disconnection*”, pues en esta se asume que el agua no es almacenada en los techos debido a que drena constantemente el agua a una zona permeable y, por ende, da una aproximación mayor a dos de las rutas que recorrería el agua normalmente: La infiltración y la percolación.

**Tabla 34. Análisis de riesgo de inundación escenarios proyectados**

Cuenca	Escenario 2 I=90%		Escenario 3 I=90%		Escenario 4 I=90%	
	Techos verdes	Techos azules	Techos verdes	Techos azules	Techos verdes	Techos azules
	Volumen de inundación (10 <sup>6</sup> )L					
Cuenca 2	13.747	1.012	13.727	0.994	13.712	0.983
	11.601	24.336	11.371	24.104	11.235	23.964
Cuenca 3	40.051	3.028	39.998	2.972	39.954	2.934
	35.013	72.036	34.371	71.397	33.970	70.990
Cuenca 4AA	12.906	0.923	12.883	0.906	12.872	0.896
	10.964	22.947	10.763	22.740	10.630	22.606
Cuenca 4AB	23.582	1.838	23.526	1.806	23.497	1.786
	37.370	59.114	36.853	58.573	36.511	58.222
Cuenca 4B	3.936	0.346	3.926	0.338	3.921	0.331
	5.219	8.809	5.144	8.732	5.095	8.685
Cuenca 5	13.322	1.603	13.299	1.575	13.277	1.559
	18.760	30.479	18.496	30.220	18.331	30.049
Cuenca 6	19.843	2.164	19.798	2.127	19.770	2.103
	32.161	49.840	31.700	49.371	31.390	49.057

\*En gris se encuentran resaltados los volúmenes reducidos

## 5. CONCLUSIONES

A través del presente proyecto de grado se evidenció que el desarrollo de las ciudades y, por ende, el aumento de la impermeabilización ha tenido serias consecuencias en el ciclo hidrológico y la capacidad de respuesta de las cuencas. Debido a que, el agua debe tomar nuevas rutas y al ser las superficies poco penetrables esta empieza a fluir con mayor rapidez y a acumularse pues no se puede infiltrar o percolar. En orden de disminuir estas afectaciones se han creado e implementado sistemas de drenaje urbano sostenible, los cuales tienen el objetivo de disminuir la escorrentía y mitigar el riesgo de inundación, además de poseer otras ventajas como en el caso ambiental con la reducción del dióxido de carbono.

Al evaluar los sistemas de drenaje urbano sostenible de techos verdes y techos azules se encontró que a medida que aumenta el porcentaje de impermeabilidad en las ciudades incrementa la reducción de los volúmenes de inundación efectuados por estos sistemas. Debido a que, se manejó el supuesto de que los techos azules están presentes en el 50% del área impermeable y como se mostró en la sección de análisis de resultados los techos azules tienen un mejor desempeño que los techos verdes porque drenan el agua a una superficie permeable. Esto permite que el agua siga una ruta similar a la del ciclo natural antes de la intervención en el paisaje por el hombre.

Por otro lado, en la evaluación de las propiedades de los techos verdes se determinó respecto al escenario actual que estos presentan reducciones en los volúmenes de inundación desde el 11% en la cuenca menos urbanizada a más del 100%. Asimismo, se estableció que el techo verde correspondiente a magra limosa (TV3) sumado con los techos azules fue el que produjo mayores reducciones en los volúmenes de inundación. En cuanto a los escenarios de impermeabilidad propuestos se encontró que los techos verdes representan una disminución de aproximadamente el 80% del volumen de inundación original. A pesar de este excelente desempeño, los techos azules lograron reducir en mayor medida los volúmenes de inundación gracias a que evacuan el agua en superficies naturales como los prados. A partir de lo anterior, se concluyó que los sistemas de drenaje urbano sostenible evaluados juegan un papel importante en la reducción del riesgo de inundación en las ciudades, en especial, los techos azules que al depositar el agua en superficies permeables como los prados ayuda a que esta siga sus rutas naturales y presenta una solución más efectiva pues la intensidad de las lluvias en la zona es muy alta y no es práctico almacenar el agua.

Adicionalmente, se determinó que el número de curva es el que ejerce mayor influencia en el comportamiento hidrológico de la cuenca, pues afecta en gran medida los tiempos de transición

de la creciente y los volúmenes de descarga. En cambio, el porcentaje de almacenamiento en el área impermeable y la profundidad de almacenamiento en la misma presentaron una sensibilidad nula o muy baja en todos los casos.

## 6. RECOMENDACIONES

Las inundaciones urbanas tienen un mayor impacto económico y social cuando son provocadas por crecientes de afluentes como ríos o quebradas durante las temporadas de lluvia. Debido a que, estas pueden durar hasta días y no sólo horas como la inundación provocada por lluvia. Por ende, un análisis de la reducción del riesgo de inundación urbana con la implementación de los sistemas de drenaje urbano sostenible sería más significativa si el alcance de la investigación fuera más allá del evento de lluvia y evaluará la inundación provocada por las fuentes fluviales. Por otro lado, sería conveniente realizar los análisis de las ciudades al futuro en base a estadísticas de crecimiento poblacional, de industrias o comercio para no asignar las mismas propiedades a todas las subcuencas y así tener un resultado más cercano a la realidad. Del mismo modo, también se considera conveniente hacer más análisis sobre los parámetros que afectan la impermeabilidad para tener un mayor control sobre estos. Por otro lado, para tener un análisis más cercano a la realidad se podría hacer uso de otros softwares como de optimización, los cuales permiten elegir la ubicación y tamaño de los SUDS para así conocer el lugar más factible y con mejores resultados de reducción de volúmenes de inundación y escorrentía para la implementación de estos sistemas. Por último, debido a los altos porcentajes obtenidos en la reducción del riesgo de inundación para los techos azules y la suposición que se realizó para su modelación, se considera favorable modelar el control LID “*Rooftop Disconnection*” con diferentes propiedades para estudiar cómo afecta la reducción del riesgo de inundación. Asimismo, sería adecuado comparar los resultados obtenidos con otro software como SewerGEMS para obtener así resultados más confiables e identificar errores en la modelación.

## 7. REFERENCIAS

- Abellán, A. (2016). *SWMM 5.1 como herramienta para el profesional*. Recuperado de <http://sudsostenible.com/swmm-5-1-como-herramienta-para-el-profesional/>
- Alcaldía de Barranquilla. (2019). *Sistema de Arroyos*. Recuperado de <https://www.barranquilla.gov.co/adi/arroyos/sistema-de-arroyos>
- Alcaldía Municipal de Cajicá. (s.f.). *Información General*. Recuperado de <https://www.cajica.gov.co/informacion-general/>
- Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z. y Sanchez, A. (2019). Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Science Direct*, 239, 244-254.
- APFM. (2013). *What are the negative social impacts of flooding?* Recuperado de <https://www.floodmanagement.info/what-are-the-negative-social-impacts-of-flooding/>
- ArcGIS. (s.f.). *Modelos digitales de elevación*. Recuperado de <https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm>
- ArcMap 10.3. (s.f.). *¿Qué es una superficie TIN?* Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
- ASCE. (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management*. Estados Unidos de América. Recuperado de [https://www.waterboards.ca.gov/rwqcb4/water\\_issues/programs/stormwater/municipal/AdmInRecordOrderNoR4\\_2012\\_0175/2001LAMS4\\_AR/Items%20532%20to%20553\\_reduced.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/rwqcb4/water_issues/programs/stormwater/municipal/AdmInRecordOrderNoR4_2012_0175/2001LAMS4_AR/Items%20532%20to%20553_reduced.pdf)
- Bauder. (s.f.). *Blue Roof Systems*. Recuperado de <https://www.bauder.co.uk/blue-roofs>
- BID & Cepal. (2012). *Valoración de daños y pérdidas Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan\\_nacional\\_de\\_adaptacion/3.\\_Da%C3%B1os\\_y\\_p%C3%A9rdidas\\_ola\\_invernal.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/3._Da%C3%B1os_y_p%C3%A9rdidas_ola_invernal.pdf)
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*: McGraw-Hill Book Company.

- Correa, D. (2013). *Valoración del costo beneficio de la implementación de techos verdes: Aplicación a un caso de la ciudad de Bogotá. (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes: Bogotá, Colombia*
- CPS 100-2018 EPC-Cajicá. *Estudios y diseños plan maestro de alcantarillado etapa II, municipio de Cajicá. Anexo 2.2 Estudio Hidrológico.* (2018).
- EPA. (s.f.). *Storm Water Management Model (SWMM).* Recuperado de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Fernández, C. e. a. (2018). *Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales.* Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382018000100002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002)
- Floodsite. (2008). *Flooding in urban areas (urban flooding).* Recuperado de <http://www.floodsite.net/juniorfloodsite/html/en/student/thingstoknow/hydrology/urbanfloods.html>
- Hydrotech. (s.f.). *Blue Roof Assembly Options.* Recuperado de <https://www.hydrotechusa.com/assemblies/roofing/blue-roofs>
- IDEAM. (s.f.). *Modelación hidrológica.* Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrolologica>
- IDIGER. (2019). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Inundación.* Recuperado de <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- Macor, J. (2002). *Análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo RUNOFF-SWMM. Ingeniería hidráulica en México, 17(2), 17–26.*
- McCuen R., Johnson P. y Ragan, R. (2002). *Highway Hydrology: Hydraulic Design Series Number 2, Second Edition.* Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif02001.pdf>
- McGrane, S. (2016). *Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. Hydrological Sciences Journal, 61(13), 2295–2311.* <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>
- Muñoz, A. (2016). *Metodología de selección y optimización de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible para el aprovechamiento de esorrentía. (Tesis de maestría). Universidad de los Andes: Bogotá, Colombia*

- Naciones Unidas. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- National Geographic. (s.f.). *Resource Library: Water Cycle*. Recuperado de <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/water-cycle/>
- Natural Resources Conservation Service. (2009). *Hydrology Soil Groups: Part 630 Hydrology National Engineering*. Recuperado de <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=22526.wba>
- NOAA. (s.f.). *Water Cycle*. Recuperado de <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/freshwater-education-resources/water-cycle>
- Oki, T. y Kanae, S. (2006). *Global Hydrological Cycles and World Water Resources*. *Science*, 313(5790), 1068–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- ONU tomado de Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (s.f.). *Desarrollo sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>
- Philadelphia Water Department. (s.f.). *Capítulo 4 - Guía práctica de manejo de agua pluviales: 4.6 Techos azules*. Recuperado de <https://www.pwdplanreview.org/manual/chapter-4/4.6-blue-roofs#>
- Real Academia de Ingeniería. (s.f.). *Cuenca urbana*. Recuperado de <http://diccionario.raing.es/es/lema/cuenca-urbana>
- Rosman, L. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Recuperado de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/epaswmm5\\_1\\_manual\\_master\\_8-2-15.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf)
- Ruby, E. (s.f.). *How Urbanization Affects the Water Cycle*. Recuperado de <https://www.coastal.ca.gov/nps/watercyclefacts.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2014). *Techos verdes y jardines verticales*. Recuperado de <http://ambientebogota.gov.co/web/una-piel-natural-para-bogota/consulta-la-guia-tecnica-de-techos-verdes-para-bogota>
- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. (2016). *SuD Sostenible*. Recuperado de <http://sudsostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/>
- UNGRD. (2019). *Inundaciones*. Recuperado de <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=144>

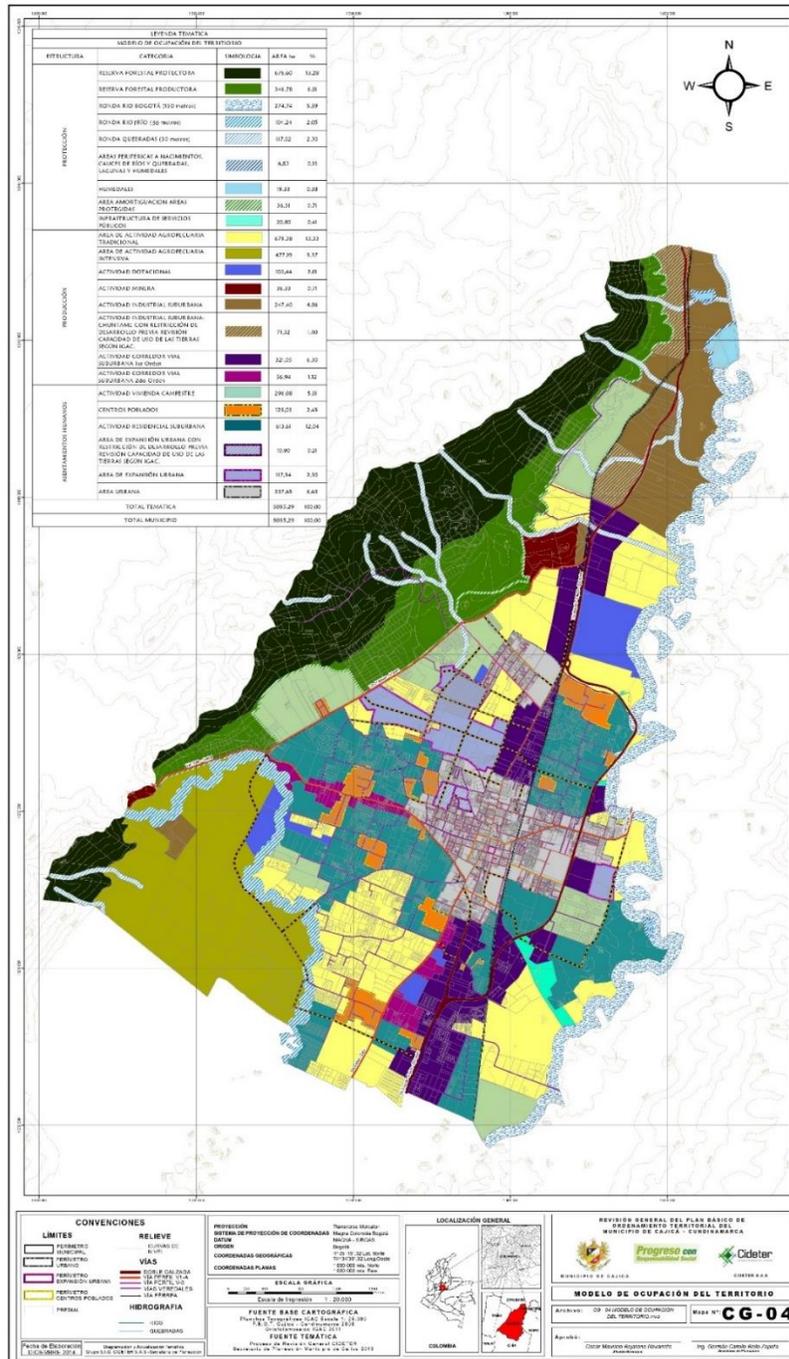
---

United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*.

Vega, L. (2016). Sistemas de control de escorrentía pluvial en ciudades: techos verdes vs. Tanques de almacenamiento. (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes: Bogotá, Colombia

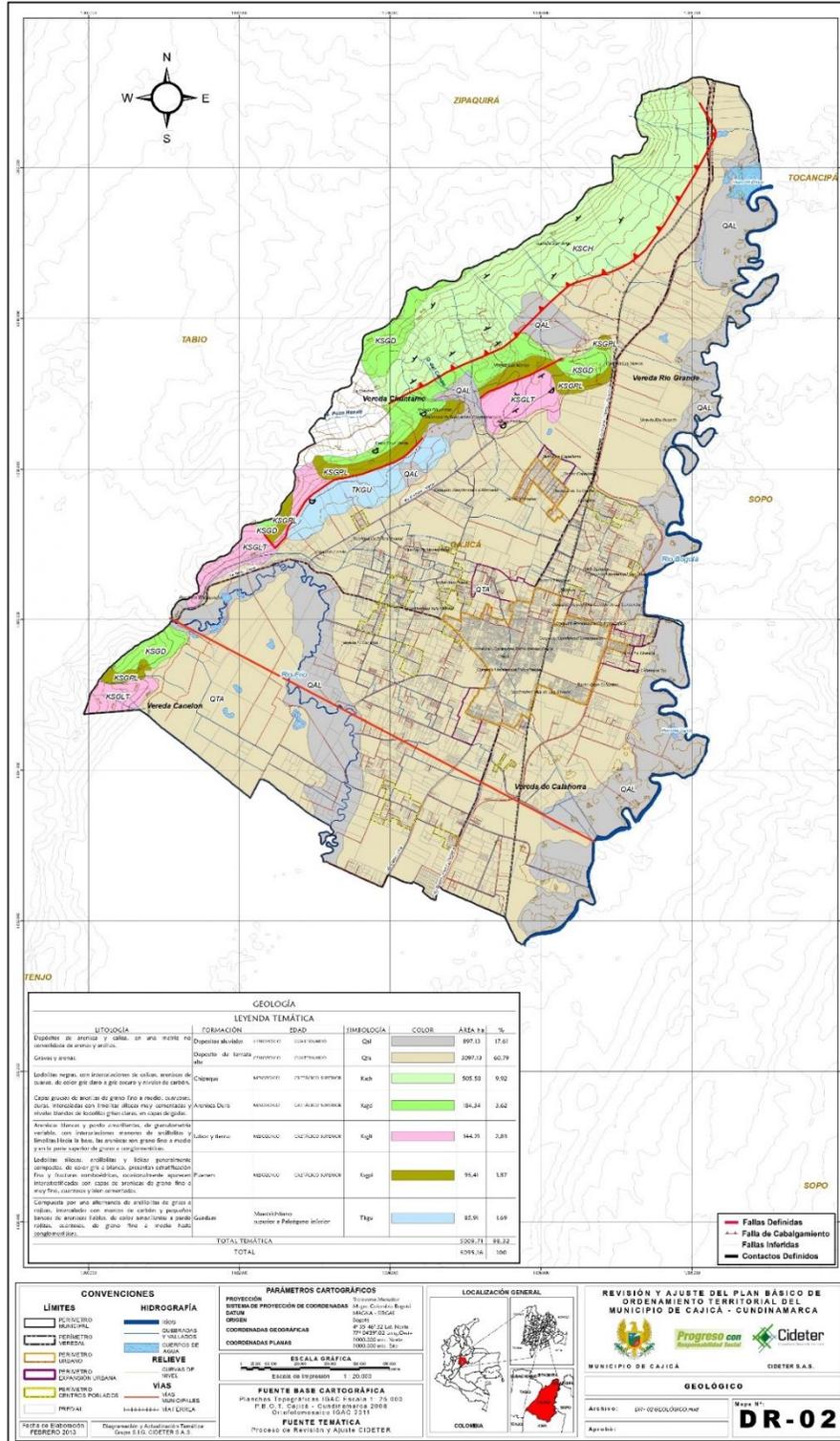
## 8. ANEXOS

### Anexo 1. Mapa de ocupación de Cajicá.





Anexo 3. Mapa información geológica de Cajicá. Tomado de



## Anexo 1. Número de curva áreas urbanas. Tomado de

**Table 2-2a** Runoff curve numbers for urban areas <sup>1/</sup>

Cover description	Average percent impervious area <sup>2/</sup>	Curve numbers for hydrologic soil group			
		A	B	C	D
<b>Fully developed urban areas (vegetation established)</b>					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) <sup>3/</sup> :					
Poor condition (grass cover < 50%) .....		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%) .....		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%) .....		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way) .....		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way) .....		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way) .....		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way) .....		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way) .....		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) <sup>4/</sup> .....		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders) .....		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business .....	85	89	92	94	95
Industrial .....	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses) .....	65	77	85	90	92
1/4 acre .....	38	61	75	83	87
1/3 acre .....	30	57	72	81	86
1/2 acre .....	25	54	70	80	85
1 acre .....	20	51	68	79	84
2 acres .....	12	46	65	77	82

### Developing urban areas

Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation) <sup>5/</sup> .....		77	86	91	94
---	--	----	----	----	----

Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c).

<sup>1</sup> Average runoff condition, and  $I_p = 0.2S$ .

<sup>2</sup> The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition. CN's for other combinations of conditions may be computed using figure 2-3 or 2-4.

<sup>3</sup> CN's shown are equivalent to those of pasture. Composite CN's may be computed for other combinations of open space cover type.

<sup>4</sup> Composite CN's for natural desert landscaping should be computed using figures 2-3 or 2-4 based on the impervious area percentage (CN = 98) and the pervious area CN. The pervious area CN's are assumed equivalent to desert shrub in poor hydrologic condition.

<sup>5</sup> Composite CN's to use for the design of temporary measures during grading and construction should be computed using figure 2-3 or 2-4 based on the degree of development (impervious area percentage) and the CN's for the newly graded pervious areas.

## Anexo 2. Números de curva para tierras de cultivo

**Table 2-2c** Runoff curve numbers for other agricultural lands <sup>1/</sup>

Cover type	Cover description	Hydrologic condition	Curve numbers for hydrologic soil group			
			A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing. <sup>2/</sup>		Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.		—	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element. <sup>3/</sup>		Poor	48	67	77	83
		Fair	35	56	70	77
		Good	30 <sup>4/</sup>	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm). <sup>5/</sup>		Poor	57	73	82	86
		Fair	43	65	76	82
		Good	32	58	72	79
Woods. <sup>6/</sup>		Poor	45	66	77	83
		Fair	36	60	73	79
		Good	30 <sup>4/</sup>	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.		—	59	74	82	86

<sup>1/</sup> Average runoff condition, and  $I_a = 0.2S$ .

<sup>2/</sup> **Poor:** <50% ground cover or heavily grazed with no mulch.

**Fair:** 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.

**Good:** > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

<sup>3/</sup> **Poor:** <50% ground cover.

**Fair:** 50 to 75% ground cover.

**Good:** >75% ground cover.

<sup>4/</sup> Actual curve number is less than 30; use CN = 30 for runoff computations.

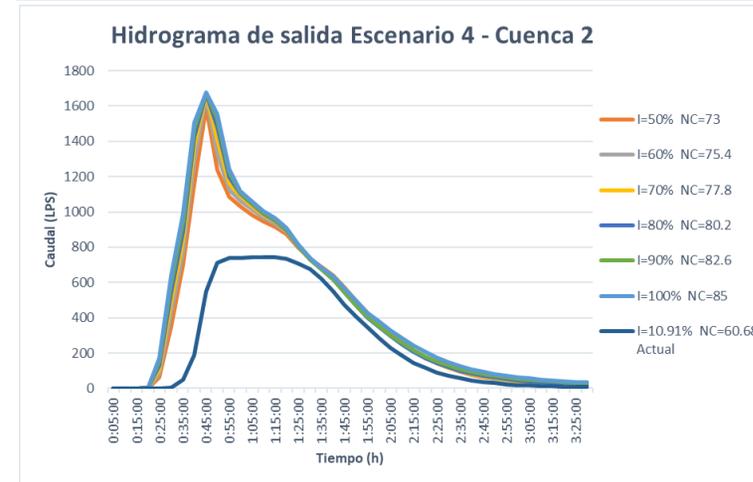
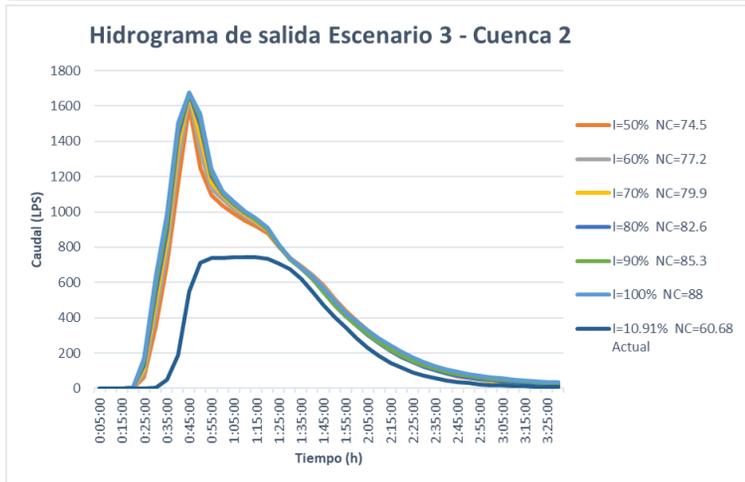
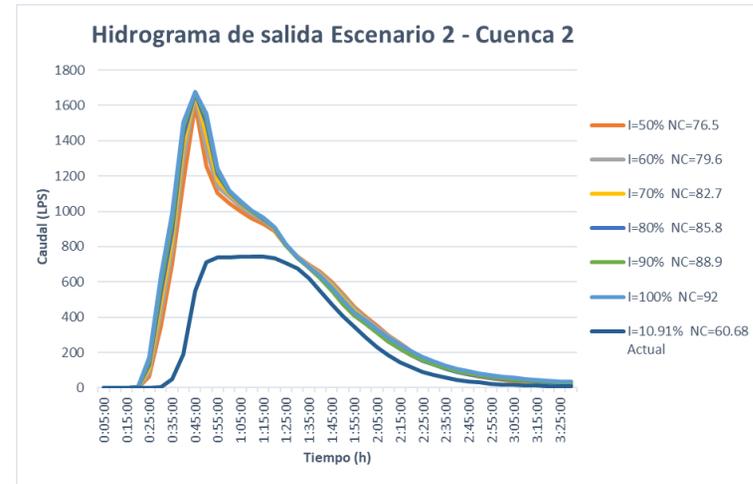
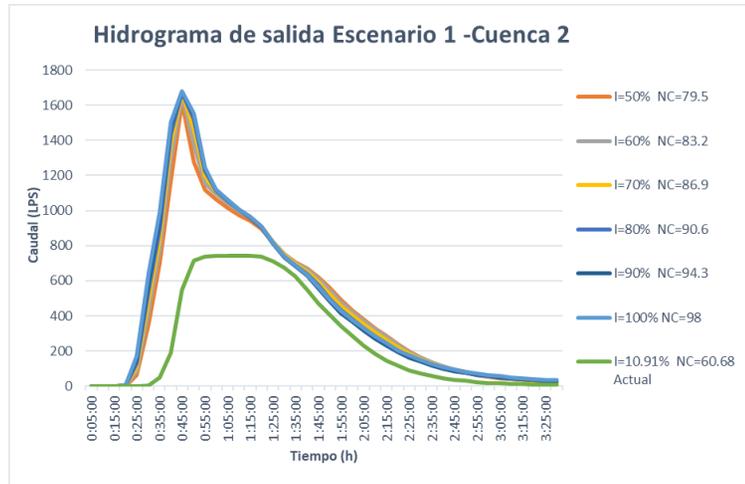
<sup>5/</sup> CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CN's for woods and pasture.

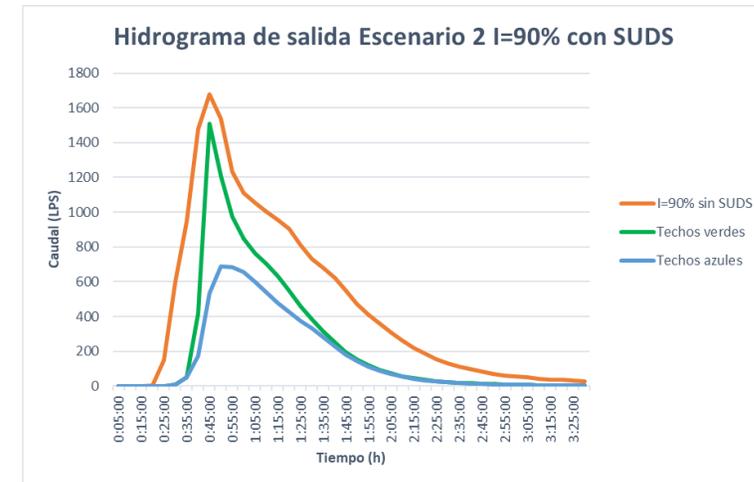
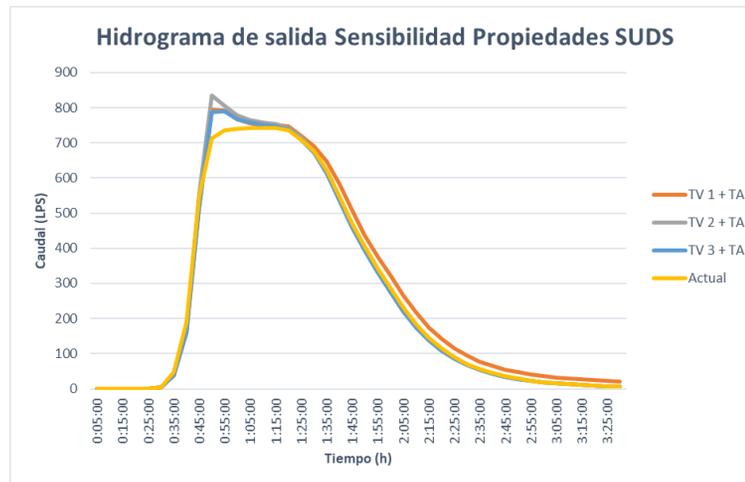
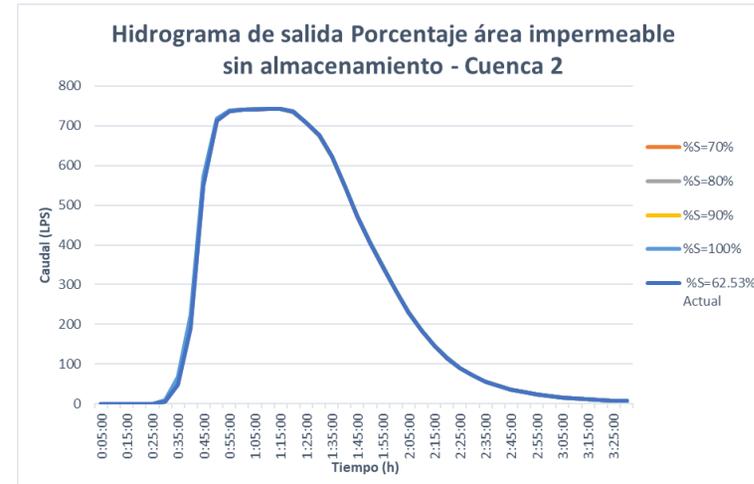
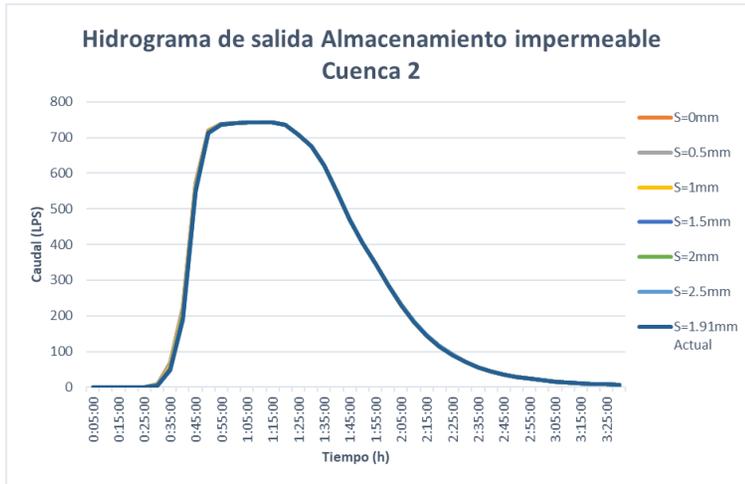
<sup>6/</sup> **Poor:** Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.

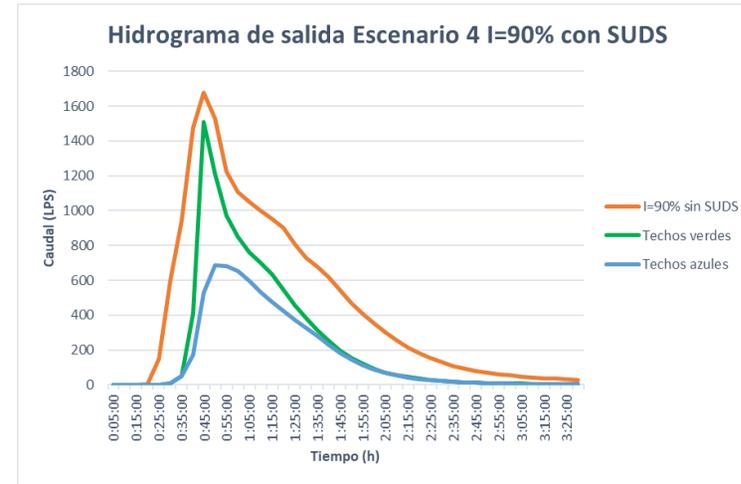
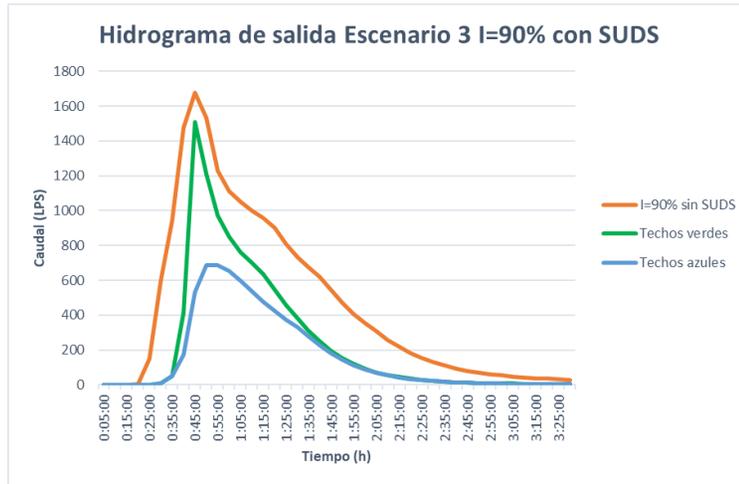
**Fair:** Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil.

**Good:** Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

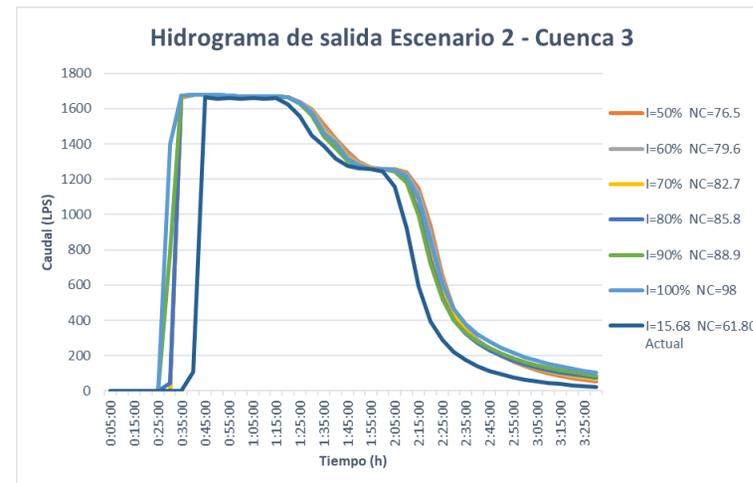
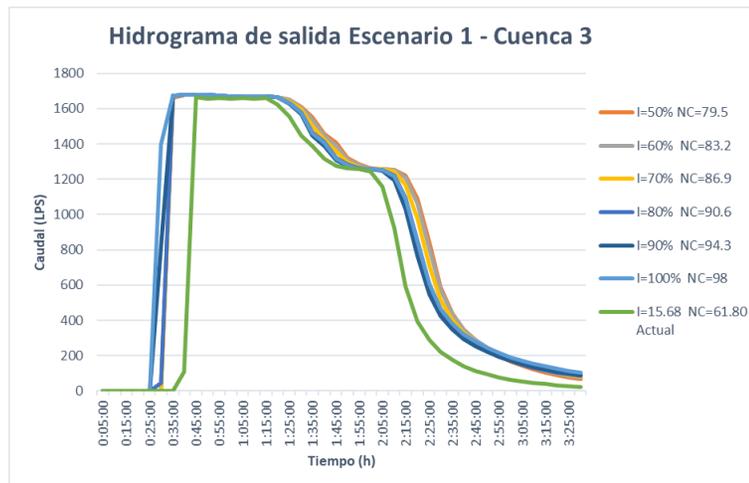
## Anexo 6. Hidrogramas de salida Cuenca 2

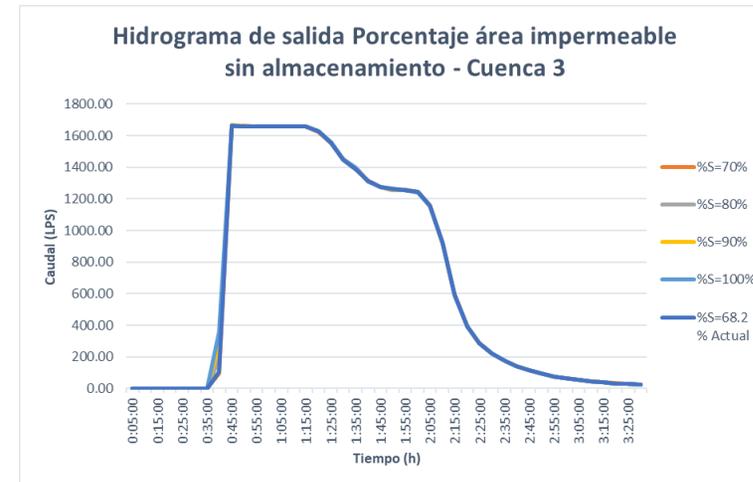
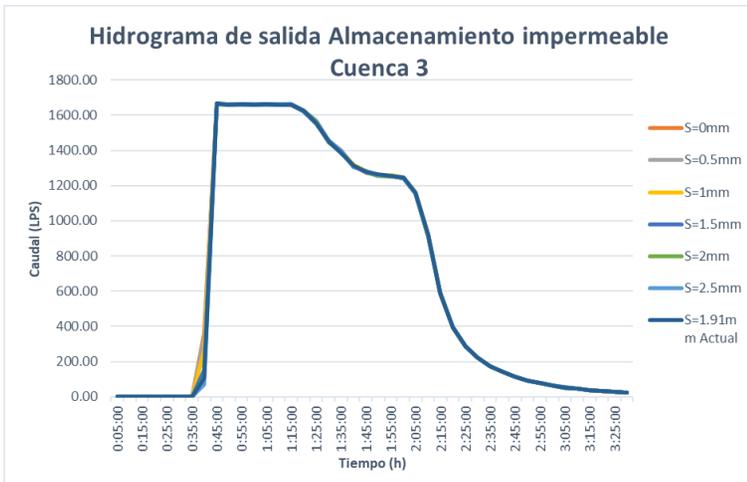
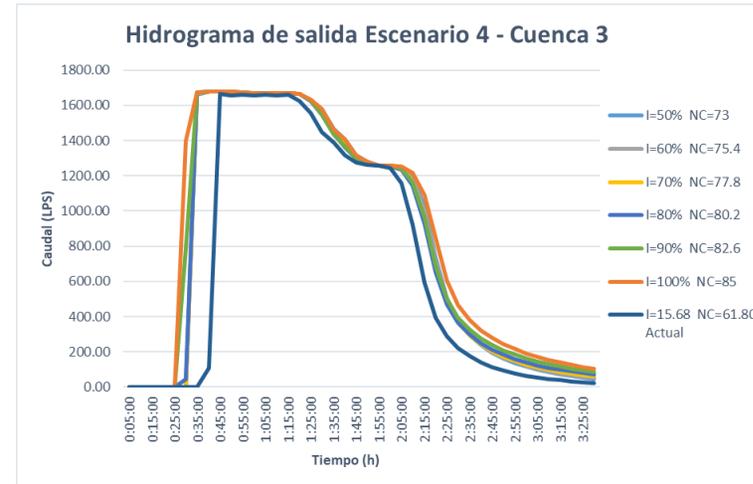
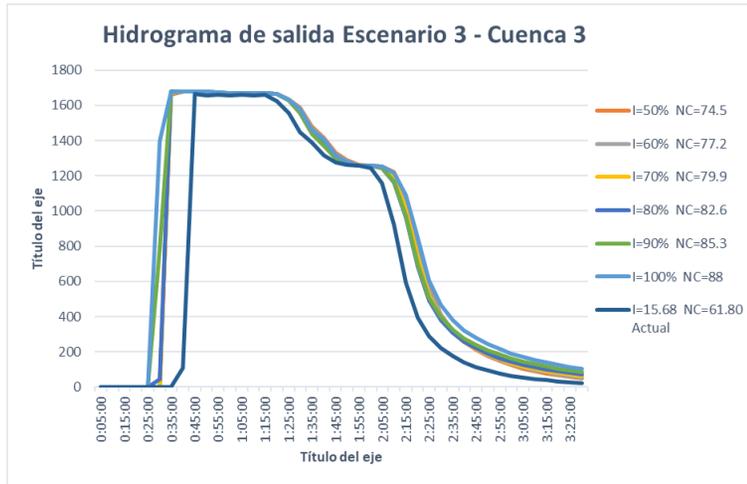


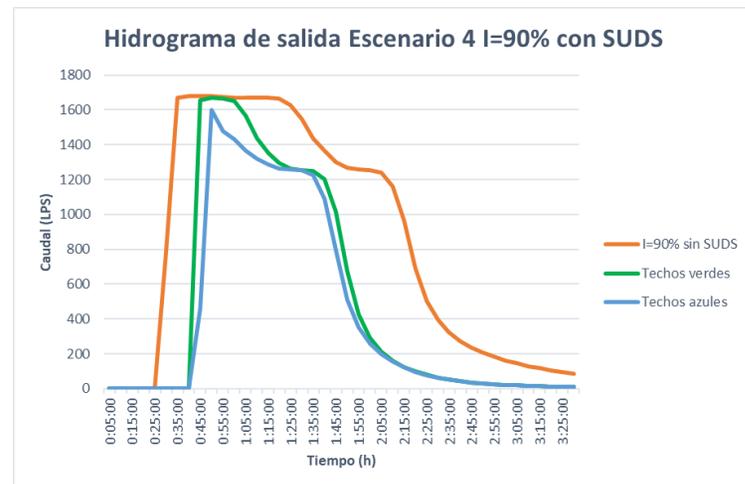
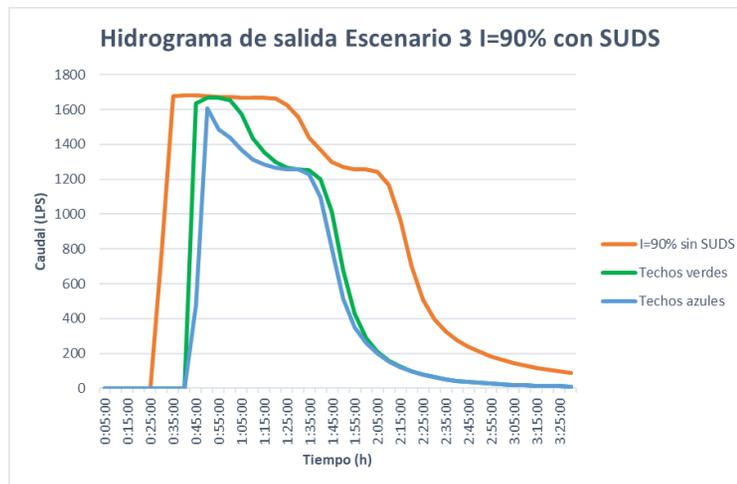
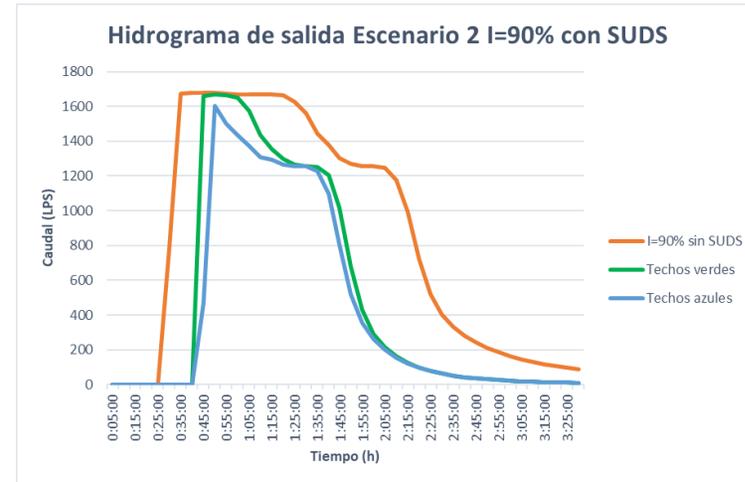
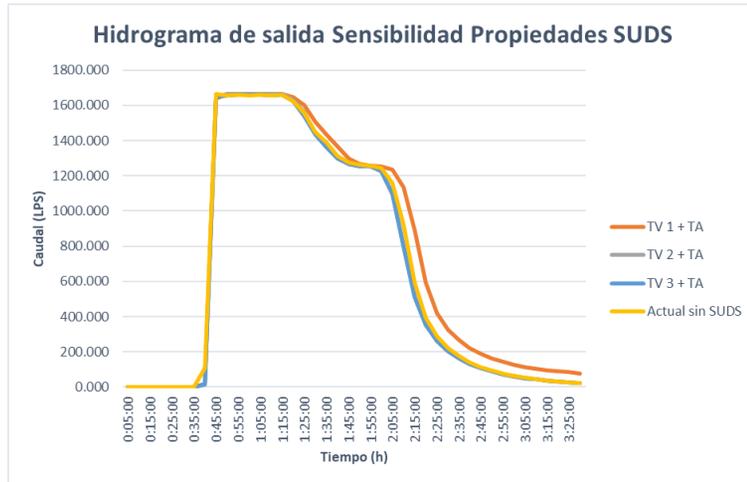




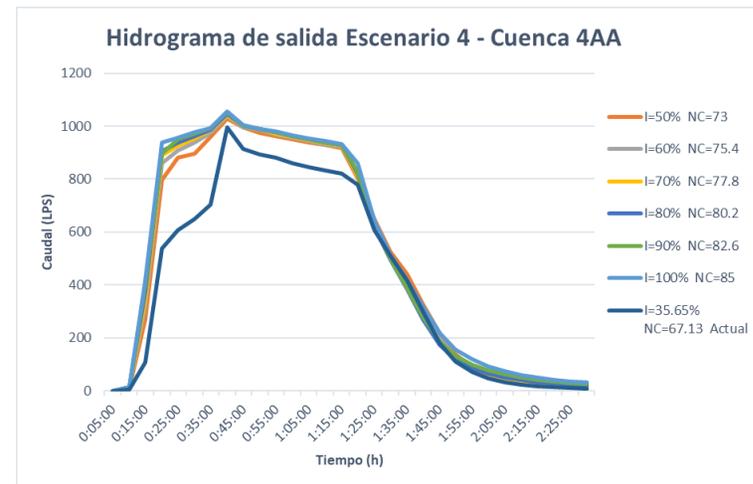
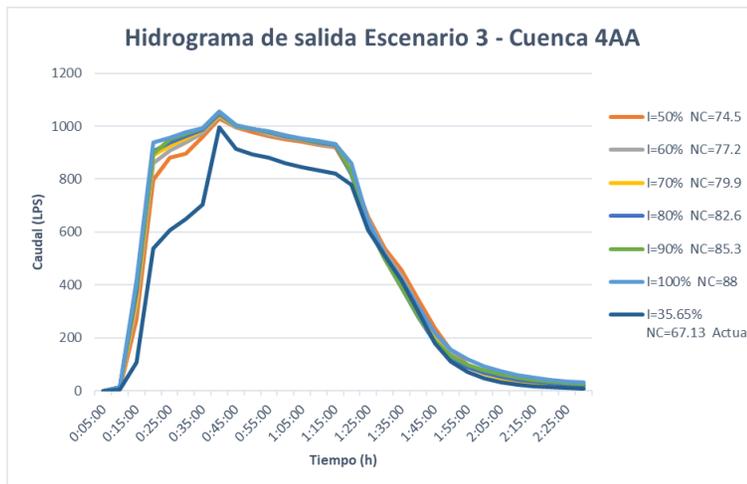
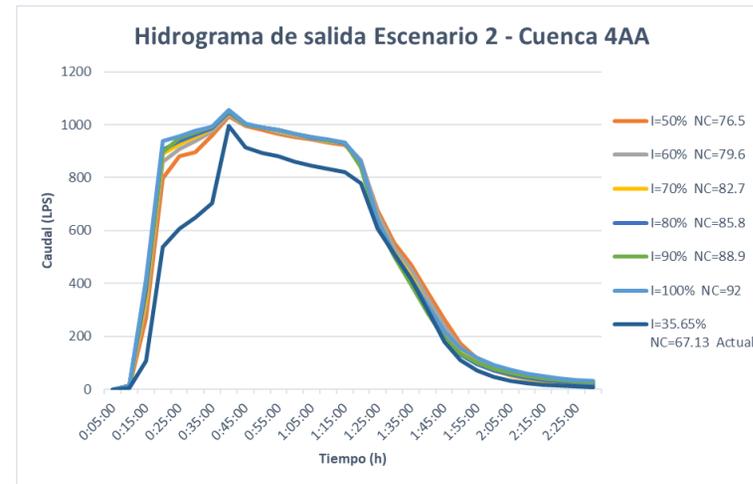
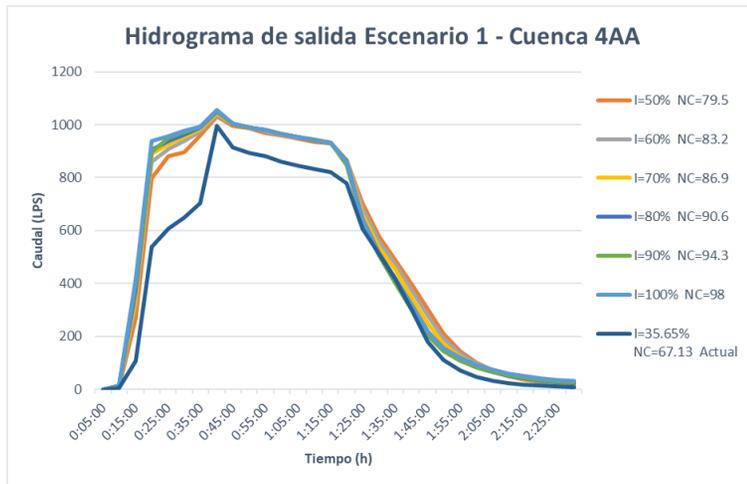
## Anexo 7. Hidrogramas de salida Cuenca 3

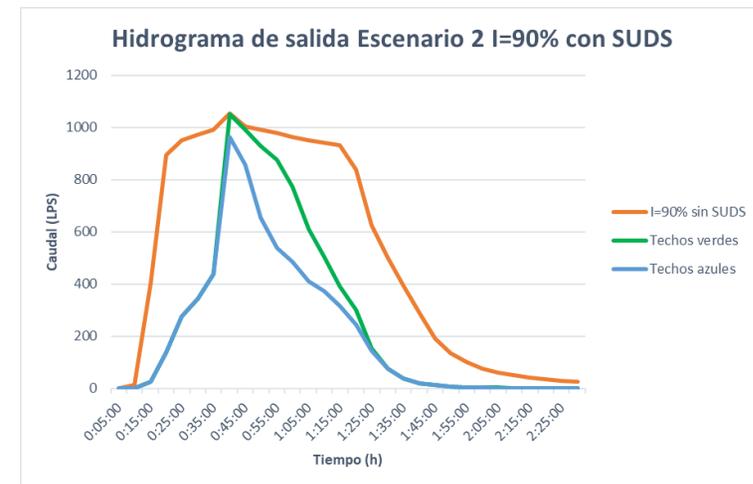
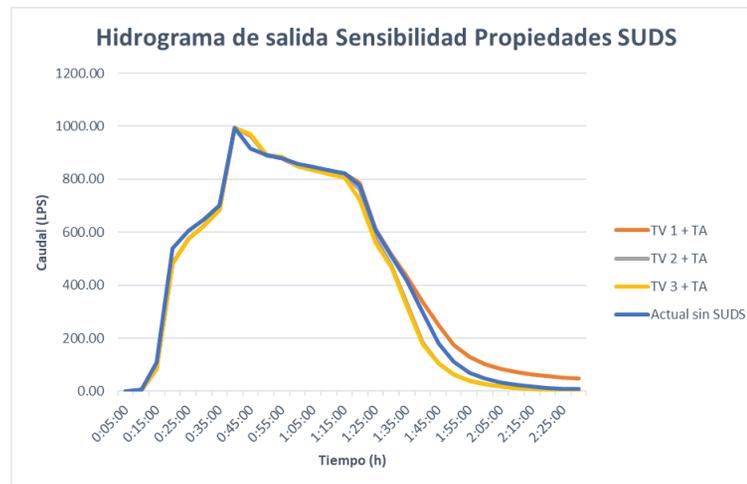
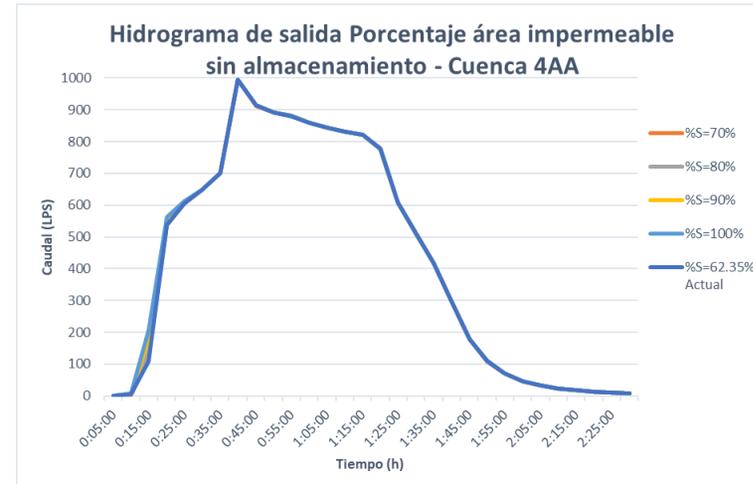
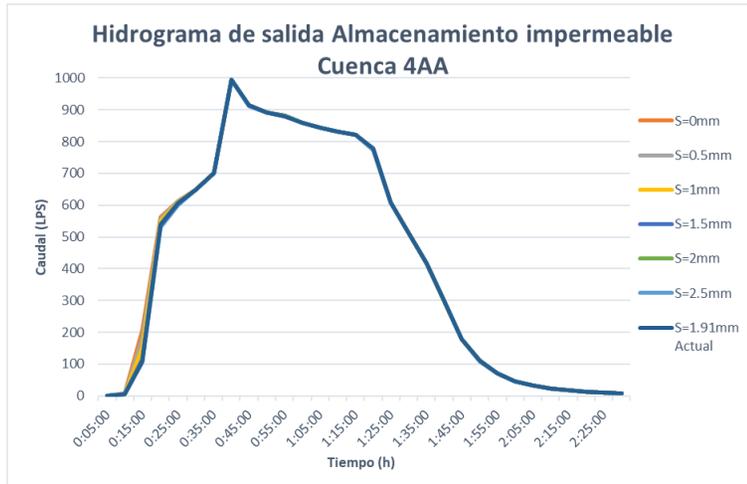


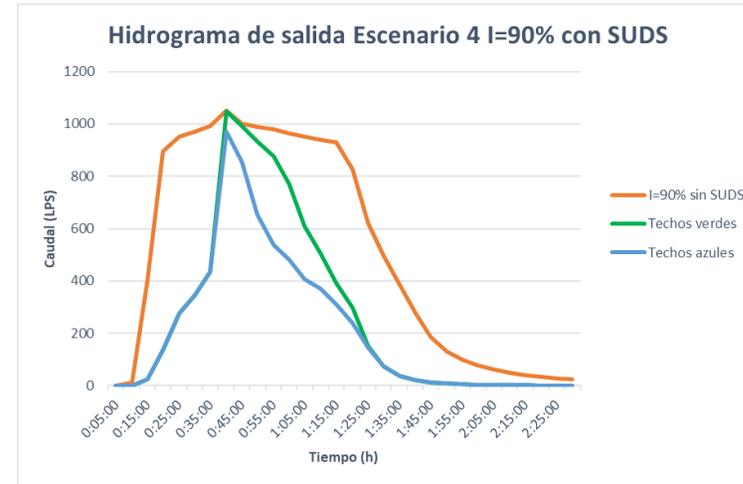
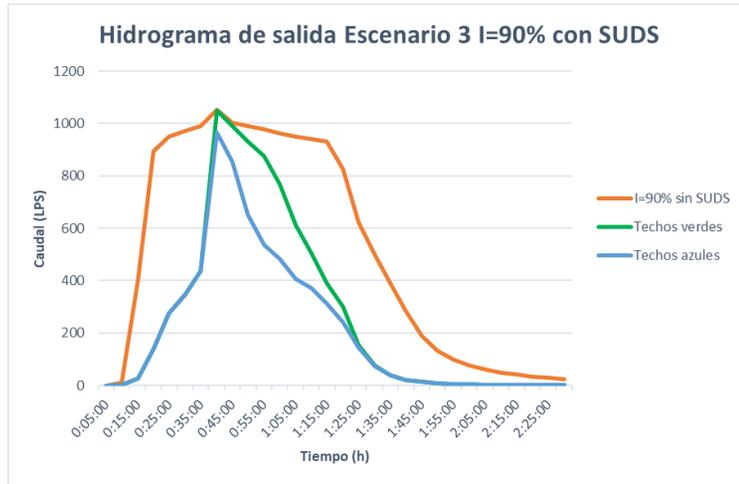




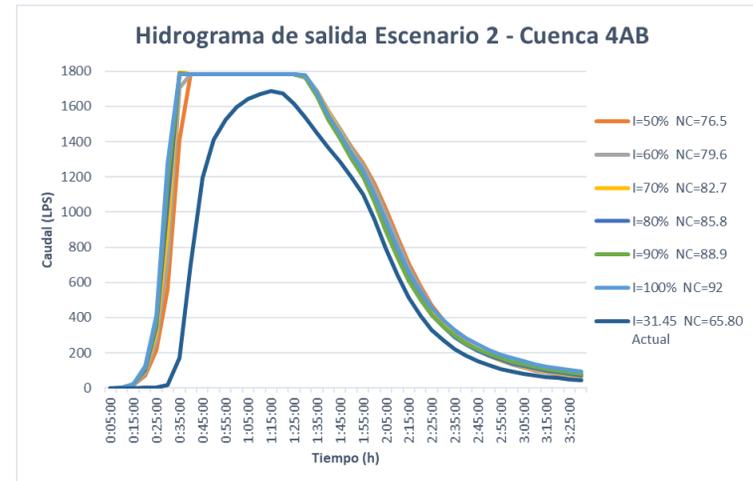
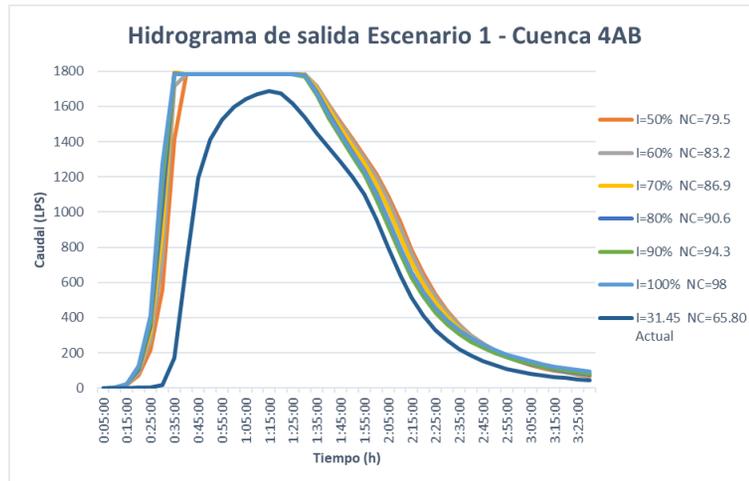
## Anexo 8. Hidrogramas de salida Cuenca 4AA

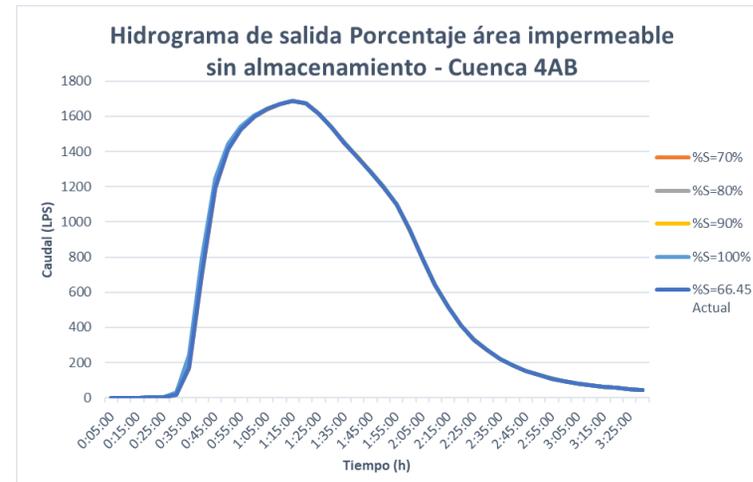
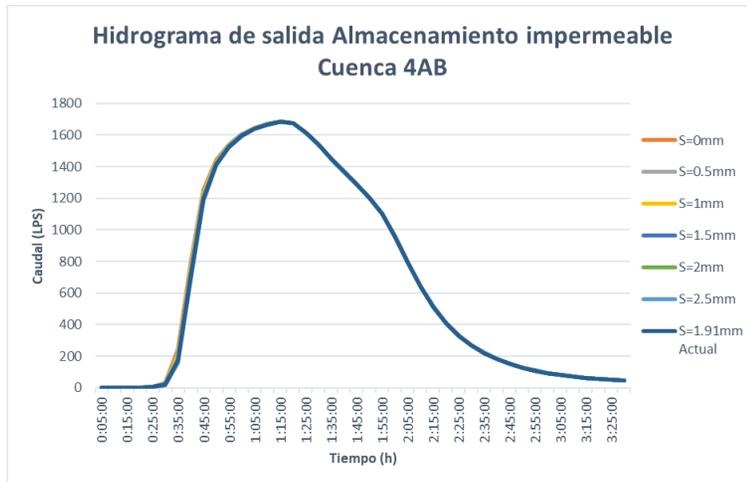
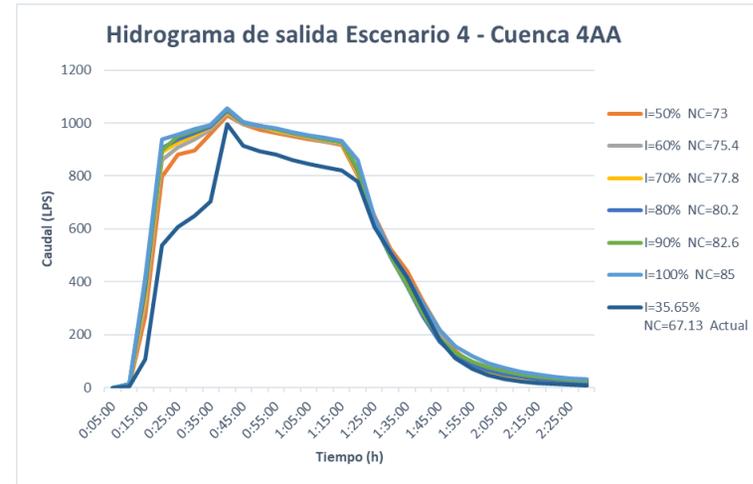
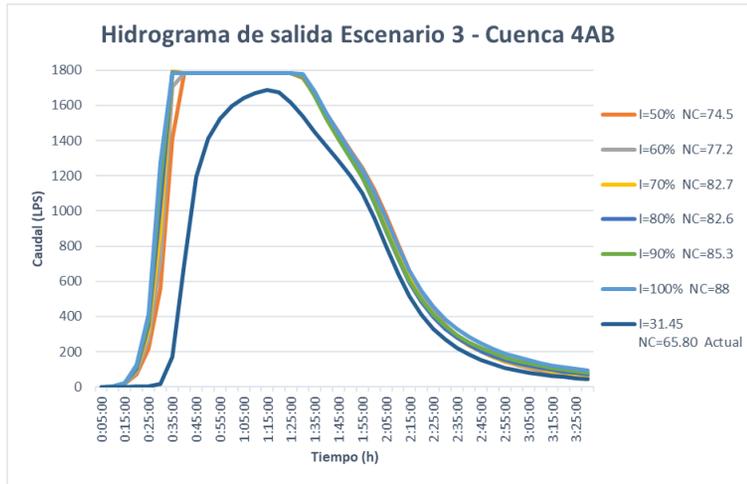


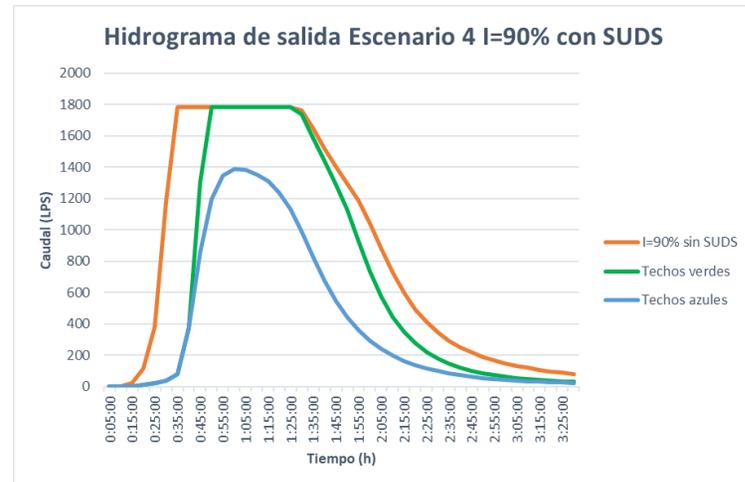
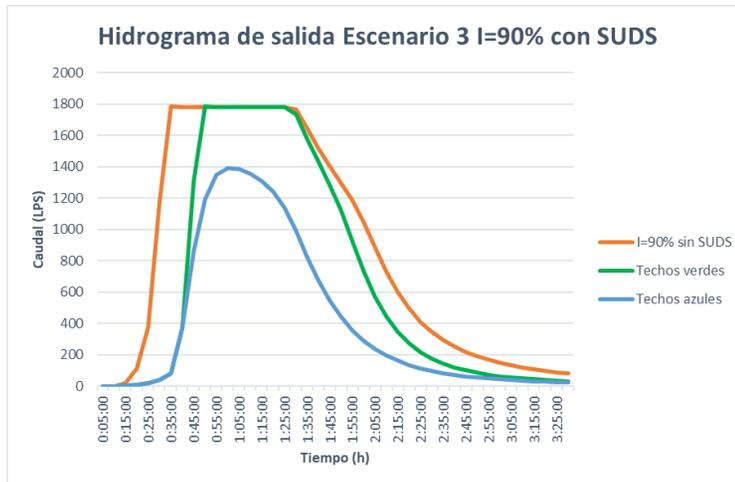
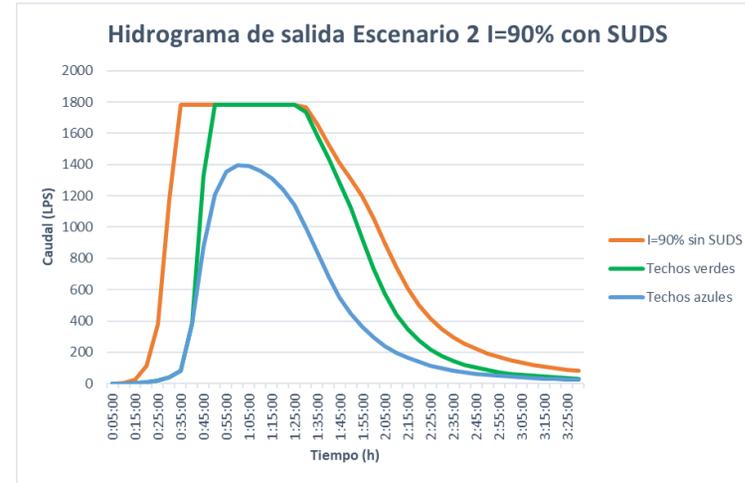
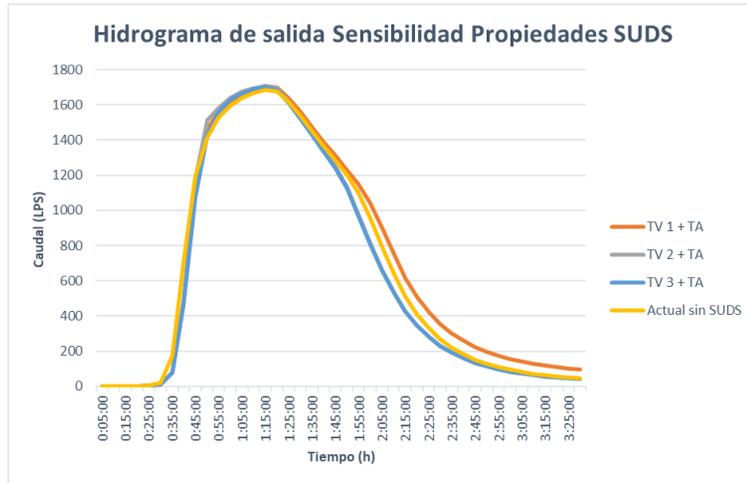




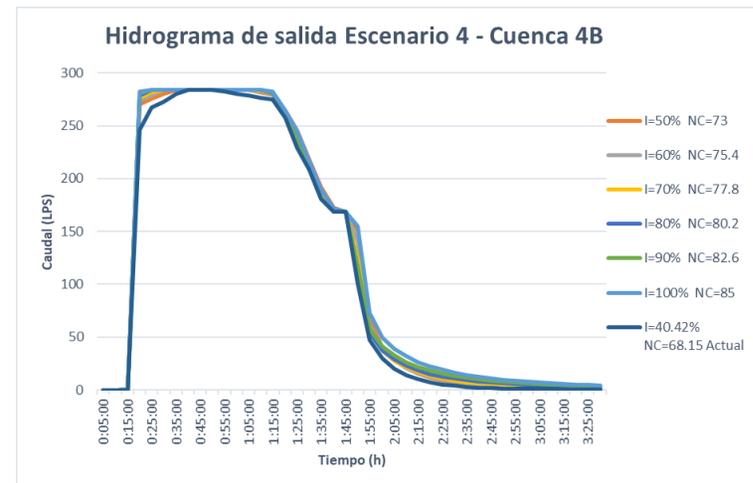
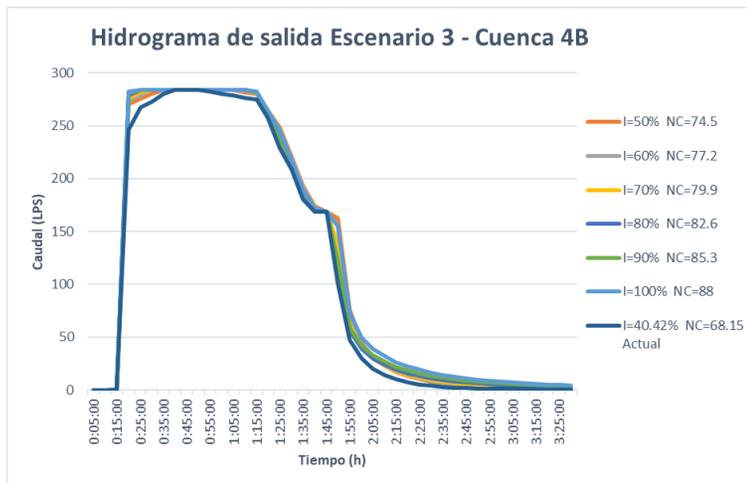
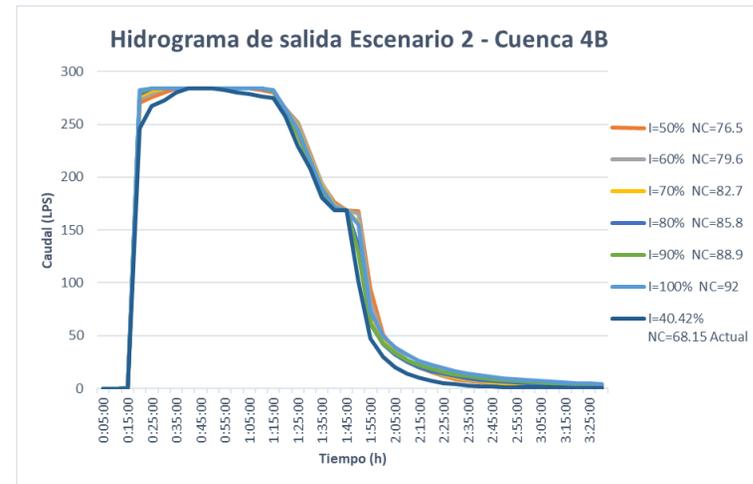
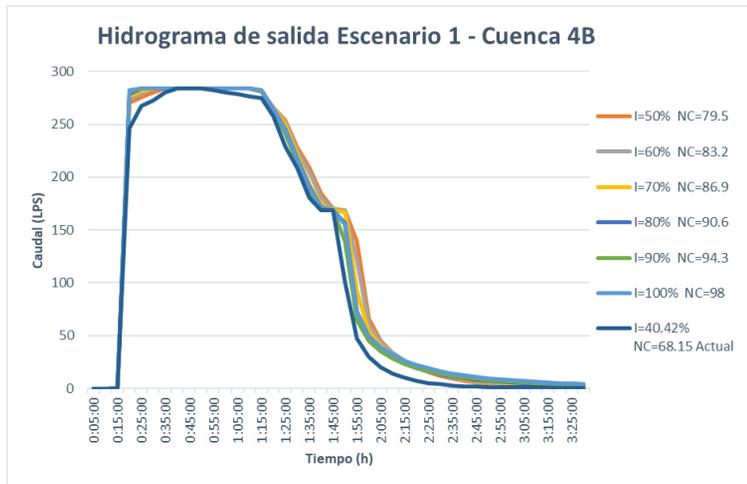
## Anexo 9. Hidrogramas de salida Cuenca 4AB

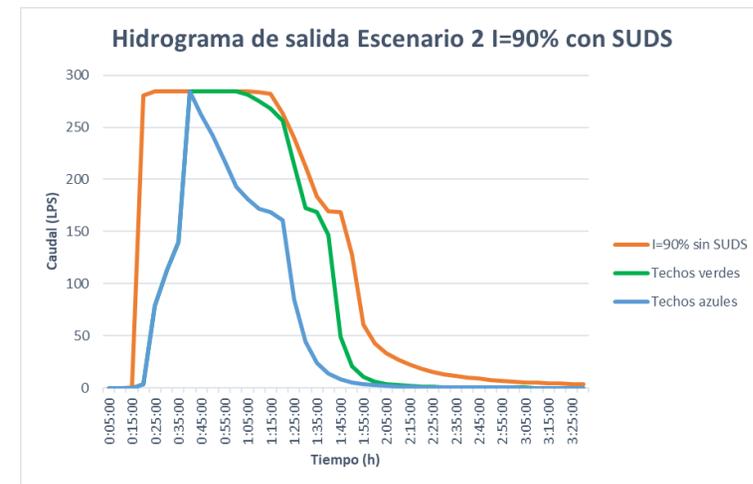
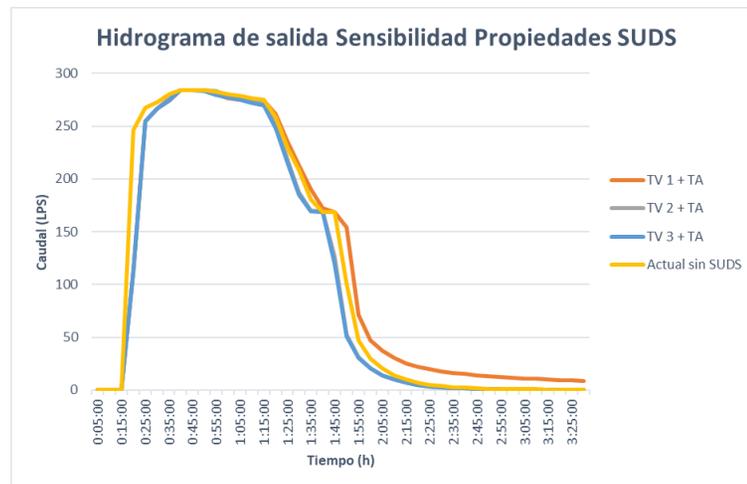
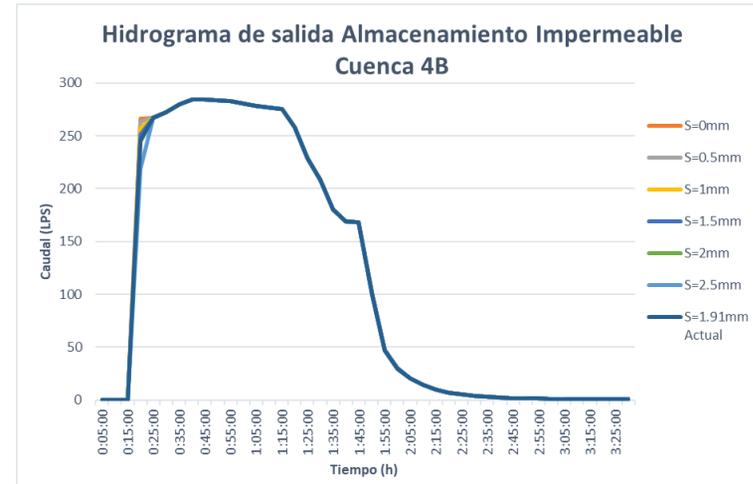
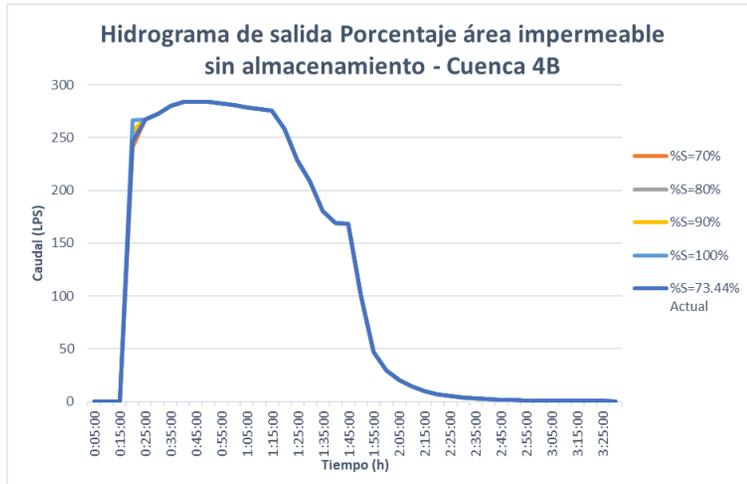


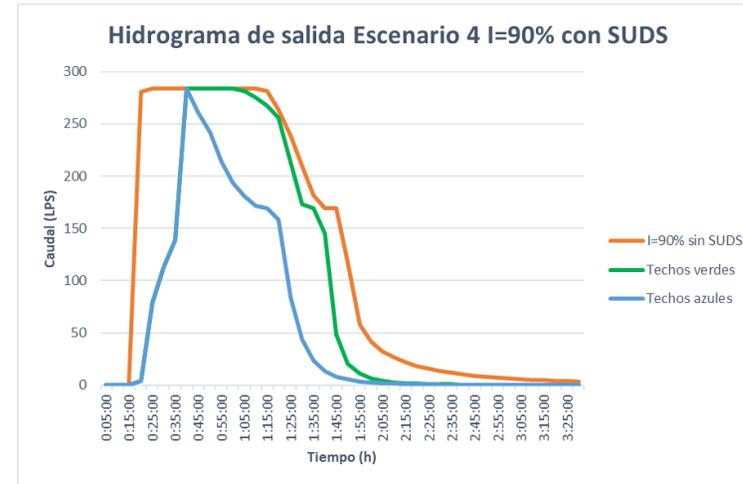
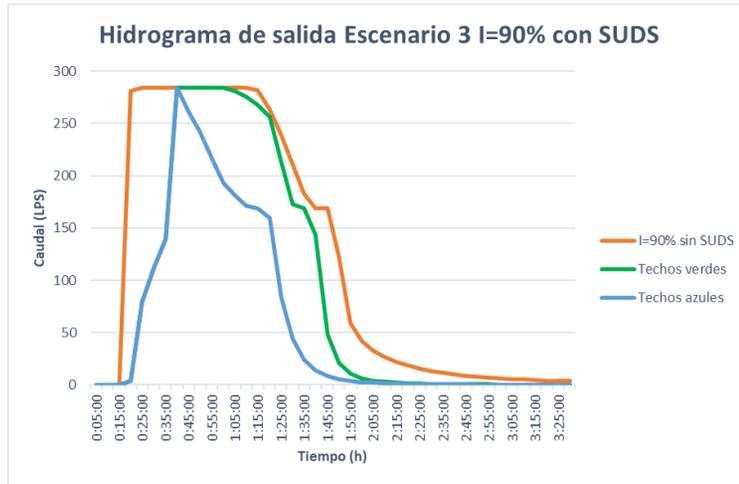




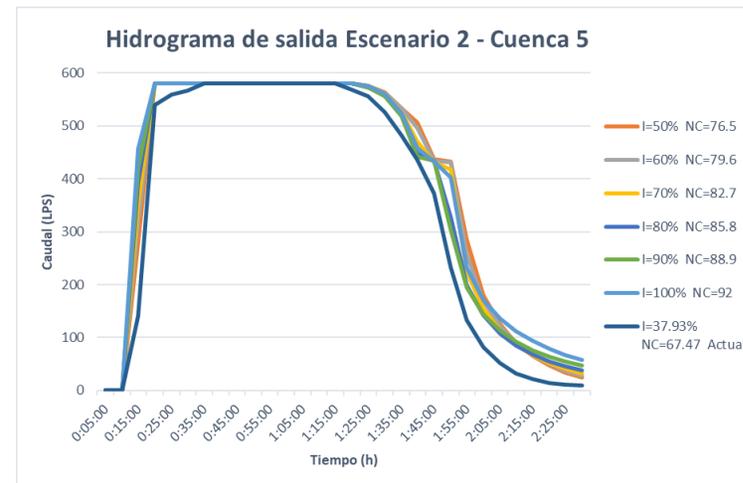
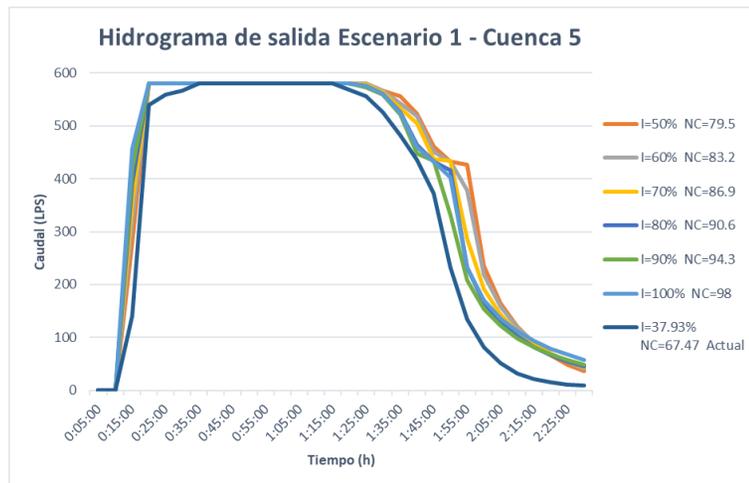
## Anexo 10. Hidrogramas de salida Cuenca 4B

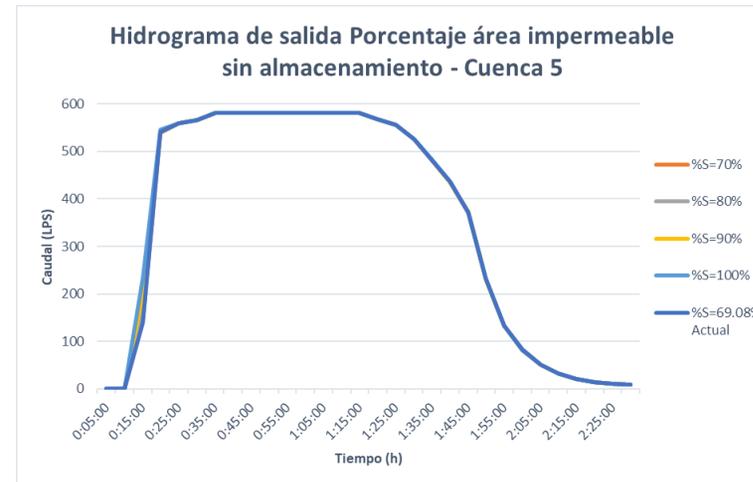
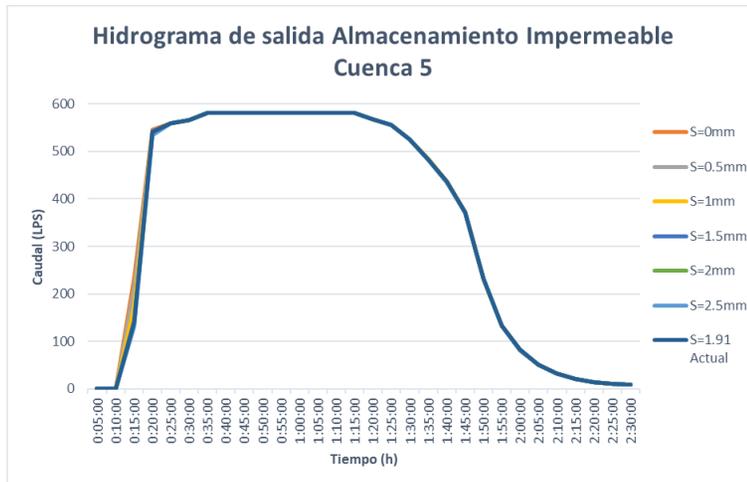
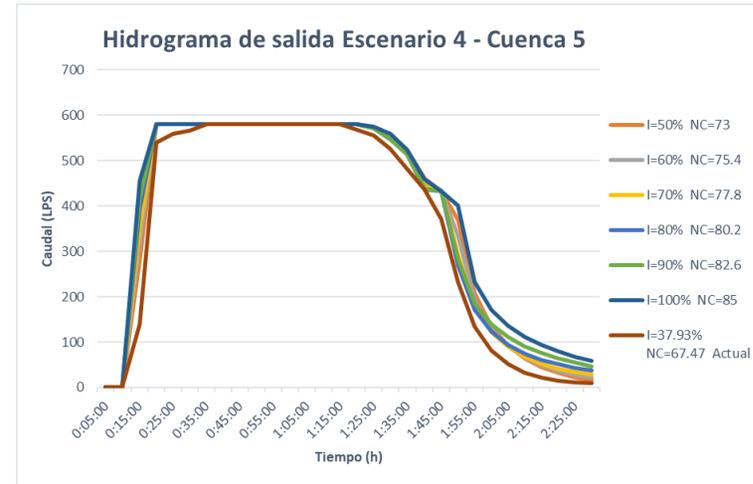
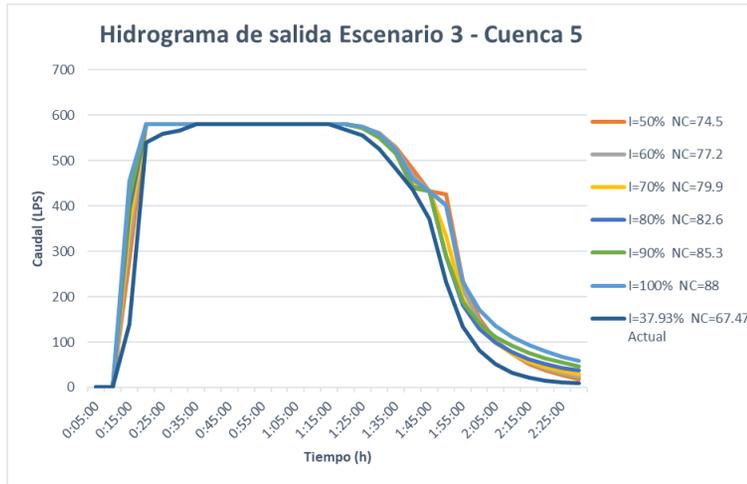


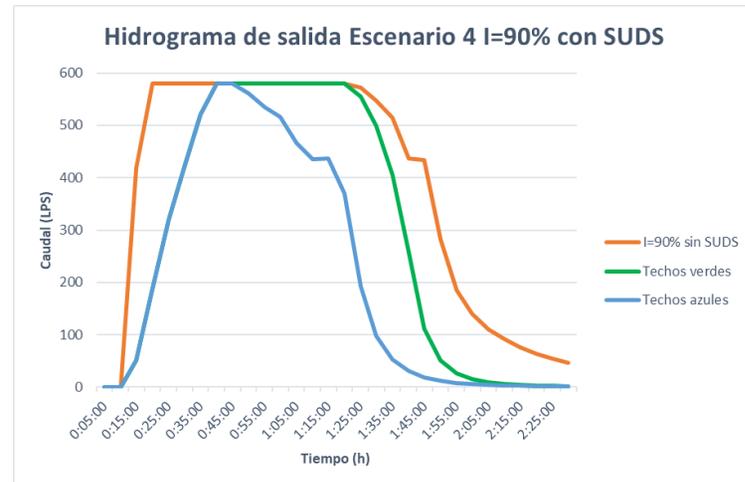
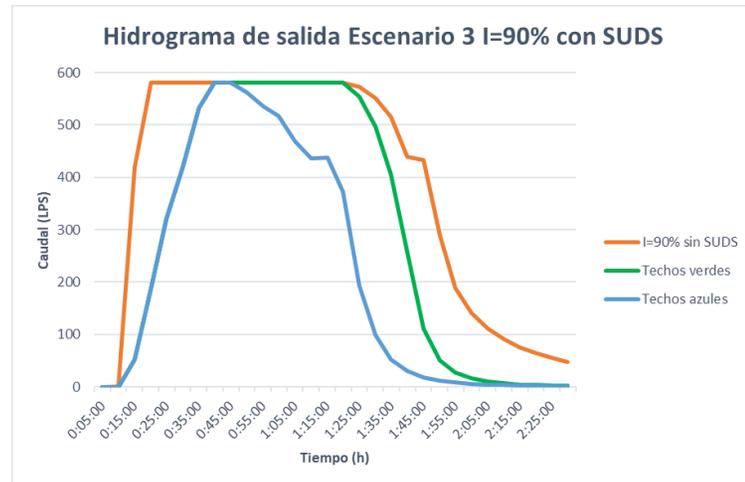
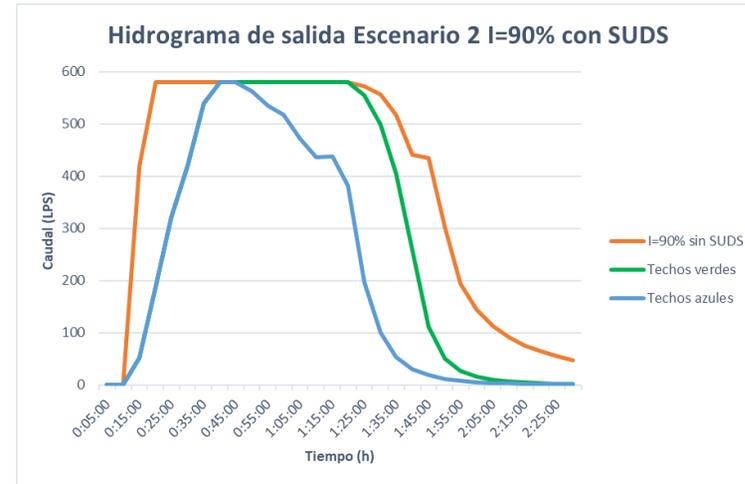
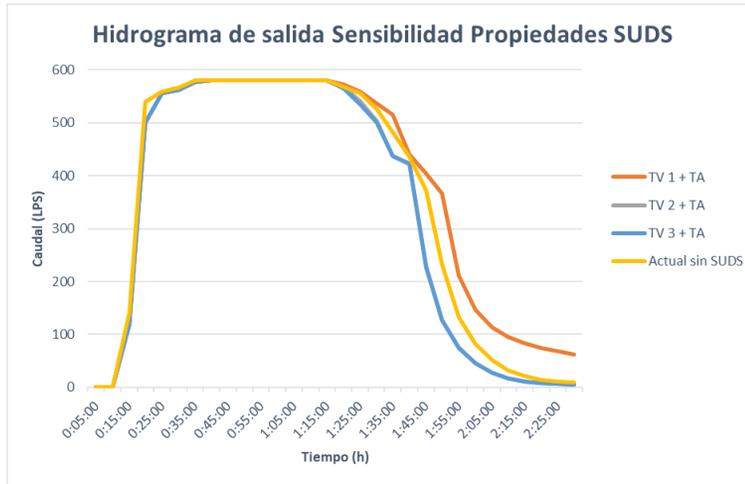




## Anexo 11. Hidrogramas de salida Cuenca 5







## Anexo 12. Hidrogramas de salida Cuenca 6

