

Aplicación De SUDS Para El Control Del Riesgo De Inundaciones En Vías Urbanas

Application Of SUDS To Control Flood Risk On Urban Roads

Autores

Génesis Mayte Saraguro Gallardo¹, Carlos Eugenio Sánchez Mendieta², César Augusto Solano de la Sala³

¹Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, gsaraguro2@utmachala.edu.ec

²Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, csanchez@utmachala.edu.ec

³Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, csolano@utmachala.edu.ec

RESUMEN

La investigación se enfoca en el control del riesgo de inundaciones en vías urbanas de la ciudad de Pasaje ubicada en Ecuador, teniendo en consideración que la capacidad del sistema de drenaje es limitada, a causa del aumento del caudal máximo y la escorrentía superficial en temporada de lluvia. Por ello existe la necesidad de proponer medidas sostenibles que permitan minimizar el impacto de las inundaciones urbanas, en este contexto, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se presentan como una excelente opción para la gestión de aguas pluviales en vías urbanas. Para el diseño del jardín de lluvia, se planteó una metodología basada en cuatro procesos: análisis de la condición existente del área de estudio, análisis de la red de drenaje de la cuenca urbana, propuesta de SUDS y, conexiones a red y mantenimiento. Los resultados obtenidos demuestran que, para la captación de un metro cúbico de escorrentía, se requiere el empleo de cuatro jardines de lluvia para un área de 9.34 ha, los cuales deben contar con una superficie de 4.40 m², además, al aumentar la cantidad de estas unidades se logrará evacuar un volumen mayor de escorrentía.

Palabras claves: aguas pluviales, inundación, Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, vías urbanas

ABSTRACT

The research focuses on flood risk control in urban roads in the city of Pasaje, located in Ecuador, taking into consideration the limited capacity of the drainage system due to increased peak flow and surface runoff during the rainy season. Therefore, there is a need to propose sustainable measures to minimize the impact of urban flooding. In this context, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) emerge as an excellent option for managing stormwater in urban roads. For the design of the rain garden, a methodology based on four processes was proposed: analysis of the existing condition of the study area, analysis of the urban watershed drainage network, SUDS proposal, and network connections and maintenance. The results obtained demonstrate that, to capture one cubic meter of runoff, the use of four rain gardens is required for an area of 9.34 hectares, each of which must have a surface area of 4.40 square meters. Furthermore, increasing the number of these units will allow for the evacuation of a greater volume of runoff.

Keywords: rainwater, flooding, Sustainable Urban Drainage Systems, urban roads

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han empleado diferentes terminologías para la gestión de aguas pluviales con un enfoque sostenible, las cuales se han desarrollado de manera empírica de acuerdo a la perspectiva y el contexto local de cada país. En Reino Unido se propuso el empleo de los “Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)”; en Estados Unidos se planteó el uso de técnicas como “Mejores prácticas de gestión (BMP)”, “Desarrollo de Bajo Impacto (LID)” e “Infraestructura Verde (GI)”; por su parte Australia desarrolló el “Diseño urbano sensible al agua (WSUD)” y, por último, China aparece con el concepto de “Construcción de la ciudad esponja (SCC)”, también conocida como ciudad elástica al agua [1] [2]. El propósito de todas estas técnicas es asegurar la gestión sostenible de las aguas superficiales y subterráneas, con el fin de garantizar la seguridad del sistema de drenaje en áreas urbanas y prevenir inundaciones [3].

En Ecuador, como resultado de las estaciones invernales y la influencia del fenómeno del Niño, se presentan inundaciones y el colapso de sistemas de drenaje en áreas urbanas vulnerables, tal como sucede en el cantón Pasaje, que, conforme a su Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, esta localidad presenta una susceptibilidad física a las inundaciones provocadas por las intensas precipitaciones durante temporada de lluvia. Estas inundaciones son exacerbadas por factores como el cambio climático y la rápida urbanización, que alteran la respuesta hidrológica de la zona [4] [5], esto engloba la pérdida de ecosistemas y tierras, aumentando las superficies impermeables y reduciendo la capacidad de infiltración del suelo. Adicionalmente, el aumento de precipitaciones intensas puede incrementar el caudal máximo y la escorrentía superficial, afectando la calidad de las aguas superficiales [6]. Esto coincide con el estudio realizado por Shun Chan et al., en donde se concluyó que los sistemas de drenaje urbano no fueron diseñados para manejar el aumento de la escorrentía superficial, originado por la reducción de infiltración en el entorno urbano [7].

Por lo tanto, una alternativa de solución para esta problemática son los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que recolectan, infiltran, retardan, almacenan y tratan la escorrentía en el sitio para controlar el riesgo de inundación y mejorar la calidad de las aguas superficiales [8]. Los SUDS son una red integrada de áreas con vegetación y espacios abiertos, diseñados para preservar los principios y funciones de los ecosistemas naturales para la gestión de aguas pluviales [9]; además, aportan beneficios más amplios como mejorar el paisaje urbano y la biodiversidad generando impactos positivos en aspectos sociales y ambientales [10]. Las técnicas SUDS pueden ser aplicadas tanto en espacios públicos como privados, algunas de estas técnicas corresponden a: pavimentos permeables, jardines de lluvia, cubierta verde, zanjas o pozos de infiltración, barril de lluvia, cunetas vegetadas y drenes filtrantes [11] [12].

Con la revisión de artículos científicos, se ha observado que varios autores han empleado diferentes enfoques metodológicos en sus investigaciones, entre los cuales se encuentra el estudio realizado por Cubides & Santos denominado “Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración”, en la cual describe el uso de SUDS para controlar la escorrentía urbana y utiliza el software EPA SWMM 5.1 para analizar el uso de nuevas alternativas de drenaje complementadas con SUDS, en la localidad de Fontibón, Colombia [13]. Asimismo, Kian et al. en su investigación denominada “Un análisis de la rehabilitación del drenaje pluvial para sistemas integrados BIOECODS utilizando EPA-SWMM”, diseña un BIOECODS integrado en EPA-SWMM para la rehabilitación de escorrentías de aguas pluviales en un área urbana, en Malasia [14]. Además, Sarminingsih et al en su estudio “Revisión y diseño del sistema de drenaje de la carretera Kedungmundu, ciudad de Semarang, con la implementación del Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)” propone la implementación de barriles de lluvia para controlar el escurrimiento urbano y reducir la descarga de agua de lluvia en el área de la carretera Kedungmundu [15].

Además, Seyedashraf et al., en su investigación “Optimización de muchos objetivos del drenaje sostenible Sistemas en zonas urbanas con diferentes pendientes superficiales” destaca que la pendiente de una cuenca urbana influye en el diseño óptimo, por lo que sugiere que no debe haber una política única para áreas con diferentes pendientes, en Reino Unido [16]. Finalmente, Gonzalez et al. en su estudio denominado “Metodología para el diseño de sistemas urbanos de drenajes sostenibles que minimicen el riesgo de inundaciones en vías urbanas” propone una metodología de diseño para los SUDS que pretende abordar las inundaciones urbanas y analizar los problemas de drenaje en la ciudad de Machala, Ecuador [17]. Por lo tanto, a continuación, la Tabla 1 presenta un análisis comparativo de estos trabajos revisados:

Tabla 1: Análisis comparativo de metodologías para el diseño de SUDS

Autores	Conocimiento	Métodos	Aplicaciones prácticas	Conclusiones	Referencias bibliográficas
E. D. Cubides y G. E. Santos	Describe el uso de SUDS para controlar la escorrentía urbana y utiliza el Software EPA SWMM 5.1 para analizar el uso de nuevas alternativas de drenaje complementadas con SUDS	Modelado hidráulico e hidrológico en Software EPA SWMM para análisis de precipitaciones y comportamiento hidráulico	Implementación de pozos de infiltración como alternativa de drenaje.	Los SUDS pueden ser utilizados para controlar la escorrentía superficial en áreas urbanas, lo que incluye las carreteras, y reducir el riesgo de inundación	[13]
N. Z. Kian, H. Takaijudin and M. Osman	El artículo diseña un BIOECODS integrado en SWMM para la rehabilitación de escorrentías de aguas pluviales en un área urbana.	Modelado de simulación de lluvia-escorrentía en Software EPA SWMM para analizar la gestión de aguas pluviales en áreas urbanas.	Gestión efectiva de la cantidad y calidad del agua de lluvia, y reducción en la descarga de agua de lluvia de áreas impermeables a través de la infiltración.	La aplicación de BIOECODS permitió analizar el sistema de biorretención integrado, y se demostró que no habría más inundaciones repentinas.	[14]
A. Sarminingsih, D. S. Handayani, A. Astriani	El trabajo propone la implementación de barriles de lluvia para controlar el escurrimiento urbano y reducir la descarga de agua de lluvia de una vía.	Análisis hidrológico y uso de barriles de lluvia como tipo de SUDS.	Implementación de barriles de lluvia. Reducción del vertido de aguas pluviales al canal de drenaje.	La aplicación de SUDS se presenta como una solución para lidiar con las inundaciones y el manejo del agua de lluvia de las calles.	[15]
O. Seyedashraf, A. Bottacin-Busolin y J. J. Harou	El estudio destaca que la pendiente de una cuenca urbana influye en el diseño óptimo, por lo que sugiere que no debe haber una política única para áreas con diferentes pendientes.	Modelación en el software EPA SWMM, que permite simular flujos en canales abiertos, así como flujo presurizado en tuberías de drenaje.	Diseños de drenaje que logran un equilibrio en función de las condiciones específicas de pendiente y superficie de la cuenca urbana.	Identifica la combinación óptima de diferentes componentes de drenaje sostenible.	[16]
J. G. Gonzalez Aguilar, C. E. Sánchez Mendieta, Y. P. Medina Sánchez, F. L. Campuzano Vera	La investigación trata sobre inundaciones urbanas en la ciudad de Machala, analizando los problemas de drenaje.	Modelado hidráulico e hidrológico empleando el Software EPA SWMM	Propuesta de pavimento permeable y área inundable como soluciones para un sistema de drenaje sostenible.	Control de inundaciones en zonas urbanas Implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS)	[17]

1.1. Alcances Y Objetivos

Un sistema de drenaje deficiente puede conllevar a que las tuberías excedan su capacidad y colapsen a causa del aumento de la escorrentía superficial en una cuenca urbana específica. Esto surge como resultado del crecimiento demográfico y urbanístico a lo largo de los años, lo que resulta en el aumento de superficies impermeables y la disminución de la capacidad de infiltración del suelo. En consecuencia, se propone la aplicación de SUDS mediante la utilización de modelos hidrológicos, hidráulicos y herramientas de información geográfica en vías urbanas de la ciudad de Pasaje para el control del riesgo de inundaciones

2. METODOLOGÍA

Para el caso de estudio, el universo comprendió las calles urbanas del cantón Pasaje, en donde la población corresponde a las calles de la parroquia Ochoa León, que según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Pasaje 2019 – 2023 cuenta con un total de 60267.14 m de vías asfaltadas y pavimentadas. En la selección de la muestra, se aplicó el método de observación directa que permitió la identificación de dos zonas de estudio las cuales se presentan en la Figura 1, la primera zona delimitada al norte por la Avenida Azuay, al sur con la Avenida Jubones y al este con la calle 1 de noviembre; mientras que, la segunda zona está delimitada al norte por la calle Rodrigo Ugarte, al sur con la Avenida Rocafuerte, al este con la calle Municipalidad y al oeste con la Avenida 9 de mayo.

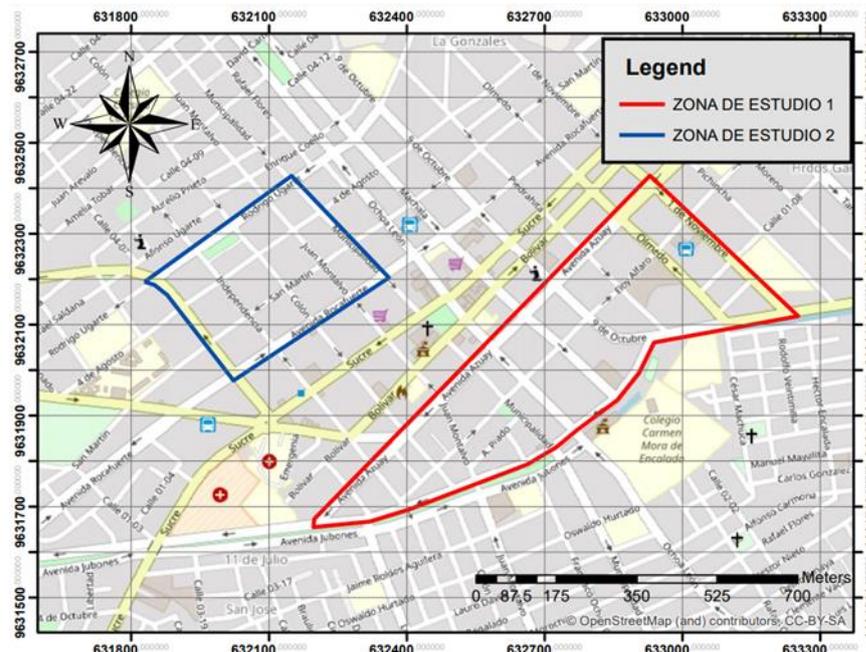


Figura 1: Zonas de estudio en la ciudad de Pasaje

La metodología empleada se sustenta en el análisis de contenido mediante una revisión bibliográfica de libros, revistas, artículos, tesis de maestría y manuales referentes a la aplicación de SUDS. De acuerdo a esta fundamentación teórica, se plantea el proceso metodológico mostrado en la Tabla 2, el cual está basado en los criterios de los autores Gonzalez et al., Kian et al. y Seyedashraf et al. para el diseño de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible [14] [16] [17]. La descripción de este proceso abarca el análisis topográfico, análisis de geología y geotecnia, análisis hidrológico, análisis hidráulico y el análisis de superficies impermeables. Con los datos recopilados en la investigación de campo, se determinaron las cuencas urbanas para el caso de estudio con el empleo del software Global Mapper 18; a partir de las cuales se desarrolló el modelo en el software SWMM 5.2, por sus siglas en inglés Modelo de Gestión de Aguas Pluviales, que refleja la realidad actual de la zona estudiada. Con los resultados obtenidos en la simulación hidrológica, se determinará una propuesta de dispositivo SUDS y un segundo modelo hidrológico donde se incluyó la técnica de SUDS seleccionada, con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre ambos modelos. Adicionalmente, se dimensionan los aliviaderos y conexiones a la red, y se determinan las labores de mantenimiento que requiera el tipo de SUDS seleccionado. Todos estos procesos se pueden agrupar en cuatro criterios: análisis de la condición existente del área de estudio, análisis de la red de drenaje de la cuenca urbana, propuesta de SUDS; y, conexiones a red y mantenimiento.

Tabla 2: Descripción del proceso metodológico

Proceso	Descripción	Instrumento	Resultado	Referencias
Análisis de la condición existente del área de estudio	<ul style="list-style-type: none"> Análisis topográfico Análisis de geología y geotecnia Análisis hidrológico Análisis hidráulico 	<ul style="list-style-type: none"> Nivel topográfico GPS RTK Software ArcMap 10.3 Estudio de suelo Manual "Estudios de Lluvias Intensas" Software Excel Planos del catastro de redes de alcantarillado Software AutoCAD 	<ul style="list-style-type: none"> Modelo Digital de Elevaciones Tipo de suelo Permeabilidad del suelo Hietograma de precipitación Red de alcantarillado pluvial Superficie impermeable y permeable Coefficiente de escorrentía para cada superficie 	[14]
Análisis de la red de drenaje de la cuenca urbana	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de cuencas urbanas Análisis de superficies impermeables Limitación de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> Software Global Mapper 18 Software EPA SWMM 5.2 	<ul style="list-style-type: none"> Cuencas urbanas Red de drenaje para modelado Resultados de la simulación hidrológica 	[16]
Propuesta de SUDS	<ul style="list-style-type: none"> Selección del tipo de SUDS Dimensionamiento de SUDS 	<ul style="list-style-type: none"> Software EPA SWMM 5.2 	<ul style="list-style-type: none"> Cubiertas vegetales Parterres inundables Cunetas vegetales Pavimentos permeables Drenes filtrantes Zanjas y pozos de infiltración 	[16] [17]
Conexiones a red y mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionamiento de aliviaderos y conexiones a la red Selección de labores de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> Manual del Software SWMM Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde 	<ul style="list-style-type: none"> Conexiones a red existente o propuestas Técnicas de mantenimiento Fichas de mantenimiento 	[17]

3. RESULTADOS

La fundamentación bibliográfica de artículos científicos permitió la elaboración de la propuesta metodológica descrita en la Tabla 2, que engloba todos los procesos y análisis utilizados en las investigaciones de los autores mencionados anteriormente. A continuación, se presentan los resultados de forma detallada, destacando cada uno de los criterios considerados; y con la finalidad de validar la metodología propuesta, se tomará como caso de estudio el sector de la ciudad de Pasaje, tal como se presentó en la Figura 1.

3.1. Análisis De La Condición Existente Del Área De Estudio

3.1.1. Análisis Topográfico

Se realizó un levantamiento topográfico detallado en las zonas de estudio, empleando un nivel topográfico para conocer las elevaciones del terreno, además, con el fin de garantizar la precisión de los datos recopilados, se usó un GPS RTK para referenciar las coordenadas de las calles utilizando el sistema de referencia WGS84, Proyección UTM, Zona 17S, dando como resultado el modelo digital de elevaciones (DEM), por sus siglas en inglés. En la Figura 2 se observa el mapa de elevaciones de la ciudad de Pasaje, obteniendo un desnivel en la zona urbana de 27.50 msnm hasta 30.22 msnm.

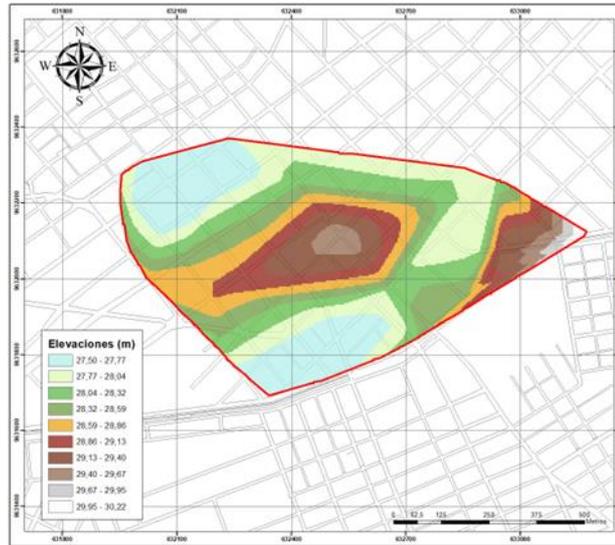


Figura 2: Mapa de elevaciones de la ciudad de Pasaje

3.1.2. Análisis De Geología Y Geotecnia

Para la descripción de la zona de estudio, mediante un análisis documental, se clasificó el suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Desde un punto de vista geotécnico, los estratos están constituidos por: limos arcillosos y arenas. Los resultados del perfil estratigráfico llevado a cabo en 2020, por el Laboratorio de Suelos & Ingeniería en Cimentaciones en la zona de estudio, indican que a una profundidad de 1.50 - 2.00 m, el Límite Líquido es del 41.12% y el Índice de Plasticidad es del 15.47%. Esto corresponde a un tipo de suelo limo inorgánico de baja compresibilidad (clasificación ML), que es un tipo de suelo limoso o arcilloso con baja plasticidad; y por lo tanto, presenta una capacidad media de infiltración.

3.1.3. Análisis Hidrológico

El análisis hidrológico constituye una parte fundamental en la modelación, debido a que, se emplea una tormenta de diseño específica, en este caso, el hietograma de precipitación obtenido mediante el método del bloque alterno a partir de las curvas IDF (Intensidad – Duración - Frecuencia). Para obtener estas curvas IDF, se utilizan las ecuaciones representativas de una estación pluviométrica, las cuales se encuentran en el libro “Estudios de Lluvias Intensas” del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador [18]. Estas ecuaciones permitirán calcular las intensidades máximas de precipitación necesarias para el análisis.

En este contexto, la estación pluviométrica M0040 PASAJE se encuentra más cercana a la zona de estudio y cuenta con intensidades máximas en 24 horas para varios períodos de retorno (TR) según el INAMHI, tal como se presenta en la Tabla 3:

Tabla 3: Intensidades máximas en 24 horas para la estación M0040 PASAJE

Estación	X (m)	Y (m)	Z (msnm)	$I_{d_{TR}}$ (mm/hr)				
				TR5	TR10	TR25	TR50	TR100
M0040 PASAJE	636773.72	9632736.04	40	4.17	4.96	5.95	6.67	7.39

A continuación, en la Tabla 4 se observan las ecuaciones representativas para dicha estación según los intervalos de tiempo especificados:

Tabla 4: Ecuaciones representativas de intensidades para la estación M0040 PASAJE

Estación	Intervalos	Ecuaciones
M0040 PASAJE	5 min < 71,23 min	$I_{TR} = 52.135 \cdot t^{-0.358} \cdot Id_{TR}$
	71.23 min < 1440 min	$I_{TR} = 316.81 \cdot t^{-0.781} \cdot Id_{TR}$

Con estos insumos, se establecieron las curvas IDF para un período de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años como se muestra en la Figura 3, las cuales fueron utilizadas en la creación de los hietogramas de precipitación con un intervalo de 10 minutos.

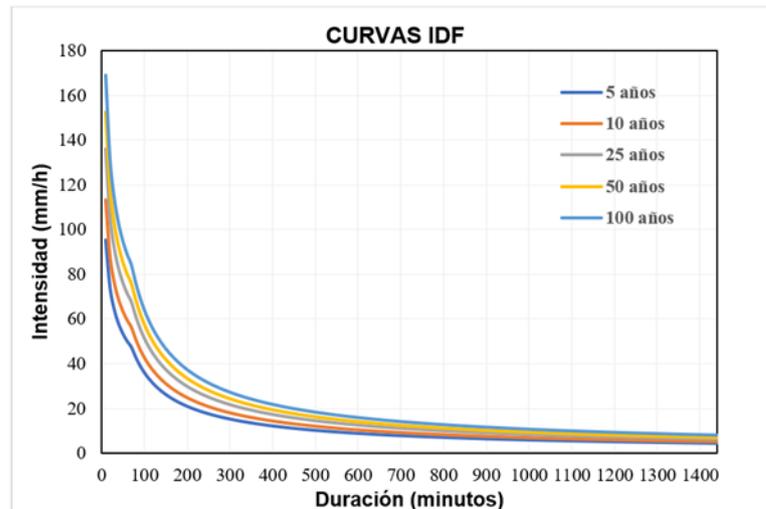


Figura 3: Curvas IDF para diferentes períodos de retorno, Estación M0040 PASAJE

La norma CPE INEN 005-9-1 establece que para sistemas de micro drenaje se dimensionará para el escurrimiento cuya ocurrencia tenga un período de retorno entre 2 y 10 años, mientras que para sistemas de macro drenajes se diseñarán para escurrimientos de frecuencias superiores a los 50 años. Sin embargo, en el caso de estudio se escogió un periodo de retorno de 100 años, para asegurar que el dimensionamiento del SUDS sea capaz de captar el volumen de lluvia correspondiente a ese periodo de retorno y satisfacer las necesidades tanto de micro drenaje y macro drenaje establecidas por la normativa. En la Figura 4 se muestra el hietograma de precipitación para un periodo de retorno de 100 años, que será utilizado en el software SWMM como una tormenta de diseño.

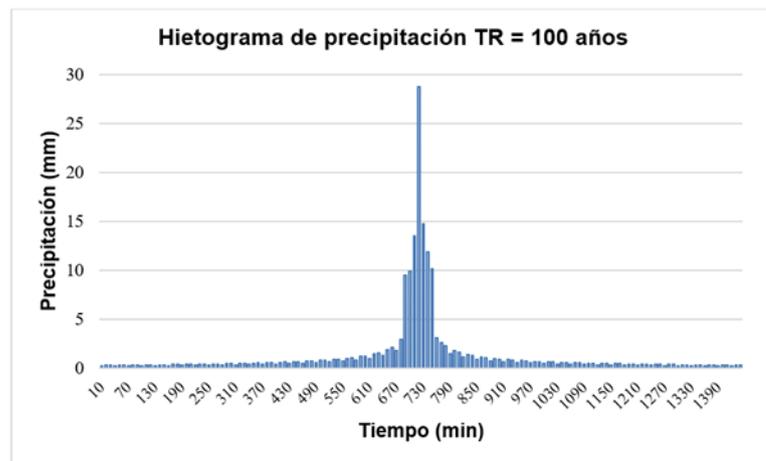


Figura 4: Hietograma de precipitación para TR = 100 años

3.1.4. Análisis Hidráulico

Se evidenció mediante la revisión de los planos de la Empresa Pública de Agua, Alcantarillado y Aseo de Pasaje (AGUAPAS EP), la cual se encarga de proveer los servicios de agua potable, alcantarillado y aseo de la ciudad; que el sistema de drenaje existente es de tipo combinado, es decir, transporta aguas servidas y aguas lluvias en una misma tubería; sin embargo, en la modelación no se tomará en cuenta el volumen que aporta estas aguas servidas al sistema, debido a que solo se analizará el impacto de una tormenta de lluvia en la vía urbana. Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Pasaje, se trata del subsistema Central, que corresponde al sector centro-norte de la ciudad, abarcando un área de 235 ha, que tiene más de 50 años de servicio. Este drenaje tiene la descarga en un canal abierto que conduce directamente hacia el Río Jubones, sin someter a ningún tipo de tratamiento a estas aguas.

3.2. Análisis De La Red De Drenaje De La Cuenca Urbana

3.2.1. Análisis De Cuencas Urbanas

El DEM obtenido anteriormente fue procesado en el software Global Mapper 18 para generar las cuencas hidrográficas dentro del área urbana. Se obtuvieron 9 subcuencas y 4 redes de drenaje, tal como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, se decidió que las cuatro subcuencas que se encuentran en la zona de estudio 2, no se emplearán en la modelación, dado a que la incidencia de las mismas no influye en el objeto de estudio.

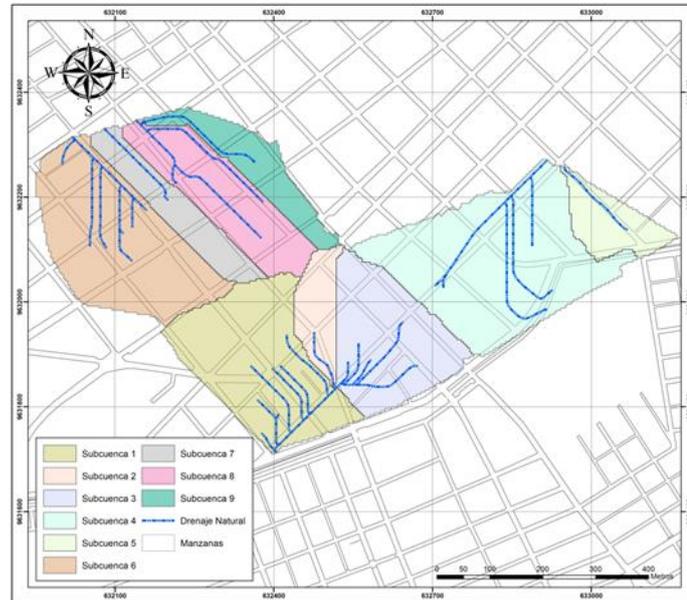


Figura 5: Creación de subcuencas y redes de drenaje natural

El escurrimiento de las cuencas restantes que pertenecen a la zona de estudio 1, fue comparado con la infraestructura existente de drenaje y se comprobó que el escurrimiento coincidía con las calles e intersecciones vulnerables a inundación, por lo tanto, se procedió a trazar líneas rectas en cada una de estas para su utilización en el proceso de modelado. En la Figura 6, se muestra la zona de estudio con las dos cuencas urbanas identificadas, la primera cuenca abarca una superficie de 13.25 ha, mientras que la segunda ocupa 11.20 ha. Ambas cuencas poseen su propia red de drenaje natural y el drenaje modelado con las calles, que quedan determinadas por las características de elevación del terreno.

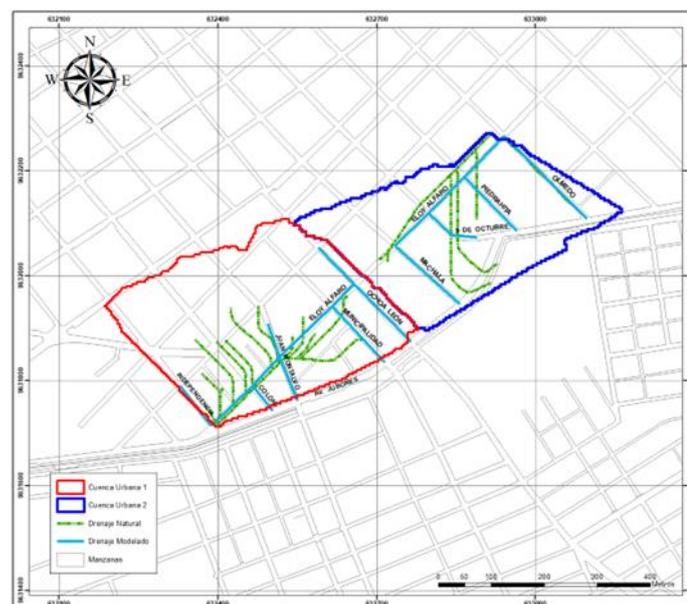


Figura 6: Cuencas urbanas con drenaje natural y drenaje modelado

3.2.2. Análisis De Superficies Impermeables

Se calcularon los porcentajes de impermeabilidad para las dos cuencas urbanas identificadas en la zona de estudio 1, encontrando que el 98.10% de la Cuenca 1 es impermeable; por otro lado, la Cuenca 2 presenta un porcentaje de impermeabilidad del 95.95%, según se detalla en la Tabla 5. Ambas cuencas presentan valores altos de impermeabilidad, principalmente debido a la presencia de viviendas, aceras y calles. Además, en la Figura 7 se observa el mapa de zonas permeables e impermeables, en donde las zonas de color verde representan las áreas verdes existentes en la zona de estudio.

Tabla 5: Superficies de las cuencas urbanas

Cuenca	Superficie	Tipo	Área		%	Coef. N
			ha	km ²		
Cuenca 1	Permeable	Pasto natural	0.252	0.003	1.90	0.130
		Hierba Corta				0.150
	Impermeable	Viviendas	7.979	0.080	60.23	0.012
		Aceras	2.119	0.021	16.00	0.012
		Calles	2.896	0.029	21.86	0.011
Cuenca 2	Permeable	Pasto natural	0.454	0.005	4.05	0.130
		Hierba Corta				0.150
	Impermeable	Viviendas	7.278	0.073	64.97	0.012
		Aceras	1.263	0.013	11.28	0.012
		Calles	2.207	0.022	19.70	0.011

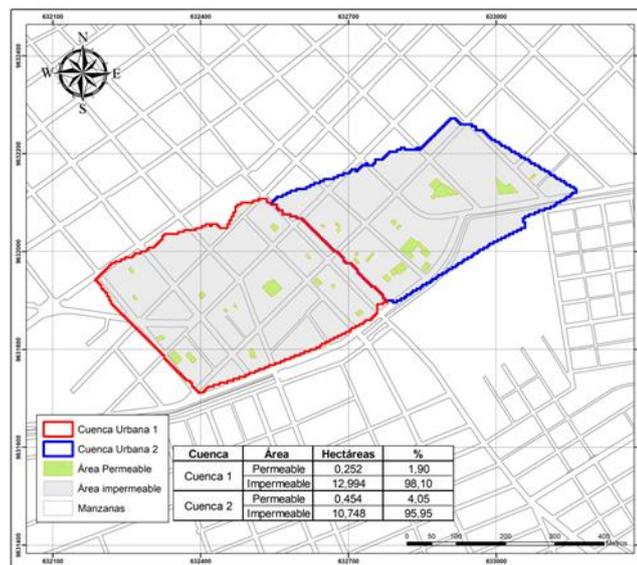


Figura 7: Área permeable e impermeable de las cuencas urbanas

3.2.3. Limitación De Drenaje

Con la información obtenida previamente, se procedió a construir los dos modelos hidrológicos en SWMM 5.2 correspondientes a las dos cuencas urbanas ya delimitadas, para un período de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Primero, se definieron las unidades de caudal en el programa, en este caso CMS (metros cúbicos por segundo). Luego, se ingresaron las elevaciones de las uniones para cada modelo, las cuales resultaron del levantamiento topográfico con nivel. Seguidamente, se procedió a dibujar las subcuencas en el área de estudio, así como el trazado de las conducciones mediante líneas rectas, que representan las calles urbanas para la simulación. Los valores de los parámetros ingresados se obtuvieron tomando como referencia las recomendaciones presentadas en el manual del software mencionado anteriormente. Finalmente, se ingresaron los datos del pluviómetro de acuerdo a los Hietogramas de precipitación obtenidos con intervalos de 10 minutos. De esta forma, se logró calibrar el modelo de acuerdo con las condiciones topográficas e hidrológicas del sector, y al ejecutar la simulación, se pudo llevar a cabo el análisis según se detalla a continuación:

En la Tabla 6, se muestran los resultados de la simulación hidrológica de caudal pico y volumen de inundación para las dos cuencas urbanas. Se evidencia que la Cuenca 2 cuenta con un mayor volumen de inundación y, por consiguiente, tiene una mayor incidencia en el objeto de estudio.

Tabla 6: Caudal pico y volumen de inundación para las cuencas urbanas

Período de retorno	Cuenca 1		Cuenca 2	
	Caudal Pico (m³/s)	Volumen de inundación (m³)	Caudal Pico (m³/s)	Volumen de inundación (m³)
5 años	0.35	0	0.28	286
10 años	0.46	1	0.35	448
25 años	0.56	68	0.44	672
50 años	0.65	168	0.51	851
100 años	0.74	295	0.57	1036

De acuerdo a lo expuesto en la sección 3.1.3, para el dimensionamiento del SUDS se emplearán los datos obtenidos para un periodo de retorno de 100 años; esta elección también se justifica en los resultados presentados de la Tabla 6, que representa la situación más crítica para ese periodo de retorno. En la Tabla 7, se observan a detalle los resultados más relevantes de las modelaciones de las dos cuencas urbanas para un periodo de retorno de 100 años, tales como la altura de precipitación total, las pérdidas por infiltración y la escorrentía superficial.

Tabla 7: Cantidad de escorrentía de las cuencas urbanas

Cantidad de escorrentía	Cuenca 1	Cuenca 2
	Altura de precipitación (mm)	Altura de precipitación (mm)
Precipitación total	31.93	31.93
Infiltración	0.52	1.12
Escorrentía superficial	29.76	29.13

Para el caso de estudio, se obtuvo que la altura de precipitación total que cae sobre la cuenca urbana es de 31.93 mm, con esta condición, se evidencia que la inundación puede igualar o incluso sobrepasar la profundidad de la acera, tal como se muestra en la Figura 8, donde se aparece el nivel de agua en calles. Las calles o conductos marcados en color rojo igualan o superan el nivel de acera propuesto. Se observa que las zonas vulnerables se encuentran en la calle Eloy Alfaro, en los tramos comprendidos entre Independencia y Juan Montalvo, y entre 9 de octubre y Piedrahita, es decir, son susceptibles a inundación.

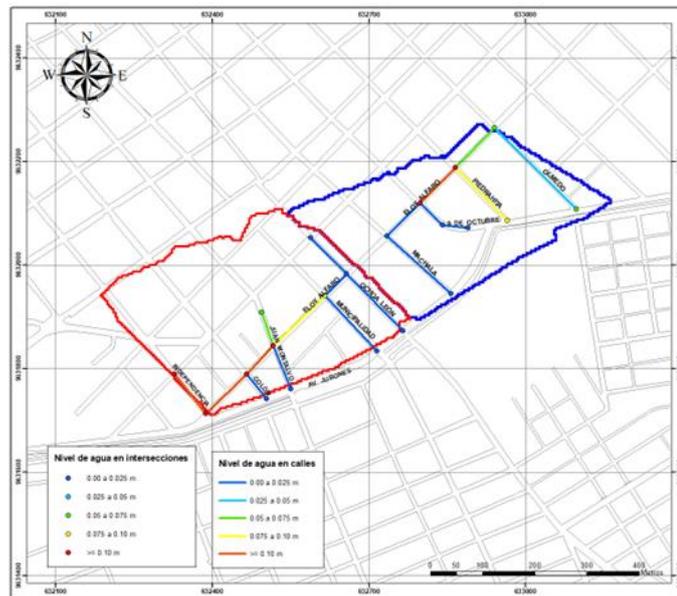


Figura 8: Mapa de nivel de agua y drenaje en intersecciones

3.3. Propuesta De SUDS

3.3.1. Selección Del Tipo De SUDS

El caso de estudio corresponde a una zona urbana, específicamente el casco central de la ciudad de Pasaje, el cual está constituido por viviendas, aceras, vías y un pequeño porcentaje de áreas verdes, tal como se presentó en la Figura 7, lo cual implica que existe una mínima infiltración del suelo en dicha zona. Por lo tanto, se seleccionó como alternativa de SUDS, la aplicación de áreas de biorretención, esta elección se basó en la capacidad de estos dispositivos para ajustarse a la disponibilidad de espacios y mejorar la estética del paisaje urbano.

El caso de estudio corresponde a una zona urbana, específicamente el casco central de la ciudad de Pasaje, el cual está constituido por viviendas, aceras, vías y un pequeño porcentaje de áreas verdes, tal como se presentó en la Figura 7, lo cual implica que existe una mínima infiltración del suelo en dicha zona. Por lo tanto, se seleccionó como alternativa de SUDS, la aplicación de áreas de biorretención, esta elección se basó en la capacidad de estos dispositivos para ajustarse a la disponibilidad de espacios y mejorar la estética del paisaje urbano.

Las áreas de biorretención o jardines de lluvia, consisten en una depresión en la tierra cubierta con acolchado y medios bien drenados, como suelo con vegetación, arena y/o capas de grava, que permiten almacenar e infiltrar la escorrentía y aumentar la biodiversidad de un sitio al ser estéticamente agradables [19]. Los jardines de lluvia cumplen con la función de fijar contaminantes y por ende depurar el agua de lluvia, esto se lleva a cabo a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos.

3.3.2. Dimensiones Del SUDS

Para el dimensionamiento del SUDS se diseñó para la cuenca con mayor influencia sobre el objeto de estudio, en este caso la Cuenca 2, en donde se tiene que el área de intervención establecida será la calle Eloy Alfaro. En la Figura 9, se observa que el área de aportación de la subcuenca S4 tiene un valor de 9.34 ha, la cual será el área que se va a intervenir con la utilización de la técnica jardín de lluvia.

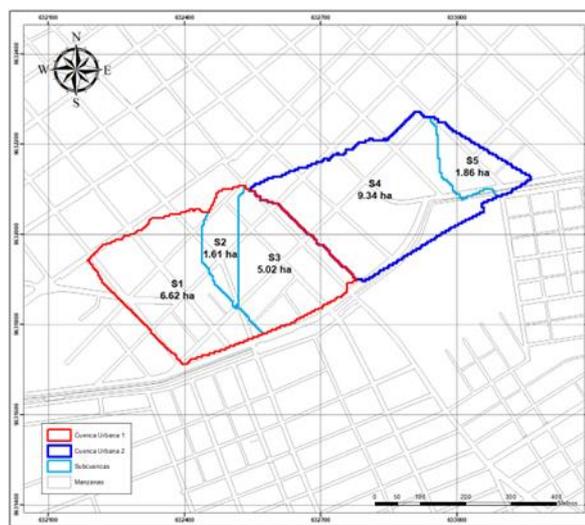


Figura 9: Áreas de aportación de las cuencas urbanas

El dimensionamiento del jardín de lluvia fue referenciado a partir de los criterios establecidos por el “Manual del software SWMM 5.2” y el “Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos” [20] [21]. Además, la investigación de Chen et al. proporciona parámetros de ingeniería detallados para el diseño de jardines de lluvia, los cuales se muestran en la Tabla 8 [22]. Estos parámetros tienen un impacto significativo en la infiltración de escorrentía y por lo tanto, determinan la capacidad y eficiencia de tratamiento, por lo cual, estos valores servirán de guía para la propuesta de diseño de jardín de lluvia.

Tabla 8: Parámetros clave para el diseño de jardines de lluvia

Parámetro de diseño	Valores	Referencias
Ancho de capa filtrante	600 – 2000 mm	[23], [24]
Longitud de capa filtrante	< 40 m	[23], [24]
Profundidad de capa filtrante	600 – 1000 mm	[23]
	400 – 600 mm	[24]
Capa drenante	>50 mm	[24]

Por otra parte, el caudal de diseño calculado fue de 0.57 m³/s para un período de retorno de 100 años; en la simulación aplicando jardines de lluvia se realizó un ajuste para la captación de un metro cúbico de lluvia, lo que permitió establecer una correlación directa entre la cantidad deseada de metros cúbicos a evacuar y el número de dispositivos de jardín de lluvia necesarios.

En concordancia con la modelación hidrológica realizada de manera experimental, se obtuvo que se deben colocar cuatro dispositivos dentro de la microcuenca para captar ese metro cúbico de escorrentía, y dependiendo del volumen que se desee evacuar se deben establecer estrategias para la ubicación de estos jardines de lluvia dentro de la zona urbana.

La simulación realizada consideró una dimensión del jardín de lluvia de 0.80 m x 5.50 m, con un área de 4.40 m² por cada jardín de lluvia, estableciendo un área total de 17.60 m² por los cuatro dispositivos establecidos. A continuación, en la Figura 10 se presenta el esquema del detalle constructivo del jardín de lluvia, en el cual, se propuso un espesor de acolchado de 10 cm, una capa filtrante o capa sustrato de 40 cm y una capa drenante de 30 cm. Finalmente, se aconseja que exista un área de vegetación densa en la entrada del jardín de lluvia para que sirva de pretratamiento y disipación de energía.

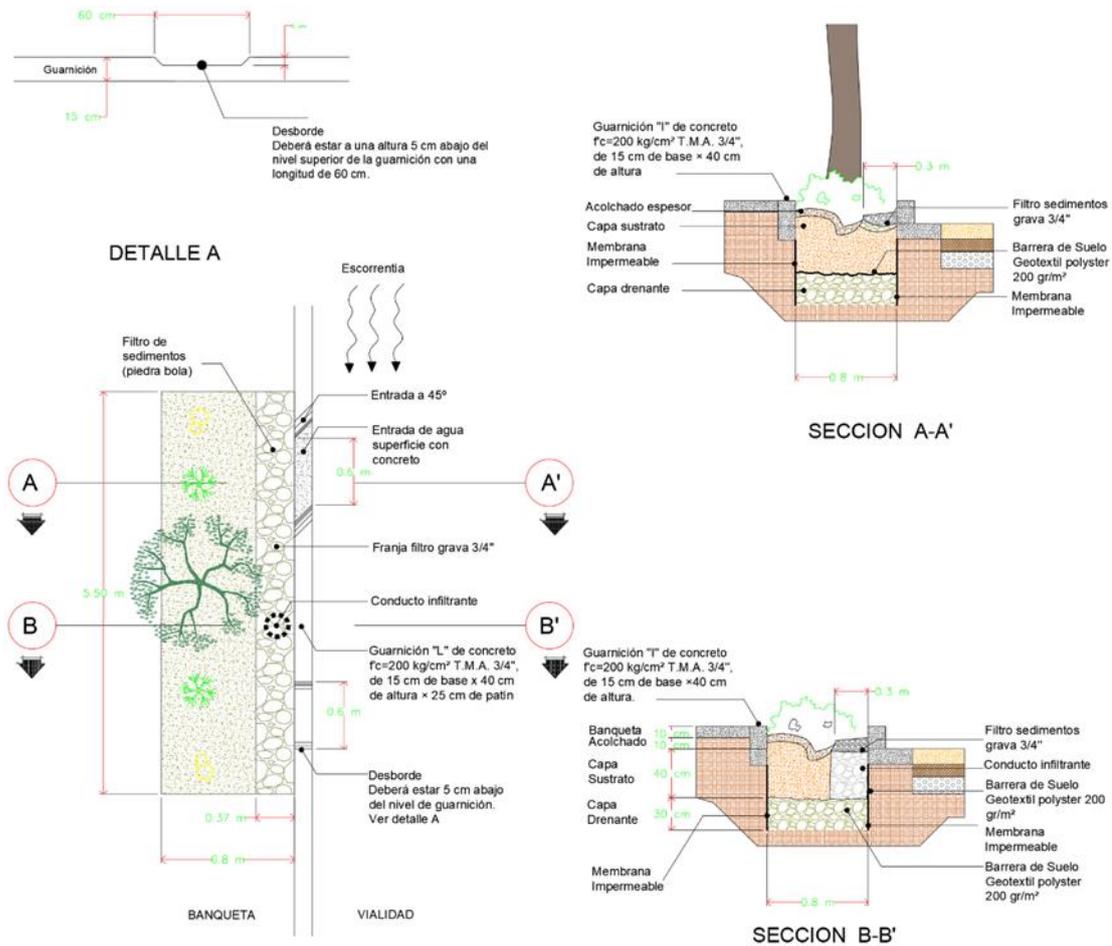


Figura 10: Detalle constructivo del jardín de lluvia

3.4. Conexiones A Red Y Mantenimiento

3.4.1. Aliviaderos Y Conexiones A La Red

Para eventos de lluvia extremos deben instalarse estructuras de rebose que permitan la descarga controlada del jardín de lluvia a la red. Actualmente, la infraestructura existente de alcantarillado es del tipo combinado, por lo cual es recomendable que exista una red separada para aguas lluvias y aguas residuales.

3.4.2. Labores De Mantenimiento

Se concluye con las labores de mantenimiento que se deben llevar a cabo para garantizar un adecuado funcionamiento del jardín de lluvia, según el Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos, el mantenimiento rutinario consiste en podas, deshierbe y riego en temporadas secas, así como la limpieza periódica de las entradas de agua antes y después de la temporada de lluvias [21]. Además, otros autores mencionan que el mantenimiento requerido para elementos de biorretención incluye inspecciones trimestrales para detectar erosión y falta de material o vegetación.

4. CONCLUSIONES



Se fundamentó conceptualmente mediante una revisión bibliográfica exhaustiva relacionada con estudios para la aplicación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible que controlen el riesgo de inundaciones en vías urbanas. El análisis de contenido de artículos científicos permitió la elaboración de una propuesta metodológica basada en los procesos de Análisis de la condición existente del área de estudio, Análisis de la red de drenaje de la cuenca urbana, Propuesta de SUDS y, Conexiones a red y mantenimiento, tomando como caso de estudio el sector de la ciudad de Pasaje, ubicada en Ecuador.

Se identificaron dos cuencas urbanas vulnerables a inundaciones mediante el uso del software Global Mapper 18, luego se comparó el escurrimiento de estas cuencas con la infraestructura existente de drenaje y se comprobó que el escurrimiento coincidía con las calles e intersecciones vulnerables a inundación. De la misma forma, por medio de la caracterización y modelación hidrológica de las cuencas en el software SWMM 5.2 con un período de retorno de 100 años, se analizó la escorrentía superficial de la zona de estudio y los resultados mostraron que el nivel del agua alcanza una altura superior a la de la acera. De esta forma, se logró la validación de la metodología propuesta con aplicación a la ciudad de Pasaje.

En base a los resultados de la modelación, se seleccionó la Cuenca 2 para realizar el análisis y la propuesta de SUDS, en la cual, se planteó como alternativa la utilización de jardines de lluvia, y mediante un ajuste se determinó que para la captación de 1 m^3 de escorrentía, se requiere emplear cuatro dispositivos dentro de la superficie de la cuenca correspondiente a 9.34 ha, los cuales deberán tener una dimensión de 0.80 m x 5.50 m cada uno. A medida que se incremente el uso de este tipo de estructuras dentro del área especificada se logrará evacuar un mayor volumen de escorrentía para el control de riesgo de inundaciones en vías urbanas.

1. P. Joshi, J. P. Leitão, M. Maurer, and P. M. Bach, "Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows," *Water Res*, vol. 191, 2021, doi: 10.1016/j.watres.2020.116780.
2. S. Tang *et al.*, "Robustness analysis of storm water quality modelling with LID infrastructures from natural event-based field monitoring," *Science of the Total Environment*, vol. 753, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142007.
3. Z. Xue, "Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible," Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 2020. Accessed: Feb. 11, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10017/44038>
4. P. Singh, V. S. P. Sinha, A. Vijhani, and N. Pahuja, "Vulnerability assessment of urban road network from urban flood," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 28, 2018, doi: 10.1016/j.ijdr.2018.03.017.
5. C. Bae and D. K. Lee, "Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 44, 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101412.
6. S. S. Baek *et al.*, "A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds," *J Hydrol (Amst)*, vol. 586, 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124886.
7. F. K. Shun Chan *et al.*, "'Sponge City' in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context," *Land use policy*, vol. 76, 2018, doi: 10.1016/j.landusepol.2018.03.005.
8. E. Lähde, A. Khadka, O. Tahvonen, and T. Kokkonen, "Can we really have it all?—Designing multifunctionality with sustainable urban drainage system elements," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.3390/su11071854.
9. P. Ferrans, M. N. Torres, J. Temprano, and J. P. Rodríguez Sánchez, "Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review," *Science of the Total Environment*, vol. 806. Elsevier B.V., Feb. 01, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150447.
10. C. Lashford *et al.*, "SuDS & sponge cities: A comparative analysis of the implementation of pluvial flood management in the UK and China," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 1. 2019. doi: 10.3390/su11010213.
11. L. G. Fonseca Alves, C. de Oliveira Galvão, B. L. de Farias Santos, E. Fernandes de Oliveira, and D. Andrade de Moraes, "Modelling and assessment of sustainable urban drainage systems in dense precarious settlements subject to flash floods," *LHB: Hydrosience Journal*, vol. 108, no. 1, 2022, doi: 10.1080/27678490.2021.2016024.
12. K. Potter and T. Vilcan, "Managing urban flood resilience through the English planning system: Insights from the 'SuDS-face,'" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, no. 2168, 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0206.
13. E. D. Cubides and G. E. Santos, "Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 24, pp. 32–42, 2018, doi: 10.31908/19098367.3813.
14. N. Z. Kian, H. Takaijudin, and M. Osman, "An analysis of stormwater runoff rehabilitation for integrated BIOECODS using EPA-SWMM," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 646, no. 1, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/646/1/012048.
15. Sarminingsih, D. S. Handayani, and A. Astriani, "Review-Design of Drainage System of Kedungmundu Road, Semarang City with the Implementation of the Sustainable Urban Drainage System (SUDS)," *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 19, no. 2, pp. 251–261, Jul. 2022, doi: 10.14710/PRESIPITASI.V19I2.251-261.
16. O. Seyedashraf, A. Bottacin-Busolin, and J. J. Harou, "Many-Objective Optimization of Sustainable Drainage Systems in Urban Areas with Different Surface Slopes," *Water Resources Management*, vol. 35, no. 8, pp. 2449–2464, Jun. 2021, doi: 10.1007/S11269-021-02840-4.
17. J. G. Gonzalez Aguilar, C. E. Sánchez Mendieta, Y. P. Medina Sánchez, and F. L. Campuzano Vera, "Metodología para diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles en vías urbanas," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 4, no. 1, pp. 66–78, 2023, Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. Available: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/155>
18. INAMHI, "Estudio de lluvias intensas: Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación," Quito, 2015.
19. E. v. Lopez-Ponnada, T. J. Lynn, S. J. Ergas, and J. R. Mihelcic, "Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff," *Water Res*, vol. 170, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2019.115336.

20. L. Rossman and M. Simon, "Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2," Cincinnati, Feb. 2022. Accessed: Jul. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/swmm-users-manual-version-5.2.pdf>
21. IMPLAN Hermosillo, "Manual de lineamientos de diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos," 2017. Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <https://ciudadesverdes.com/download/manual-de-lineamientos-de-diseno-de-infraestructura-verde-para-municipios-mexicanos/>
22. S. S. Chen *et al.*, "Designing sustainable drainage systems in subtropical cities: Challenges and opportunities," *J Clean Prod*, vol. 280, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124418.
23. CIRIA, *The Suds manual*, vol. 1. CIRIA – Construction Industry Research and Information Association, 2015. Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.ciria.org/ItemDetail?iProductCode=C753F&Category=FREEPUBS>
24. Water by Design, *Bioretention Technical Design Guidelines*, vol. 1. 2014. Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: <https://waterbydesign.com.au/download/bioretention-technical-design-guidelines>