

Aumento De Las Inundaciones En Las Zonas Urbanas Debido Al Cambio Climático

Autor

Johana Andrea Capacho Rincón

Universidad De Pamplona

Programa De Ingeniería Civil

Director, Ing. Diego Iván Sánchez Tapiero

Pamplona, Colombia.

Agosto 2023.

Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios por ser quien guía cada una de mis decisiones y acciones, por tomar siempre mi mano y no permitir que desfalleciera en tantos intentos.

A mi Universidad por permitir convertirme en profesional, y a cada docente que hizo parte de este proceso tan enriquecedor.

A mi familia, por ser el apoyo incondicional, y económico el cual hizo que se pudiera materializar este sueño, a mi hija, quien es el motor más grande para luchar por las cosas que se anhelan, y a todas las personas que hicieron parte de este proceso.

Johana Andrea Capacho Rincón

Contenido

Aumento De Las Inundaciones En Las Zonas Urbanas Debido Al Cambio Climático	10
Cambio climático	11
Causas naturales de origen externo:.....	13
Causas naturales de origen interno:	13
Aumento de precipitaciones debido al cambio climático	14
Desastres naturales debidos al cambio climático.....	15
Inundaciones por aumento de precipitaciones	17
Tipos de inundaciones.....	18
Inundación repentina.....	18
Inundación costera	19
Inundaciones urbanas.....	20
Las principales razones del aumento de los daños por inundaciones	21
Ocupación de áreas propensas a inundaciones	21
La continua expansión de tierras agrícolas cada vez más intensivas.....	22
Sellos de suelo imparables	23
Nueva infraestructura que impide el drenaje natural	23
La protección contra inundaciones exagera los daños cuando ocurren inundaciones	24
Ocupación del área hídrica.....	24
Ejes de acción para la reducción de riesgos de inundaciones	25

Respeto hacia las áreas de inundación	25
Devolver el espacio al río	26
Implementación de dimensiones naturales para las tierras agrícolas.....	27
Implementación de sistemas de drenajes urbanos sostenibles	27
Cunetas verdes	28
Techos verdes.....	31
Filtros de arena.....	33
Pavimentos permeables.....	35
¿Cómo los SUDS disminuyen las inundaciones?	36
Análisis planteados	43
Estudio a la sensibilidad para la impermeabilidad.....	43
Análisis de sensibilidad propiedades SUDS	44
Análisis de riesgo de inundación	45
Resultados y análisis	46
Análisis de sensibilidad parámetros de impermeabilidad.....	46
Referencias bibliográficas.....	57

Lista de figuras

Imagen 1, Radiografía de los efectos del cambio climático en los últimos ocho años (Europa Press, 2022).....	11
Imagen 2, fenómenos naturales ((TOMi.Digital - Fenómenos naturales, s. f.)	13
Imagen 3, Cambio climático influyó en la lluvia de los huracanes en 2020 (Sinc, 2022).....	14
Imagen 4, el cambio climático causa el 90% de los desastres naturales (Ambiental, 2019)	16
Imagen 5, sección transversal de un río (Floodup, 2016)	19
Imagen 6, Inundación costera (World Metereological Organization, 2019)	20
Imagen 7, Afectados por las inundaciones (El Espectador, 2022)	21
Imagen 8, Las inundaciones dañan las producciones hortícolas del Campo de Cartagena (Valencia Fruits, 2020)	22
Imagen 9, Sistema de Drenajes Urbanos Sostenibles (Uniandes, 2016)	24
Imagen 10, ¿Cómo protegernos de las inundaciones fluviales? (SURA, 2020).....	25
Imagen 11, Riesgo por inundación (IDIGER, 2015)	26
Imagen 12, cuneta verde en Bogotá (Sistemas de drenaje urbano sostenible, s. f.)	29
Imagen 13, Vista aérea del sistema MySUDS del Parque San Cristobal (Sistemas de drenaje urbano sostenible, s. f.)	30
Imagen 14, Techos Ecológicos Sustentables (Plantas y Jardín, 2013)	31
Imagen 15, vista aérea prisión de Tuluá en Colombia (Tropical Commons, 2018)	33
Imagen 16, filtro de arena (Abellán, 2016).....	34
Imagen 17, Impacto de la Urbanización en el Sistema de Drenaje Natural (Interpave, 2008).....	35
Imagen 18, área de estudio del municipio de Cajicá. (Bonilla Triana, 2019).....	37
Imagen 19, Configuración de Población en Zonas Urbanas y Rurales en el Área de Análisis	

(Bonilla Triana, 2019).....	38
Imagen 20, Curvas IDF (Empresa de Servicios Públicos de Cajicá, 2018).....	39
Imagen 21, características cuenca 2 (Bonilla Triana, 2019).....	40
Imagen 22, características cuenca 3 (Bonilla Triana, 2019).....	40
Imagen 23, características cuenca 4AA (Bonilla Triana, 2019)	41
Imagen 24, características cuenca 4AB (Bonilla Triana, 2019)	41
Imagen 25, características 4B (Bonilla Triana, 2019)	42
Imagen 26, características cuenca 5 (Bonilla Triana, 2019).....	42
Imagen 27, características cuenca 6 (Bonilla Triana, 2019).....	43
Imagen 28, análisis número de curva (Bonilla Triana, 2019).....	44
Imagen 29, propiedades modeladas de los techos verdes (Bonilla Triana, 2019)	45
<i>Imagen 30, resultados en condiciones actuales (Bonilla Triana, 2019)</i>	<i>46</i>
Imagen 31, análisis de curva cuenca 3 (Bonilla Triana, 2019).....	47
Imagen 32, análisis número de curva cuenca 4AA (Bonilla Triana, 2019).....	47
Imagen 33, análisis número de curva cuenca 4AB (Bonilla Triana, 2019)	48
Imagen 34, análisis de curva cuenca 4B, (Bonilla Triana, 2019)	48
Imagen 35, análisis de número de curva de la cuenca 5 (Bonilla Triana, 2019)	49
Imagen 36, análisis de curva cuenca 6 (Bonilla Triana, 2019).....	49
Imagen 37, Exploración de los Efectos de la Profundidad de Almacenamiento en Áreas No Permeables en Cuencas 2, 2, 4AA y 4AB (Bonilla Triana, 2019).....	51

Imagen 38, Examen de la Profundidad de Almacenamiento en Áreas Impermeables en las Cuencas 4B, 5 y 6 (Bonilla Triana, 2019)	51
Imagen 39, , Examen del Impacto del Porcentaje de Área Impermeable sin Capacidad de Almacenamiento en las Cuencas 2, 3, 4AA y 4AB. (Bonilla Triana, 2019)	52
Imagen 40, , Exploración de las Implicaciones del Porcentaje de Área Impermeable sin Almacenamiento en las Cuencas 4B, 5 y 6. (Bonilla Triana, 2019).....	53
Imagen 41, análisis de sensibilidad propiedades SUDS cuenca 2, 3, 4AA, 4AB, 5 y 6 (Bonilla Triana, 2019).....	54
Imagen 42, resultados volumen de inundación sensibilidad propiedades SUDS (Bonilla Triana, 2019)	55
Imagen 43, resultados volumen de inundación escenarios proyectados (Bonilla Triana, 2019)..	56
Imagen 44, Evaluación del Riesgo de Inundación en Escenarios Proyectados (Bonilla Triana, 2019)	56

Resumen

Las soluciones basadas en la naturaleza contra inundaciones, basadas en sistemas de drenaje urbanos sostenibles (SUDS) es una manera innovadora de contraponer las consecuencias por inundaciones en áreas urbanas; por medio de técnicas, métodos y ciencias que buscan recoger en almacenamientos naturales la mayor parte de las lluvias, buscando que el agua se filtre a través del suelo y no evacue a las zonas urbanas. Estos SUDS brindan beneficios a las comunidades desde el hecho de evitar inundaciones, hasta mejorar la calidad del agua, haciéndola más limpia y saludable para todos los seres y hábitats. Los sistemas basados en la naturaleza para drenajes urbanos son sostenibles y económicos a diferencia de sistemas convencionales; los mantenimientos son menos frecuentes y los costos se disminuyen debido a su operación. Estos espacios verdes brindan servicios extras al planeta en general, aportando a la reducción de la huella ecológica y a todos los beneficios que este conlleva.

Palabras clave: Drenaje, inundaciones, lluvias.

Abstract

Nature-based solutions against flooding, based on sustainable urban drainage systems (SUDS) is an innovative way to counter the consequences of flooding in urban areas; through techniques, methods and sciences that seek to collect most of the rain in natural storage, seeking that the water filters through the ground and does not evacuate to urban areas. These SUDS provide benefits to communities from preventing flooding to improving water quality, making it cleaner and healthier for all beings and habitats. Nature-based systems for urban drainage are sustainable and economical unlike conventional systems; maintenance is less frequent and costs are reduced due to its operation. These green spaces provide extra services to the planet in general, contributing to the reduction of the ecological footprint and all the benefits that this entails.

Keywords: Drainage, floods, rains.

Aumento De Las Inundaciones En Las Zonas Urbanas Debido Al Cambio Climático

El acto humano de urbanizar zonas para beneficio común y fácil acceso a muchas situaciones ha sido la principal causa de la reducción de zonas verdes que permiten la infiltración del agua proveniente de las precipitaciones pluviales; llevando esto a la generación de inundaciones en periodos de lluvia. La mayoría de las ciudades no tienen un sistema adecuado para controlar las inesperadas escorrentías, lo cual produce crecientes en espacios públicos.

Las soluciones naturales para inundaciones son precisamente las estrategias acopladas para abordar estas situaciones a partir de la adaptación de situaciones actuales; es aquí donde se incluyen los métodos de hacer techos verdes, humedales urbanos y pavimentos permeables; todas estas técnicas procuran disminuir el efecto negativo que producen los fenómenos climáticos, desde el exceso de lluvia, hasta la escasez de este evento.

La preferencia por las medidas de ingeniería está motivada principalmente por la necesidad de proteger el implacable proceso de urbanización de las inundaciones. Esto explica no solo las ocupaciones directas de espacios propensos a inundación y de parámetros hidrológicos como la escorrentía superficial y la evaporación. Sumado a esto, el incremento en la periodicidad e intensidad de los eventos climáticos extremos impacta en el cambio climático. Como resultado, las inundaciones siguen ocupando un lugar destacado en la lista de pérdidas humanas y económicas en muchas partes del mundo. (Centre for Research on the epidemiology of disasters, 2022)

Cambio climático

El cambio climático es el fenómeno que causa la mayor problemática para el funcionamiento normal de los territorios. Este fenómeno natural se define como cualquier alteración en el clima a través de algún periodo, procedente de reacciones naturales o debido a la provocación humana por actividades cotidianas (IPCC, 2007).

Esta situación es enfrentada por toda la población, donde las temperaturas han variado inesperadamente, ocasionando alteraciones en las precipitaciones, deshielo en los nevados, y sequías a nivel mundial. Las consecuencias del cambio climático provocan desastres naturales donde los países con mayores recursos son capaces de afrontar la situación con mayor facilidad, siendo entonces mayormente los países con menores recursos limitados a tomar decisiones frente a estas situaciones extraordinarias (López & Hernández, 2016).

Las proyecciones climáticas se dirigen a incrementos de temperatura para el 2050 entre el 1°C y 2°C, y para finales del siglo del 1°C al 3.7°C, con posibilidad de un extremo de 4.8°C. (Sánchez & Reyes, 2015)



Imagen 1, Radiografía de los efectos del cambio climático en los últimos ocho años (Europa Press, 2022)

El cambio climático se conoce como el ciclo de cien mil (100.000) años aproximadamente, donde en su transcurso se dan cambios entre la era glacial con duración del 80%, y la era interglacial con duración del 20%; ha sido significativo en los últimos años el aumento de CO₂; y demás gases de efecto invernadero han sobrepasado los récords de los 4 ciclos anteriores, permitiendo la proyección de una situación de contrapeso en el clima terrenal que permita un nuevo equilibrio. (Sánchez & Reyes, 2015).

Este fenómeno se considera un cambio en el clima causado directa o indirectamente a la actividad humana, que permite la alteración de los componentes atmosféricos a nivel mundial y que contribuye a los notables cambios del clima por prolongados lapsos de tiempo. (CMNU, 1992).

En Latinoamérica, los efectos del cambio climático posiblemente provocarán sequedad de suelos, los bosques tropicales serán sustituidos por sabanas, y se desertificarán las tierras de cultivos; a su vez se afectará la disponibilidad de agua para consumo agrícola o humano.

Se define este fenómeno como la variación inusual identificable del clima (pruebas estadísticas) de sus valores y de sus propiedades que es constante durante extensas épocas. Esto se debe a procesos naturales internos o forzosos en los ciclos que afectan los componentes de la atmósfera y del suelo. (IPCC, 2013).

Las consecuencias de este fenómeno son notables a nivel global, se puede verificar en el derretimiento de glaciares, las precipitaciones irregulares, las inundaciones, los fuegos forestales, los ciclones tropicales y demás fenómenos extremos que altera la tranquilidad humana y de los ecosistemas. A lo largo de la historia, las mareas altas han sido la causa de inundaciones dañinas que han afectado a incontables personas alrededor del mundo.



Imagen 2, fenómenos naturales ((TOMi.Digital - Fenómenos naturales, s. f.)

Causas naturales de origen externo:

- Alteración en la originalidad de la órbita terrestre en un tiempo de cien mil años.
- Variación en la inclinación del eje de rotación de la tierra en un periodo de cuarenta y un mil años.
- Modificación en los movimientos o el número de manchas solares en un periodo de once años.

Causas naturales de origen interno:

- La distribución del mar y la tierra
- Las erupciones volcánicas
- Las corrientes oceánicas

(Jiménez, Capa y Lozano, 2004)

Aumento de precipitaciones debido al cambio climático

El aumento de precipitaciones es un suceso pronosticado debido al cambio climático; se prevé que la climatología a futuro genere mayor cantidad lluvias extremas, incluso en las regiones que muestran proyecciones de sequía. (Observatory, 2017).

El IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) sostiene que cuentan con evidencias certeras de que el cambio climático influirá negativamente en la distribución de la mayoría de los climas en el mundo (IPCC, 2007).



Imagen 3, Cambio climático influyó en la lluvia de los huracanes en 2020 (Sinc, 2022)

En base a las simulaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, las precipitaciones extremas aumentarán si se siguen incrementando los gases de efecto de

invernadero. Los gases que han sido influidos directamente por el ser humano han permitido la transformación de precipitaciones, generando que estas sean intensas y extremas en algunas zonas. La variación en las precipitaciones ha provocado alteraciones en la secuencia relacionada a los fenómenos de sequía e inundación en muchas zonas (Useros, 2012).

Desastres naturales debidos al cambio climático

Los desastres naturales son eventos con magnitudes significativas, que ocurren de manera repentina, por un periodo corto y que deja consecuencias de pérdidas humanas y materiales innumerables. Es un suceso que impacta las sociedades, produciendo desastres y pérdidas. (Gelman, 1996).

También se considera como un hecho donde participan eventos provocados por la naturaleza, la tecnología o la antropogénica extremo que varía la operación de las actividades productivas y sociales de una comunidad. (Oswald, 2011)

La frecuencia con lo que se han estado presentando los desastres naturales han aumentado notablemente en los últimos años, donde se registran crecimiento en la cantidad de eventos climatológicos como sismos, lluvias, inundaciones y olas de calor, que son los eventos responsables de la destrucción de viviendas cuando ocurren.



Imagen 4, el cambio climático causa el 90% de los desastres naturales (Ambiental, 2019)

El ser humano por naturaleza busca mejorar las condiciones de vida a partir de su instinto de supervivencia en cuanto a las acciones y reacciones de su hábitat, lo que se logra mediante la interacción ser humano-medio ambiente, de acuerdo a cada fenómeno natural y la vulnerabilidad que presenta frente a este.

A lo largo de la historia las culturas han sido víctimas de las consecuencias de los desastres naturales, que deja personas heridas, pérdidas humanas e innumerables pérdidas materiales, dejando huellas en la humanidad con estos hechos que han trascendido en la memoria de cada uno hasta el día de hoy.

Un desastre es un evento que se da en un transcurso de tiempo y ocupando un espacio, en el cual una población, o una parte de ella sufre daños severos como pérdidas de sus conocidos y

familiares y pertenencias materiales; donde la estructura social se ve impedida para cumplir sus actividades cotidianas. (Fritz, 1961).

A partir de las amenazas en base a la reacción de las poblaciones afectadas, J. W. Anderson en 1968 lo define como un evento crítico, que altera sistemática y físicamente la cotidianidad de las personas, no es más que una perturbación en la tranquilidad del día a día.

El impacto sobre la estructuración de una población, por un fenómeno externo capaz de acabar con una vida humana o con los recursos necesarios para la supervivencia, en una amplia magnitud, enciende la inquietud y genera el sobresalto de los servicios de ayuda de prevención y/o tratamiento de estas situaciones. (Shah, 1985).

En cambio, Raphael en 1986 define los desastres naturales como acciones usadas para poner a prueba las respuestas de adaptación de las poblaciones y/o individuos superiores a la capacidad de desorganización de las funciones comunitarias o individuales, que pueden conducir transitoriamente a trastornos en ellos.

Inundaciones por aumento de precipitaciones

Una inundación es la invasión del agua en una zona que generalmente es seca; esto es debido en casi todos los casos, a la presencia inesperada de agua mayor a la que se puede drenar. También existen causas diversas que pueden generar una inundación, o bien sea, un conjunto de causas.

Los principios naturales que pueden ocasionar una inundación son las lluvias, las olas y el deshielo; y los principios no naturales puede ser el desplome de una presa.

Las inundaciones normalmente se producen en zonas repetitivas, es decir, donde se frecuenta este fenómeno; este hecho puede prevenirse con previsión meteorológica y una correcta planificación urbanística. Cuanto más natural sea el entorno, habrá menor deterioro tanto en las áreas frecuentadas por el fenómeno, como en las que no; debido a que sucesos extraordinarios como las lluvias fuertes repentinas, pueden llenar los cursos de agua en corto tiempo.

El flujo abrupto presenta peligro en esta alteración cuando se olvida que los lechos de los ríos, torrentes y arroyos, en algún momento se llenarán de gran cantidad de agua capaz de arrasar todo lo que se tropiece en su camino; por ello es recomendable conocer el entorno del río, si hay árboles en las orillas, etc. (¿Qué son las inundaciones?, 2020)

La adaptación a los cambios climáticos es una necesidad para soportar las variaciones de las formas de vida que puede dejar un evento atmosférico; en este caso son las administraciones locales las que deben enfrentar de primera mano, implementando políticas que aporten a la reducción de fragilidad ambiental, económica y social, esto a partir de Planes de Ordenamiento Territorial y/o Planes de Desarrollo, que den alternativas de trasladarse a terrenos con mayor seguridad y sostenibilidad.

Tipos de inundaciones

Inundación repentina

Las inundaciones repentinas se producen luego de lluvias en exceso en minutos o en horas, o cuando se presenta una deficiencia en un dique, o luego de la imprevista liberación de agua por acumulación de hielo.

Las inundaciones repentinas en su mayoría son producto de tormentas eléctricas con efecto repetitivo sobre una misma área o por tormentas tropicales.

Son varios los casos, donde son tan inesperadas las inundaciones que no hay espacio para alertar a las personas de las zonas aledañas a que se reubiquen en un lugar seguro. («Seguridad ante las Inundaciones Repentinadas», s. f.)

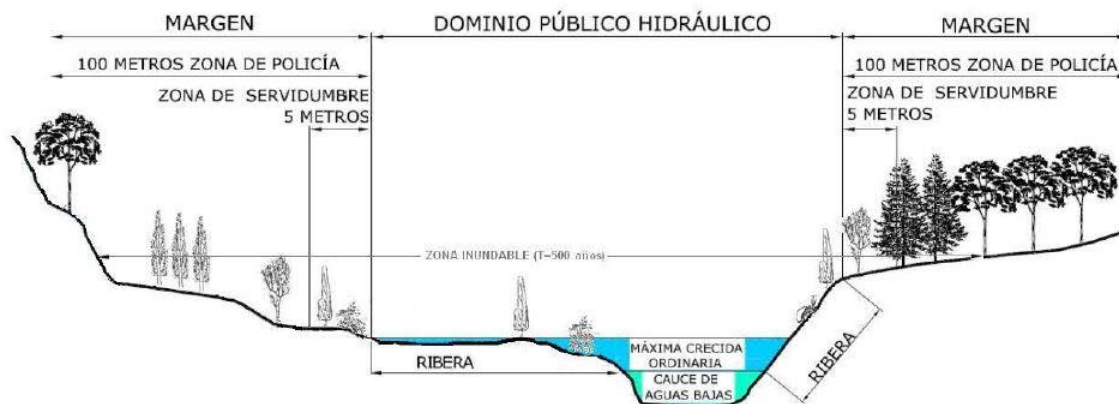


Imagen 5, sección transversal de un río (Floodup, 2016)

Inundación costera

Este tipo de inundación es producto de mareas altas capaces de sobrepasar el nivel de edificaciones y poner en riesgo la seguridad de los habitantes. Este evento también puede presentarse en estuarios.

El nivel del mar varía continuamente por fenómenos de la atmosfera, o del mar, o de las placas tectónicas, o de todo el sistema planetario, siendo dependiente de esto las oscilaciones en escala temporal.

En las zonas donde desembocan los mares, se tienen consecuencia de mayor magnitud a diferencia de las zonas más lejanas, debido a que cuando el nivel del mar es tan alto que no puede devolverse al mar, se propaga en los terrenos bajos más cercanos. (Steffens, 2022)



Imagen 6, Inundación costera (World Metereological Organization, 2019)

Estas zonas son complejas por la cantidad de procesos que se dan en ellos, donde gran parte de estas zonas ha sido urbanizada por los seres humanos; en conjunto con ello, el cambio climático es un gran influyente las mareas altas y la susceptibilidad de las poblaciones habitantes en estas áreas, siendo este problema actualmente uno de los riesgos más grandes. (Del, 2021)

Inundaciones urbanas

Estas inundaciones ocurren en áreas densamente pobladas como: En áreas urbanas, donde los sistemas de alcantarillado y drenaje son inadecuados o insalubres, el flujo de agua producido por las fuertes lluvias no se puede desviar. En áreas urbanas mal planificadas y áreas propensas a inundaciones, la deforestación y la abundancia de cemento provocan la escorrentía de las precipitaciones. Dificultades en el drenaje de carreteras y caminos, alcantarillas y cuerpos de agua descuidados hacen que el agua se estanque como los ríos en las calles, provocando

inundaciones que paralizan las ciudades, y los arroyos responden con más rapidez por la falta de vegetación. Para disminuir el efecto de las inundaciones urbanas, todos los municipios y todos en sus barrios deben asegurarse de que sus sistemas de drenaje estén libres de escombros y escombros. (Rico, 2019)

Las principales razones del aumento de los daños por inundaciones

Ocupación de áreas propensas a inundaciones

La razón principal de los daños consecuentes de las inundaciones, es la inundación de viviendas e infraestructura; generando un alto riesgo para la comunidad que no cumplen las normas de construcción de llanuras aluviales.



Imagen 7, Afectados por las inundaciones (El Espectador, 2022)

Se tiene presente la reyertera del ordenamiento territorial y urbanístico que reincide en las sociedades autónomas. Estas administraciones son las responsables del componente principal que impulsan el aumento de daños consecuencia de las inundaciones. Inicialmente, por el gran peligro de personas y propiedades en estas zonas partidarias de inundaciones. (Marinez, 2019).

La continua expansión de tierras agrícolas cada vez más intensivas

La agricultura industrial y el riego intensivo sin prácticas de conservación alterará la dinámica hidrodinámica de grandes áreas del territorio, aumentando la esorrentía de las fuertes lluvias se hará más intensa, dañando aguas abajo a medida que llega más agua en menos tiempo, provocando más acumulaciones e inundaciones que antes. Los derrames y sus efectos nocivos aumentan a través del proceso.



Imagen 8, Las inundaciones dañan las producciones hortícolas del Campo de Cartagena
(Valencia Fruits, 2020)

La cobertura vegetal del suelo se reduce en áreas donde se crean nuevas áreas de riego, principalmente por labranza de áreas que antes estaban cubiertas de vegetación natural. Vegetación natural, incluidos matorrales y vegetación arbustiva, debe tenerse en cuenta tal como existe naturalmente en las regiones áridas.

En segundo lugar, la compactación agrícola en sí también eliminó la vegetación nativa en lugares agrícolas característicos, lo que aumentó la escorrentía por los motivos ya explicados. Ya no se adoptan las prácticas de preservación de suelos y aguas que se aplicaban a los cultivos mediterráneos tradicionales. (Marinez, 2019).

Sellos de suelo imparables

Asistimos a un aumento de los sellos de suelo causados por el desarrollo urbano y la proliferación de edificios e instalaciones de todo tipo, desde centros comerciales hasta infraestructuras de todo tipo. Las áreas impermeables más grandes aumentan la escorrentía y los daños por inundación por la misma cantidad de precipitación, especialmente en áreas urbanas. (Marinez, 2019).

Nueva infraestructura que impide el drenaje natural

La aceleración del desarrollo urbano no solo se asocia con la ocupación de áreas inundables y el aumento de los bloqueos, sino también con la nueva infraestructura (carreteras, carreteras, rotondas, También se asocia con la construcción de taludes), lo que provoca división, confusión y caos. Crean barreras en las redes de drenaje, exacerban los daños causados por las fuertes lluvias, desvían el agua a áreas que antes no se inundaban y crean grandes charcos. Estos temas suelen ser ignorados o minimizados en las encuestas y en la tramitación y aprobación de obra nueva, urbanización e infraestructuras. (Marinez, 2019).

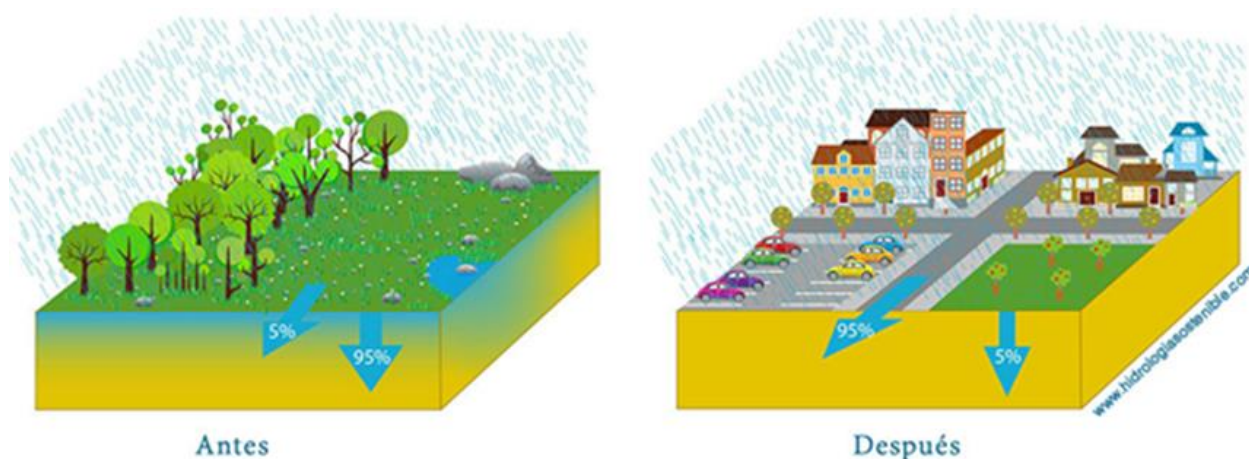


Imagen 9, Sistema de Drenajes Urbanos Sostenibles (Uniandes, 2016)

La protección contra inundaciones exagera los daños cuando ocurren inundaciones

Paradójicamente, otro factor que contribuye significativamente al aumento de daños por inundaciones es la construcción de protección hidráulica contra inundaciones (motas, terraplenes, presas estratificadas, dragados, etc.), excavaciones serpenteantes, canales). Estas obras hidráulicas distorsionan las percepciones de riesgo, crean falsa seguridad, aumentan la ocupación de áreas inundables y aumentan la exposición y la fragilidad de la comunidad y sus bienes frente a los riesgos. Además, las zanjas y los canales tienen consecuencias negativas para la exposición a inundaciones al promover una energía mayor y velocidad de inundación y aumentar el potencial de erosión y destrucción río abajo. (Marinez, 2019).

Ocupación del área hídrica

La agricultura y el crecimiento de las ciudades y las infraestructuras han reducido el espacio atribuido al río incluso en límites improbables en muchos lugares, sin olvidar que el río no posee

un curso ni un cauce (centro), sino lechos para diferentes flujos, incluidos los picos de las inundaciones del río y que todos estos son parte del río. (Marinez, 2019)



Imagen 10, ¿Cómo protegernos de las inundaciones fluviales? (SURA, 2020)

Ejes de acción para la reducción de riesgos de inundaciones

“El eje de operación fundamental con el fin de aminorar significativamente en lugar de eliminar los agravios por inundaciones es venerar las áreas inundables. La realidad es que, en las últimas décadas, las zonas inundables se han ido llenando cada vez más con todo tipo de viviendas, infraestructuras y equipamientos, aumenta la exposición de la población y el daño desde la perspectiva económica y humana es cada vez mayor, cabe recordar que la autoridad en materia espacial y la planificación urbana corresponde a las regiones y provincias, no a los estados”. (Flood prevention mechanisms, 2019).

Respeto hacia las áreas de inundación

Esto incluye evitar y eliminar pequeños bulevares y canales aguas arriba de las áreas urbanas y devolver parte del espacio de desbordamiento a ríos, bulevares y canales, causando poco daño a las personas y a la propiedad. Incluye permitir inundaciones moderadas sin inundaciones.

Inundación moderada en áreas aptas está ocupada por vegetación natural, humedales o terrenos agrícolas específicos previene o reduce el impacto de las inundaciones aguas abajo y protege las áreas urbanas. (Flood prevention mechanisms, 2019).



Imagen 11, Riesgo por inundación (IDIGER, 2015)

Devolver el espacio al río

Consiste en canalizar y eliminar obstrucciones en lechos de ríos, riachuelos y corrientes aguas arriba de áreas urbanas, devolviendo a estos cuerpos de agua parte de sus áreas de desbordamiento. Esto facilita inundaciones controladas y suaves, sin riesgo para las personas y con mínimos daños a la propiedad. Estas inundaciones controladas, en lugares adecuados con

vegetación natural, humedales o usos agrarios específicos, previenen o reducen el impacto de crecidas aguas abajo, protegiendo las áreas urbanas. (Flood prevention mechanisms, 2019).

Implementación de dimensiones naturales para las tierras agrícolas

Las medidas naturales de retenimiento de agua (NWRM) son iniciativas que la Comisión Europea financia, que se inspiran en la naturaleza y las costumbres de preservación del suelo y el agua. (Flood prevention mechanisms, 2019).

Implementación de sistemas de drenajes urbanos sostenibles

Estos sistemas se han vuelto la alternativa más viable para disminuir las crecientes y sus efectos en gran parte del planeta. Sus costos, no son tan significativos y permiten embellecer áreas en las que se lleva a cabo el proyecto. Los sistemas hidráulicos de estos, se destacan por ser ecológicos, por lo que aportan beneficios al impacto ambiental. Además, estos sistemas posibilitan el tratamiento del agua para un futuro uso humano, lo que representa una ventaja importante en áreas donde el agua potable es escasa. También permiten conservar un drenaje invariable de los lugares donde se desarrolla dicho sistema, lo que ayuda a prevenir futuras inundaciones y preservar el ecosistema natural del área. (Muños Rodriguez & Acuña Ostios, 2015)

Los SUDS, son sistemas imprescindibles para el correcto funcionamiento de zonas urbanas y la relación del los humanos y el ciclo del agua; donde se puede proveer a la población a partir de la extracción de agua del ciclo natural o mediante el proceso de impermeabilizar superficies con el fin de que las escorrentías drenen de manera natural.

Son las encargadas de proteger y restablecer de manera sustentable los ecosistemas de origen natural que abarcan un desafío común de las personas que de alguna manera obtienen beneficios a partir de la naturaleza.

Las aguas residuales y las aguas lluvias, son las dos clases de agua que requieren ser drenadas; las residuales por ser producto de usos de los seres humanos y las industrias, y las lluvias porque caen en zonas urbanas con construcciones que no permiten el drenaje natural. Estos sistemas de drenaje buscan la minimización de problemas por aguas como las inundaciones que pueden causar daños a los humanos y a los ecosistemas (Butler & Davies, 2011)

Estas soluciones brindan estrategias para preservar y recuperar los ecosistemas de manera sostenible, con el fin de brindar beneficios a la humanidad y a la biodiversidad. Los desafíos claves que son indispensables para el desarrollo económico sostenible son el cambio climático, la simplificación del riesgo de desastres, la seguridad alimentaria y del agua, la disminución de biodiversidad y la salud humana. (Commission, 2022).

Cunetas verdes

Son una referencia permeable de las cunetas, de las que se encuentran una gran cantidad y dependen de sus recubrimientos, como césped o grava. La planificación de las áreas verdes en los bordes de la carretera debe adaptarse a velocidades que no excedan 1 metro por segundo; por lo que se debe considerar al momento de diseñar esta clase de sistemas sostenibles, la pendiente y una inclinación menor al 4%. (Córdoba, 2016).

Las cunetas son canales poco profundos que se utilizan para transportar la escorrentía. Estos canales pueden ser naturales o artificiales y tienen una pendiente lateral y longitudinal. Su

objetivo es atrapar contaminantes, fomentar la absorción y disminuir la velocidad del caudal del agua de lluvia. Las cunetas están cubiertas de vegetación, por lo general césped, que actúa como filtro y reduce el flujo. Por lo general, tienen forma trapezoidal y se utilizan en terrenos con pendientes para asegurarla reducción de la velocidad de la escorrentía y su infiltración. (García, 2016)



Imagen 12, cuneta verde en Bogotá (Sistemas de drenaje urbano sostenible, s. f.)

En Colombia, en la ciudad de Bogotá, la Universidad de los Andes diseñó e implementó un piloto de un SUDS en el parque Metropolitano San Cristóbal, ubicado al suroriente de la ciudad de Bogotá; este parque cuenta con 11 hectáreas de extensión, el cual es muy visitado por la atracción de zonas verdes inmensas que tiene; este parque delimita por el Río Fucha, que en múltiples ocasiones en compañía de altas lluvias había provocado inundaciones en las zonas aledañas.

El sistema que se usó en esta zona fue la desviación del agua del río al parque, compuesto por una compuerta, una cámara de entrada y una cámara de salida, y para el drenaje una cuneta verde. La finalidad de este proyecto es que la cantidad de agua en la cámara de salida sea menor que en la cámara de entrada. A este sistema adicionalmente, se instalaron sensores en ambas

cámaras para hacer seguimiento y corroborar la eficiencia del sistema de los datos que anteriormente se recolectaban de manera manual. (García, 2016)



Imagen 13, Vista aérea del sistema MySUDS del Parque San Cristobal (Sistemas de drenaje urbano sostenible, s. f.)

Existen tres tipos de cunetas verdes

Las cunetas convencionales: Son canales forrados de pasto y se emplean para el transporte del agua de lluvia.

Las cunetas sin agua o secas: Tienen un filtro hecho con un material bastante impregnable que permite la infiltración del agua a través de la parte baja del canal, y se conocen así porque por lo general no contienen líquido.

Las cunetas húmedas: Conservan agua permanentemente y se realizan en terrenos con alto nivel freático o suelos impermeables. (García, 2016).

Techos verdes

Estos son superficies vegetales en la cubierta de los edificios son una técnica de construcción sostenible que consiste en cubrir el techo de un edificio con una capa de vegetación y sustrato. Además de proporcionar un atractivo aspecto natural, los techos verdes tienen muchos beneficios ambientales y económicos, como la disminución del efecto de isla de calor citadina, la absorción de las precipitación y la depuración atmosférica, aunque de la misma forma estos sistemas cuentan con varias limitación puesto que no pueden almacenar mucha agua en edificios no diseñados con este objetivo por el peso que esta produciría, además de que no pueden infiltrarla en el terreno natural pero a su favor , ocupa un espacio que suele desaprovecharse normalmente, además que como anteriormente se dijo sirve para reducir la sensación térmica de las viviendas, el cual es un gran problema hoy en día debido a las altas temperaturas que con cada año que pasan van en aumento, a este sistema se le puede añadir un sistema de drenaje que conduzca el agua a los bajantes del edificio.



Imagen 14, Techos Ecológicos Sustentables (Plantas y Jardín, 2013)

Y de estos existen varios tipos, tales como:

Intensivos: son jardines accesibles que posibilitan el desarrollo de una diversidad de plantas, incluyendo comestibles, arbustos y árboles. Sin embargo, requieren una capa de sustrato de más de 30 cm, lo que eleva significativamente la masa del sistema y los costos de montaje y sostenibilidad. Además, se recomienda instalar este tipo de sistemas en construcciones nuevas debido al cálculo estructural detallado necesario para soportar la masa del sistema, que oscila entre 250 y 400 kg/m². (Zielinski, García Collante & Vega Paternina, 2012)

Semi- intensivos: Intermedios en términos de grosor del sustrato, que oscila entre 12 y 30 cm. Aunque limitan la cantidad de diversidad vegetal que pueden ser cultivadas en comparación con los sistemas intensivos, ofrecen más opciones que los sistemas extensivos. Además, estos sistemas necesitan mantenimiento regular y su masa es de aproximadamente de entre 120 y 250 kg/m². (Zielinski, García Collante & Vega Paternina, 2012)

Extensivos: son considerados de mantenimientos insignificantes y se instalan comúnmente en zonas con difícil acceso. Estos sistemas utilizan especies vegetales que requieren poco riego y tienen un grosor de sustrato de solo 5 a 15 cm, lo que les permite subsistir con agua de lluvia. La flora acostumbra a ser de pequeño tamaño y está compuesta por especies autóctonas o adaptadas a las condiciones ambientales, lo que implica un mantenimiento mínimo. El peso aproximado del sistema es de entre 60 y 140 kg/m², lo que los convierte en óptimos para su utilización en edificios ya construidos, ya que requieren refuerzos mínimos en la estructura para sobrellevar el peso extra. (Zielinski, García Collante, & Vega Paternina, 2012).

Según Garacol, en Bogotá se cuenta con 32.000 metros cuadrados de techos verdes, y un más de 1100 metros cuadrados de jardines verticales, puestos en funcionamiento principalmente en centros comerciales, universidades y edificios comerciales.

En la prisión de Tuluá, la empresa Groncol implementó de igual manera un diseño modular bioclimático, que permite la reducción de temperaturas.



Imagen 15, vista aérea prisión de Tuluá en Colombia (Tropical Commons, 2018)

Filtros de arena

Son estructuras a nivel del terreno, que en su mayoría de casos es una excavación con terraplenes de tierra, de hormigón o un bloque. A estos filtros se les debe dar un tratamiento previo en la sedimentación, para que se de una sedimentación y una cámara con un lecho filtrante.

El sistema de basa en un divisor de flujo, en la que se desvía la escorrentía hacia la cámara de sedimentación que puede ser húmeda o seca; luego, el agua pasa al compartimiento de un lecho con filtro de arena donde se almacena por un tiempo; y finalmente, los tubos perforados situados bajo el lecho de la arena son los encargados de dirigir la escorrentía nuevamente hacia el medio. (Abellán, 2016).

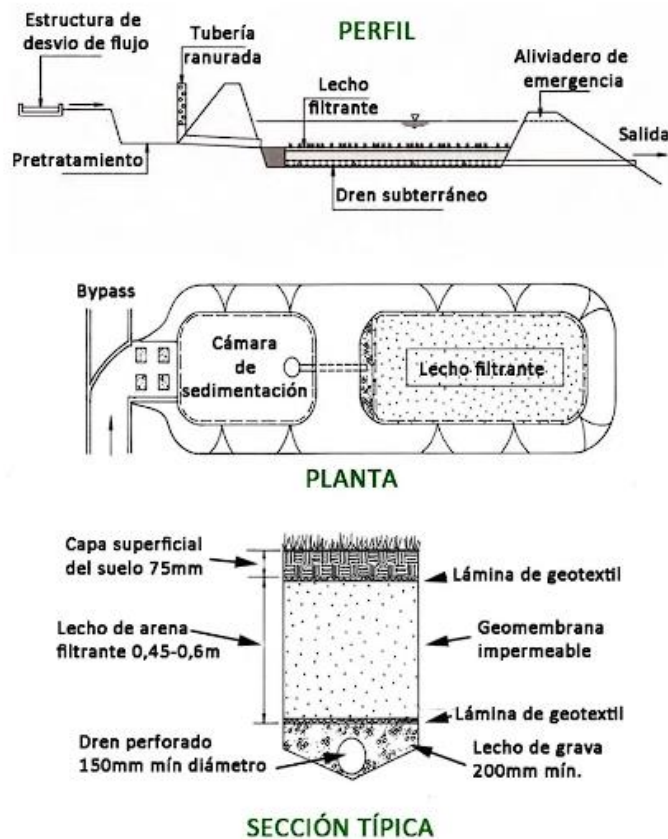


Imagen 16, filtro de arena (Abellán, 2016)

Estos filtros en zonas rurales y marginadas, a su vez Contribuyen a la mejora de la condición del agua., por la facilidad de los diseños, y su fácil operación y mantenimiento; los filtros lentos de agua, reducen la cantidad de virus y bacterias dañinos para la salud. (Avila & Moreno, 2016)

Pavimentos permeables

Este sistema surge como opción para disminuir las escorrentías superficiales y los caudales pico provocados por exceso de escorrentía, en las áreas donde ha habido pérdida total de la permeabilidad. El objeto de este sistema es crear zonas en las que el agua se almacene para amortiguar la cantidad de agua lluvia producto de las precipitaciones.

Es recomendable que estos sistemas se usen en áreas de pendiente baja, con tráfico no tan significativo, en donde la capa freática se halle inferior al fondo de la zona de depósito, de tal manera que no haya interferencia en el proceso de acopio. (Legret et al., 1999; EPA, 1999).

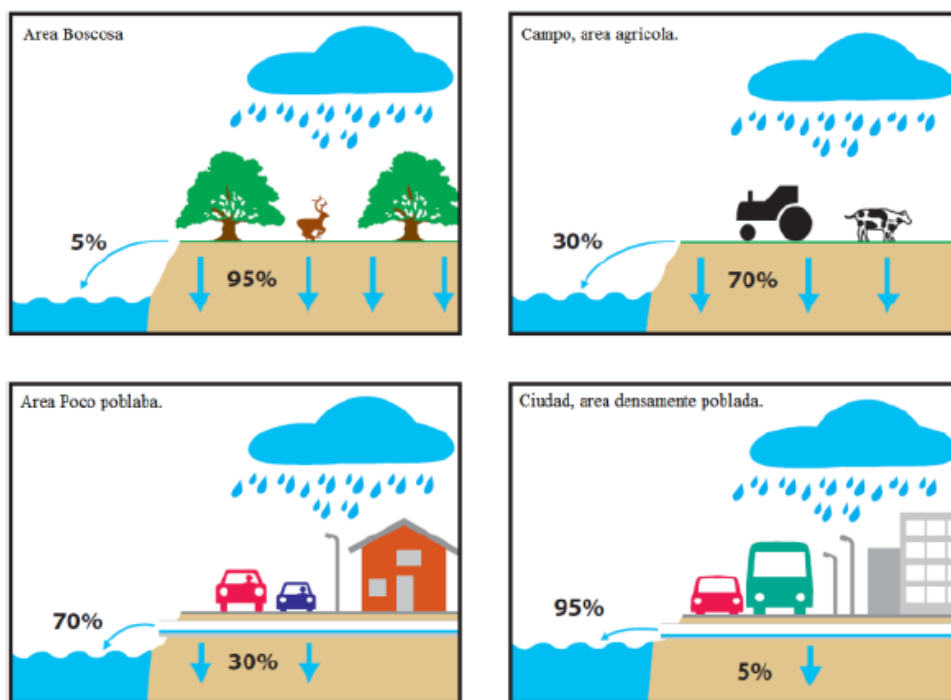


Imagen 17, Impacto de la Urbanización en el Sistema de Drenaje Natural (Interpave, 2008)

Estructuralmente, los pavimentos permeables se basan en tres capas:

- i. Rodadura, facilitando la infiltración del agua. y puede ser en pasto, asfalto, concreto, arcilla o grava.
- ii. Material granular fino, que posibilita la adecuada instalación de la superficie de rodadura
- iii. Material granular de gran tamaño, donde se almacena el agua parcial o de manera completa.

Tipos de pavimentos permeables:

- i. Superficies de asfalto poroso, se compone de una capa de rodadura de mezcla bituminosa de asfalto, que se prepara de tal manera que deje poros para que penetre el agua(Azzout, 1994)
- ii. Superficies de concreto poroso, consta de una mortero compuesto de agregados, cemento y agua. (Ferguson, 2005)
- iii. Superficies de adoquines y módulos, estos permiten que el agua se infiltre en las juntas. (Smith, 2006).

¿Cómo los SUDS disminuyen las inundaciones?

De manera general, todos los sistemas urbanos de drenaje sostenibles, son soluciones innovadoras que permiten el control y la reducción de caudales pico en el almacenamiento de agua, evitando de esta manera el desborde de las redes de alcantarillado y por tanto, disminuyendo los riesgos de inundaciones en las zonas urbanas.

Los SUDS buscan la infiltración del agua en los terrenos verdes lo más natural posible, tratando de abordar los problemas relacionados al crecimiento urbano que le dan menor importancia al drenaje de las aguas pluviales. Todos los sistemas mejoran el drenaje de las áreas

urbanas y contrarrestan las consecuencias negativas en la urbanización por el ciclo natural del agua.

Teniendo en cuenta que los suelos se han vuelto cada vez más impermeable, el ciclo natural del agua ha presentado interrupciones, dejando como consecuencia grandes volúmenes de agua en las áreas comunes de las poblaciones.

Con la finalidad de evaluar el impacto en la reducción en el riesgo de inundación por el aumento de precipitaciones en el área urbana, se analizará el proyecto del Plan Integral para la Segunda Etapa del Sistema de Alcantarillado en el Municipio de Cajicá-Colombia, zona en la cual es continuo el crecimiento urbano. El sistema de drenaje que se estudió son los techos verdes en específico. Con el uso del software EPA SWMM, se realizó el respectivo análisis con el cual se conoció si la cabida del sistema era apta para evitar inundaciones. (Bonilla Triana, 2019)

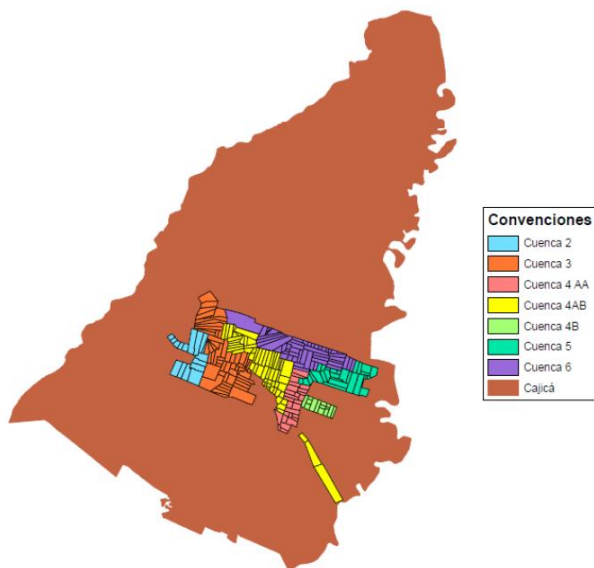


Imagen 18, área de estudio del municipio de Cajicá. (Bonilla Triana, 2019)

En la imagen 19, se ilustra las zonas permeables y no permeables identificadas. Analizando esto, se percibe que la zona con mayor urbanización es la cuenca 4AA, 4B y 5, las cuencas 2 y 3 se ubican en áreas suburbanas y las 4AB y 6 se ubican en zonas rurales y urbanas. (Bonilla Triana, 2019)

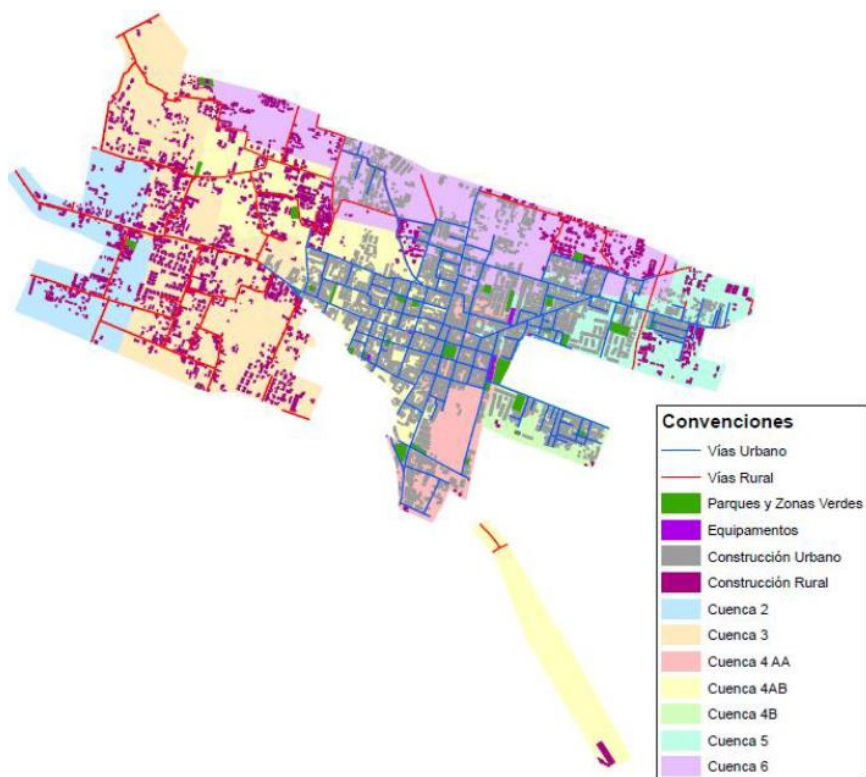


Imagen 19, Configuración de Población en Zonas Urbanas y Rurales en el Área de Análisis (Bonilla Triana, 2019)

En EPA SWMM el modelo se presentó en dos fases: Las definiciones de los eventos de las lluvias y la atribución de particularidades a todas las cuencas.

Se implementó los sistemas de drenaje urbanos basadas en las curvas IDF para los eventos de lluvia para realizar la evaluación a la alteración del riesgo de inundación. Las curvas IDF

seleccionada en el estudio es la que retorna en periodo de 100 años para duraciones de 60 minutos en situaciones con presencia y ausencia del cambio climático. (Bonilla Triana, 2019)

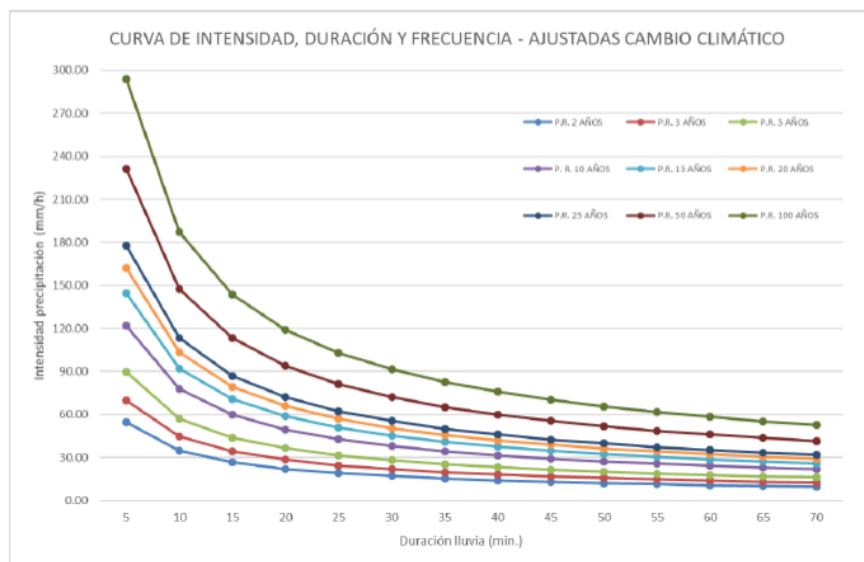


Imagen 20, Curvas IDF (Empresa de Servicios Públicos de Cajicá, 2018)

La red con mayor cantidad de conductos se encuentra en la cuenca más amplia.; y en la cuenca de menor área se halla el menor porcentaje de impermeabilidad, mientras que la que presenta menor porcentaje de impermeabilización. En la caracterización de las curvas se observa La inclinación en el rango del 5.6% al 6.8%, y la capacidad de almacenamiento. con permeabilidad de 3.71mm a 3.81mm y el área sin permeabilidad sin la capacidad de deposito varía entre 62.3% y 73.5%, por lo que se concluye que casi toda la superficie sin permeabilidad corresponde a residencias. (Bonilla Triana, 2019)

La cuenca 2 exhibe una pequeña proporción de impermeabilización y el coeficiente de curvatura más bajo asociado a áreas de praderas.

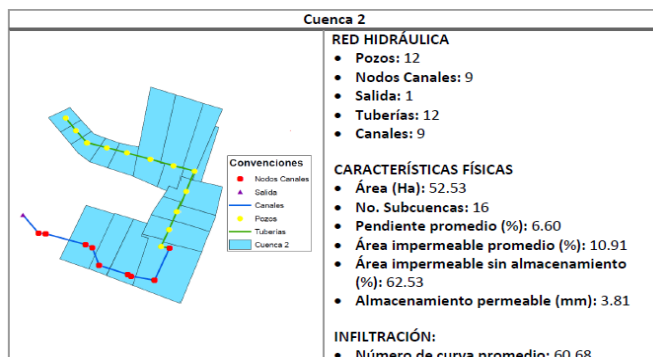


Imagen 21, características cuenca 2 (Bonilla Triana, 2019)

La cuenca 3 cuenta con la cantidad superior de conductos, y es la cuenca de mayor amplitud,

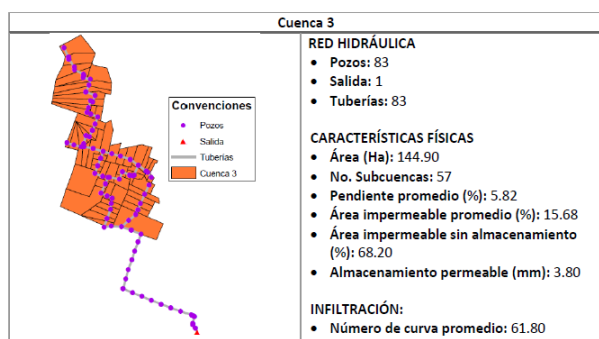


Imagen 22, características cuenca 3 (Bonilla Triana, 2019)

La cuenca 4AA permite encontrar la pendiente máxima de 6.79%

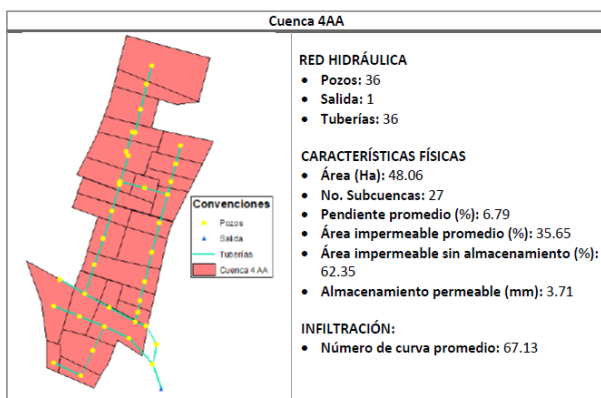


Imagen 23, características cuenca 4AA (Bonilla Triana, 2019)

La cuenca 4AA presenta la mayor extensión con respecto a las demás cuencas.

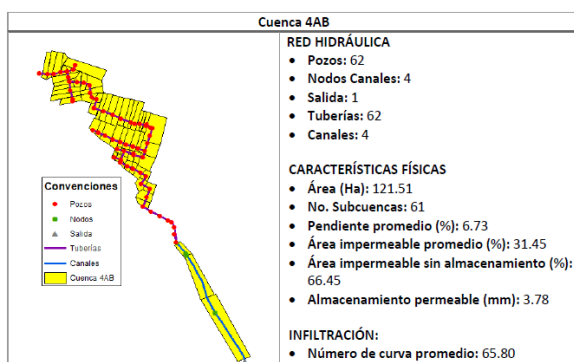


Imagen 24, características cuenca 4AB (Bonilla Triana, 2019)

La cuenca 4B es la que menor área tiene, pero que a su vez tiene mayor porcentaje de impermeabilidad, y un alto índice de área no permeable sin almacenamiento y la curva más elevada.

correspondiente a cobertura residencial.

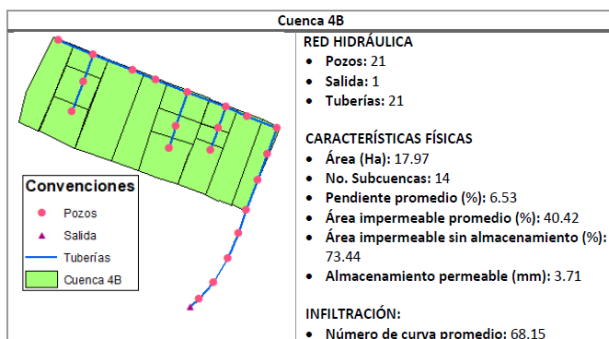


Imagen 25, características 4B (Bonilla Triana, 2019)

La cuenca 5, permite determinar el almacenamiento permeable mínimo correspondiente a 3.77mm.

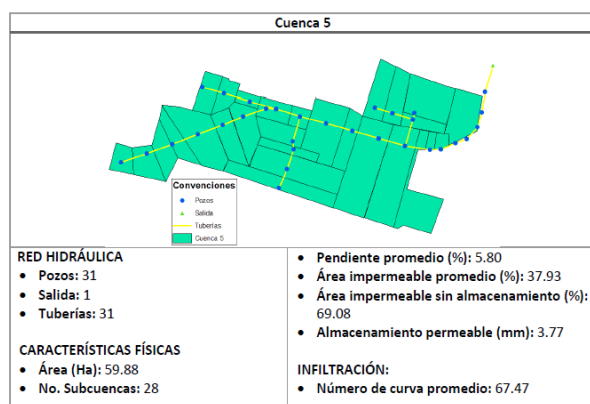


Imagen 26, características cuenca 5 (Bonilla Triana, 2019)

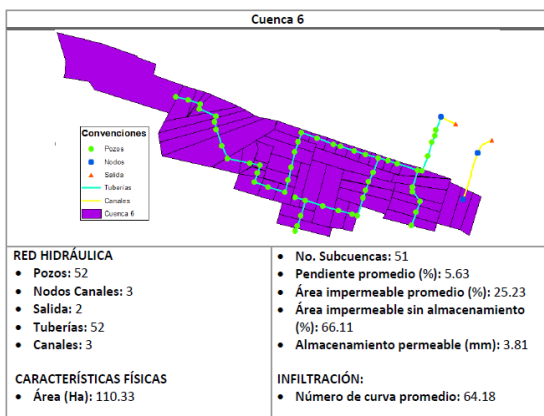


Imagen 27, características cuenca 6 (Bonilla Triana, 2019)

Análisis planteados

Estudio a la sensibilidad para la impermeabilidad.

Se evaluó la influencia en la variación de la impermeabilización de las cuencas a partir del gráfico de curva en relación al porcentaje de superficie sin permeabilización, a partir de la profundidad de cabida de agua, y el porcentaje sin almacenamiento del área sin permeabilidad. (Bonilla Triana, 2019)

Estudio número de curva

Se alteró el área sin permeabilidad entre el 50% y 100%, con rangos de 10% para los pavimentos, área comercial y empresarial, área industrial y zona habitacional.

En la imagen 28, se plantean Los valores de la curva en función del porcentaje de área. para todos los escenarios planteados, donde se ponderó el promedio entre las zonas permeables e impermeables. (Bonilla Triana, 2019)

%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

Imagen 28, análisis número de curva (Bonilla Triana, 2019)

Profundidad de retención en la zona no permeable.

Se realizaron variaciones en los rangos característicos con aumentos de 5 milímetros para conocer el dominio significativo en el volumen de flujo en la descarga de las cuencas. (Bonilla Triana, 2019)

Proporción de área no permeable sin capacidad de retención.

Se concluyó que las variables debían oscilar entre el 70% y el 100% con aumentos de 10% por lo que la fracción sin retención, en el área no permeable en los cuerpos de agua, se halla entre 62.3 y 73.5. (Bonilla Triana, 2019)

Análisis de sensibilidad propiedades SUDS

Los sistemas a evaluar son los techos verdes en su escenario actual, con los usos del suelo y construcciones actuales y se estableció que las cubiertas vegetales-ecológicas se pueden usar en todas las construcciones rurales y en la mitad de las urbanas.

El modelo se realiza a partir de la superficie, el suelo y el drenaje, y se proyectaron tres tipos (TV1, TV2, y TV3) según las características y los tipos de suelo. (Bonilla Triana, 2019)

Estrato	Propiedad	TV1	TV 2	TV 3
Superficie	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
Suelo	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
Drenaje	Espesor (mm)	25.4	38.1	50.8
	Fracción de vacíos	0.5	0.5	0.6
	Rugosidad	0.1	0.1	0.4

Imagen 29, propiedades modeladas de los techos verdes (Bonilla Triana, 2019)

Análisis de riesgo de inundación

La evaluación del peligro de desbordamiento, se llevará a cabo mediante la agregación de los de los volúmenes de agua en caso de inundación calculados utilizando la alternativa "Node Flooding" de EPA SWMM. La primera etapa del análisis consistirá en la evaluación de la situación actual, incorporando las tres variantes de techos verdes. En la segunda etapa, se investigará si la implementación de Medidas de Uso Sostenible de Drenaje (SUDS, por sus siglas en inglés) posee una influencia significativa, especialmente en caso de que el proceso de urbanización en Cajicá continúe en aumento. Además, se ha optado por emplear el tipo de techo verde más efectivo (TV 3), seleccionado en base a su capacidad para reducir tanto el peligro de desbordamiento como la descarga de agua. (Bonilla Triana, 2019)

Resultados y análisis

Las conclusiones se sacaron a partir de los resultados obtenidos en las condiciones actuales para los parámetros de sensibilidad que prevén el nivel de impermeabilidad de la cuenca y sus características. (Bonilla Triana, 2019)

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

Imagen 30, resultados en condiciones actuales (Bonilla Triana, 2019)

Análisis de sensibilidad parámetros de impermeabilidad

evaluación del coeficiente de curva

Se ha determinado que las modificaciones en los valores de la curva no ejercen una influencia significativa en la salida correspondiente al caudal pico.. En los hidrogramas obtenidos, se logra apreciar los porcentajes de área impermeable con igual comportamiento para todos los escenarios.

Con respecto en el caso de la cuenca 2, el coeficiente de curva influyó de manera notable en el tiempo y volumen de descarga.

Para la cuenca 3, el coeficiente de curva muestra un bajo grado de reacción para el aumento del caudal máximo de efluente, y promedio elevado para la escorrentía.

El hidrograma presenta variaciones rápidas al inicio, y luego se vuelve invariable a lo largo de la presurización de la tubería, que al sobrepasar su habilidad posibilita la salida del agua, y al final del hidrograma la curva disminuye en cierto tiempo.

%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

Imagen 31, análisis de curva cuenca 3 (Bonilla Triana, 2019)

En la cuenca 4AA, el número de curva se establece con sensibilidad baja para disminución del caudal máximo y sensibilidad moderada a baja en relación al aumento de escorrentía.

%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

Imagen 32, análisis número de curva cuenca 4AA (Bonilla Triana, 2019)

En la cuenca 4AB, el impacto del coeficiente de curva es ligeramente más notable en el incremento de escorrentía que en el caudal máximo de salida.

%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	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

Imagen 33, análisis número de curva cuenca 4AB (Bonilla Triana, 2019)

Tanto la cuenca 4B como la cuenca 5 exhiben una sensibilidad similar al coeficiente de curva. En lo que respecta al caudal máximo, este no ejerce influencia alguna, mientras que en el coeficiente de escorrentía se observa una sensibilidad baja.

%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

Imagen 34, análisis de curva cuenca 4B, (Bonilla Triana, 2019)

%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

Imagen 35, análisis de número de curva de la cuenca 5 (Bonilla Triana, 2019)

Finalmente, en lo que respecta a la cuenca 6, se ha verificado que el coeficiente de curva tiene un efecto limitado en el incremento del caudal máximo, aunque exhibe una sensibilidad moderada en lo que respecta al coeficiente de escorrentía.

%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

Imagen 36, análisis de curva cuenca 6 (Bonilla Triana, 2019)

Análisis de la Profundidad de Almacenamiento en Áreas Impermeables

Basado en los resultados obtenidos, En resumen, se puede deducir que la profundidad de almacenamiento en áreas impermeables no ejerce una influencia relevante en el comportamiento

hidrológico de la cuenca. Esto se sustenta en la observación de una sensibilidad baja, próxima a cero, en todos los escenarios evaluados.

Esta conclusión también se refleja en los hidrogramas incluidos en los apéndices, los cuales... muestran similitudes notables con pequeñas diferencias en el volumen descargado a lo largo del tiempo antes de alcanzar el caudal pico.

Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de las diferencias poco notorias, se pudo Es posible notar que esta variable puede generar tanto un aumento como una disminución en el caudal máximo y el coeficiente de escorrentía. Sin embargo, no se pudo identificar una relación coherente entre las diversas condiciones de impermeabilidad. Por ejemplo, se tenía la expectativa de que en profundidades de almacenamiento menores a 2 mm, tanto el caudal como el coeficiente mostrarían un aumento en todos los casos; en una profundidad de 2 mm, los resultados se acercaría a cero debido al almacenamiento actual de 1.91 mm; y en una profundidad de 2.5 mm, se presentarían reducciones en ambas variables de estudio.

No obstante, se identificaron variaciones en los resultados en distintas cuencas. En la cuenca 3, se registró una reducción del caudal en todas las profundidades analizadas; en la cuenca 6, se evidenció una disminución en el coeficiente de escorrentía en todos los casos; en la cuenca 4AB, se produjo un aumento en la escorrentía en todos los escenarios; en las cuencas 4B y 5B, no se apreció ningún efecto en el caudal máximo de salida; y en las demás cuencas, se observaron simultáneamente disminuciones e incrementos en las variables bajo análisis.

Estos resultados resaltan la complejidad de las interacciones hidrológicas y la falta de una relación consistente entre la profundidad de almacenamiento en áreas impermeables y el comportamiento de las variables hidrológicas en diferentes cuencas. Por lo tanto, se requiere un

análisis más detallado y un enfoque específico para cada caso con el fin de entender plenamente los efectos de esta variable en el sistema hidrológico. (Bonilla Triana, 2019)

Almacenamiento (mm)	Cuenca 2		Cuenca 3		Cuenca 4AA		Cuenca 4AB	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	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

Imagen 37, Exploración de los Efectos de la Profundidad de Almacenamiento en Áreas No Permeables en Cuencas 2, 2, 4AA y 4AB (Bonilla Triana, 2019)

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

Imagen 38, Examen de la Profundidad de Almacenamiento en Áreas Impermeables en las Cuencas 4B, 5 y 6 (Bonilla Triana, 2019)

3.1.3. Estudio del Impacto del Porcentaje de Área Impermeable sin Almacenamiento

La variación en el porcentaje de superficie no permeable sin capacidad de almacenamiento tiene un impacto insignificante en los resultados del modelo, reflejando una sensibilidad baja que

se acerca a cero. Además, los hidrogramas adjuntos ilustran que cualquier cambio en el hidrograma de salida es mínimo y se manifiesta en el período inicial antes de alcanzar el caudal máximo.

De manera similar al análisis de la profundidad de almacenamiento en el área impermeable, los resultados no siguen una tendencia consistente con el aumento de la impermeabilidad. Contrariamente a lo esperado, na mayor falta de permeabilidad se refleja en la producción de escorrentía y, en consecuencia, en un aumento del caudal de salida. Estos hallazgos subrayan la complejidad de las interacciones hidrológicas y la necesidad de analizar cuidadosamente los efectos de los cambios en la impermeabilidad en diferentes contextos hidrológicos. (Bonilla Triana, 2019)

Almacenamiento (%)	Cuenca 2		Cuenca 3		Cuenca 4AA		Cuenca 4AB	
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	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

Imagen 39, Examen del Impacto del Porcentaje de Área Impermeable sin Capacidad de Almacenamiento en las Cuencas 2, 3, 4AA y 4AB. (Bonilla Triana, 2019)

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

Imagen 40, Exploración de las Implicaciones del Porcentaje de Área Impermeable sin Almacenamiento en las Cuencas 4B, 5 y 6. (Bonilla Triana, 2019)

4.2. Evaluación de Sensibilidad de las Características de Medidas de Uso Sostenible de Drenaje (SUDS).

El objetivo de este análisis es identificar el tipo de techo verde más adecuado en términos de reducción de escorrentía e inundaciones, para su implementación en los escenarios de aumento de impermeabilidad propuestos debido al crecimiento urbano en Cajicá. El techo denominado TV 3, junto con los techos azules, cumple con este criterio en todas las cuencas, excepto en la cuenca 2. En estas situaciones, se observa una disminución en el volumen de inundación y un descenso en el coeficiente de escorrentía. Esta tendencia se refleja en los hidrogramas de salida presentados en los anexos, donde se observa una reducción en el volumen descargado, a excepción de la cuenca 2.

Sin embargo, en cuanto al aumento del caudal máximo de salida, la producción de escurrimiento y la cantidad de agua acumulada en inundaciones, en el caso de la cuenca 2, estos resultados no concuerdan con los beneficios de los sistemas de drenaje sostenible en entornos urbanos. Esta discrepancia se debe a que el modelo implementado en el software EPA SWMM no consideró el porcentaje de área impermeable que sería tratado por los techos verdes o azules, tal como lo establece el manual del programa (Rosman, 2015). Estos sistemas gestionan solo la lluvia y no la escorrentía, a diferencia de las celdas de biorretención. Esto significa que en cuencas con baja impermeabilidad, como la cuenca 2 o la cuenca 3 (con porcentajes de 10,91% y 15,68%, respectivamente), los techos verdes y azules podrían abarcar áreas permeables, alterando así la respuesta hidrológica natural de la cuenca. (Bonilla Triana, 2019)

Cuenca	TV 1 + TA			TV 2 + TA			TV 3 + TA		
	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 ⁶)L	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 ⁶)L	Caudal pico (LPS)	Coef. Escorrentía	Volumen de inundación (10 ⁶)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

Imagen 41, análisis de sensibilidad propiedades SUDS cuenca 2, 3, 4AA, 4AB, 5 y 6 (Bonilla Triana, 2019)

4.3. Evaluación de la Vulnerabilidad ante Inundaciones

El estudio de amenaza por desbordamiento implica la evaluación de los volúmenes derivados de las características de las Medidas de Uso Sostenible de Drenaje (SUDS) y los escenarios de mayor impermeabilidad planteados en Cajicá. En referencia al primer análisis, se ha detectado, como se ilustra en la imagen 42, un aumento en el volumen de inundación en la cuenca 2. Esto se atribuye tanto a la manera en que se modelan los techos verdes como a la baja capacidad de permeabilidad de la cuenca.

En relación a la disminución de los volúmenes de inundación en las distintas cuencas, se ha obtenido un rango que varía desde un 11% hasta más del 100%. Estas reducciones son particularmente notables en las cuencas 3, 5 y 6, que representan las áreas más urbanizadas del municipio. No obstante, en el caso de las demás cuencas, también se ha registrado una disminución en el volumen de inundación. Esta reducción es menos pronunciada para el tipo de techo TV 2 y más significativa para el techo TV 3.

En particular, se destacan las disminuciones más notables en la cuenca 3 y la cuenca 5, donde los volúmenes de inundación se han reducido en más de 6000 m³. Estos resultados apuntan a la efectividad de las medidas implementadas, especialmente en las zonas más urbanizadas, en la disminución del peligro de inundación y en la administración de los volúmenes de agua durante eventos de lluvias intensas. (Bonilla Triana, 2019)

Cuenca	TV 1 + TA	TV 2 + TA	TV 3 + TA
	Volumen de inundación (10 ⁶)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

Imagen 42, resultados volumen de inundación sensibilidad propiedades SUDS (Bonilla Triana, 2019)

Adicionalmente, con el fin de examinar la reducción del riesgo de inundación en los contextos propuestos (áreas comerciales y de negocios, zonas industriales y zonas residenciales) con un nivel de impermeabilidad del 90%, se procedió a calcular los volúmenes de inundación en estas condiciones. (Bonilla Triana, 2019)

Cuenca	Volumen de inundación (10 ⁶)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

Imagen 43, resultados volumen de inundación escenarios proyectados (Bonilla Triana, 2019)

En los resultados se identificaron las cantidades disminuidas para cada SUD en los distintos escenarios. En este contexto, la evaluación se destaca que los techos verdes lograron una reducción de aproximadamente el 80% en comparación con el volumen original de inundación. (Bonilla Triana, 2019)

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 ⁶)L	Volumen de inundación (10 ⁶)L	Volumen de inundación (10 ⁶)L	Volumen de inundación (10 ⁶)L	Volumen de inundación (10 ⁶)L	Volumen de inundación (10 ⁶)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

Imagen 44 Evaluación del Riesgo de Inundación en Escenarios Proyectados (Bonilla Triana, 2019)

Referencias bibliográficas

- [1] Commission, E. (2022). EU website. Obtenido de https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/nature-based-solutions_en
- [2] ¿Que son la Inundaciones? (2020). Floodup.
- [3] Seguridad ante las Inundaciones Repentinas. (s. f.). Texas Department of Insurance, Division of Workers', HS99-501E (05-21).
<https://www.tdi.texas.gov/pubs/videoresources/spt5flood.pdf>
- [3] Steffens. (2022). ¿Qué es la inundación costera? Antología. <https://antologiaglobal.com/la-inundacion-costera/>
- [4] Del, R. R. L. (2021). Vulnerabilidad costera ante los procesos de erosión e inundación en el marco del cambio climático en la Bahía de Cádiz y Bahía de Algeciras. Dialnet.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=289846>
- [5] Rico, M. d. (2019). Tipos de Inundación. EcoExploratorio.
- [6] Marinez, J. (2019). Efecto de las inundaciones. El Diario.
- [7] Córdoba, J. D. (2016). DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE COMO ESTRATEGIA PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DE VIDA HUMANA Y PREVENCION DE INUNDACIONES. Bogotá. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/5102>
- [8] García, C. C. (2016). Modelación hidrológica de cunetas verdes Caso de estudio: Parque San Cristóbal, Bogotá - Colombia. Bogotá. Obtenido de

[https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15192/u753912.pdf?sequence=](https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15192/u753912.pdf?sequence=1)

1

- [9] Zielinski, S., García Collante, M. A., & Vega Paternina, J. C. (2012). Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta? Medellín: Revista Gestión y Ambiente. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169424101008.pdf>
- [10] ¿QUÉ SON LAS INUNDACIONES? (2014). Floodup. <http://www.floodup.ub.edu/inundaciones/>
- [11] Alertas tempranas de inundaciones costeras. (2020, 10 junio). Organización Meteorológica Mundial. <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/alertas-tempranas-de-inundaciones-costeras>
- [12] Sandoval, L. D. (2022, 25 julio). “Por favor, vean cómo estamos sufriendo”: Chocoanos frente a las inundaciones. ELESPECTADOR.COM. <https://www.elespectador.com/colombia/por-favor-vean-como-estamos-sufriendo-chocoanos/>
- [13] Admin. (2018, 21 noviembre). Las inundaciones dañan las producciones hortícolas del campo de Cartagena. ValenciaFruits. <https://valenciafruits.com/inundaciones-danan-producciones-hortícolas-campo-de-cartagena/>
- [14] Sistemas de drenaje urbano sostenible. (s. f.). <https://misovirtual.virtual.uniandes.edu.co/codelabs/iot-piloto-mysuds/index.html?index=..%2F..internet-de-las-cosas#0>

- [15] Seguros SURA. (2021, 6 septiembre). ¿Cómo protegernos de las inundaciones fluviales? - Seguros SURA. https://segurossura.com/blog/salud_planetaria/como-protegernos-de-las-inundaciones-fluviales/
- [16] Riesgo por inundación - IDIGER. (s. f.). <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- [17] editorweb. (2019, 13 marzo). Tipos de cunetas, el drenaje en las carreteras - cemento INKA. Cemento INKA. <https://www.cementosinka.com.pe/blog/tipos-de-cunetas-el-drenaje-en-las-carreteras/>
- [18] P&J, & P&J. (2021). Techos verdes, cubiertas vegetales-ecológicas y sustentables. Plantas & Jardín. <https://plantasyjardin.com/2013/10/techos-verdes-cubiertas-vegetales-ecologicas-y-sustentables/>
- [19] Centre for Research on the epidemiology of disasters. (2022). Obtenido de CRED: <https://www.cred.be/publications>
- [20] Muños Rodríguez, J. P., & Acuña Ostios, Z. E. (2015). SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE “SUDS” COMO ALTERNATIVA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE INUNDACIONES EN NECHÍ UN MUNICIPIO DE LA MOJANA. BOGOTÁ. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/aba72c52-d4af-4979-aca6-032672d332c1/content>
- [21] IPCC. (2007). Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge - UK: Cambridge University Press.

- [22] López Feldman, A. J., & Hernández Cortés, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459. <https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- [23] Galindo, L., Samaniego, J., Alatorre, J., Carbonell, J., Reyes, O., & Sánchez, L. (2015). *Estudios del Cambio Climático en América Latina*.
- [23] IPCC, Planton, S. (ed., Stocker, T. F., D. Qin, G.-K., Plattner, M., Tignor, S. K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V., Bex y P.M., & Midgley (eds.). (2013).
- [24] CMNU. (1992). “Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático.” <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- [25] Europa Press. (2022, 6 noviembre). Radiografía de los efectos del cambio climático en los últimos ocho años - NIUS. Nius Diario. https://www.niusdiario.es/sociedad/medio-ambiente/20221106/radiografia-efectos-cambio-climatico-ultimos-ochos-anos-mas-calurosos-historia_18_07903986.html
- [26] Benavides, O., & León, G. (2007). INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO.
- [27] Observatory, J. S. N. E. (2017, 9 noviembre). La intensificación de las precipitaciones provocará un aumento de la contaminación del agua en el futuro. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/07/la-intensificacion-de-las-precipitaciones-provocara-un-aumento-de-la-contaminacion-del-agua-en-el-futuro#:~:text=Un%20aumento%20de%20las%20precipitaciones,el%20transcurso%20de%20un%20siglo.>

- [28] J. L. Useros, “El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales”, *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, vol. 50, pp. 71-98, 2012
- [29] Sinc, A. (2022, 13 abril). Una investigación indica que el cambio climático influyó en la lluvia de los huracanes en 2020. *iAgua*. <https://www.iagua.es/noticias/agencia-sinc/investigacion-indica-que-cambio-climatico-influyo-lluvia-huracanes-2020>
- [30] Ambiental, A. P. (2019). El cambio climático causa el 90% de los desastres naturales. *Ambientum Portal Lider Medioambiente*.
<https://www.ambientum.com/ambientum/cambio-climatico/cambio-climatico-causa-el-90-de-los-desastres-naturales.asp>
- [31] Oswald Spring, Ú. (2011). Reconceptualizar la seguridad ante los riesgos del cambio climático y la vulnerabilidad social. In S. Luctello & D. Rodríguez Velázquez (Eds.), *Las dimensiones sociales del cambio climático: Un panorama desde México. ¿Cambio social o crisis ambiental?* (pp. 23-47). México: Instituto Mora, Universidad Nacional Autónoma de México
- [32] Fritz, C.E (1961). Disasters. In Merton, R.K and Nisbet, R.A (Eds.). *Contemporary social problems*. New York: Harcourt.
- [33] H. C. Shah (2001), “Catastrophes and macro-economic risk factors: an empirical study”, document presentado en la conferencia “Integrated Disasters Risk Management: Reducing Socio-Economic Vulnerability”, Luxemburgo, 1 a 4 de agosto, International Institute for Applied Systems Analysis
- [34] Raphael B (Eds.), *Textbook of disaster psychiatry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

- [35] Jiménez, R., Capa, A. y Lozano, A. (2004). Meteorología y Climatología. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. España: Villena Artes Gráficas.
- [36] Butler, D., & Davies, J. (2011). Urban Drainage (3rd ed.). London: Spon Press
- [37] TOMi.Digital - Fenómenos naturales. (s. f.). TOMi.digital.
https://tomi.digital/en/304198/fenomenos-naturales?utm_source=google&utm_medium=seo
- [38] Sistemas de drenaje urbano sostenible. (s. f.).
<https://misovirtual.virtual.uniandes.edu.co/codelabs/iot-piloto-mysuds/index.html?index=..%2F..internet-de-las-cosas#0>
- [39] García, C. C. (2016). Modelación hidrológica de cunetas verdes Caso de estudio: Parque San Cristóbal, Bogotá - Colombia. [Proyecto de Grado en Ingeniería Civil]. Universidad de los Andes.
- [40] Admin. (2018b). Jardines verticales y techos verdes de Colombia. Tropical Commons.
<https://tropicalcommons.co/es/2018/09/04/jardines-verticales-y-techos-verdes-de-colombia/>
- [41] Abellán, A. (2016, 1 septiembre). Tipos de filtros de arena. SuD Sostenible.
<http://sudsostenible.com/tipos-de-filtros-de-arena/>
- [42] Avila, I. R., & Moreno, M. A. (2016). DISEÑO, PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE UN FILTRO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE USO DOMÉSTICO EN TANQUES DE RESERVA EN LA POBLACIÓN DEL CASCO URBANO DE LA

INSPECCIÓN DE SAN ANTONIO DE ANAPOIMA [Anteproyecto de grado].

Universidad Libre.

- [45] Legret, M., Nicollet, M., Miloda, P., Colandini, V., and Raimbault, G. (1999). Simulation of Heavy Metal Pollution from Stormwater Infiltration Through a Porous Pavement with Reservoir Structure, En: Water Science Technology.
- [46] Interpave. (2008). Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements. Interpave The Precast Concrete Paving & Kerb Association, 60 Charles Street, Leicester.
- [47] Brattebo, B. y Booth, D. (2003). Long-term storm water quantity and quality performance of permeable pavement systems.
- [48] Ferguson, B. K. (2005). Porous pavements. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [49] Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F.N., Alfakih, E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, re´alisation et entretien.
- [50] Smith, D. (2006). Permeable Interlocking Concrete Pavements: Selection, Design, Construction, Maintenance. Tercera edición. Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI). Canada.
- [51] Bonilla Triana, L. F. (2019). EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN URBANA [Proyecto de grado]. Universidad de los Andes.